

黄土高原小麦田土壤呼吸对强降雨的响应

张红星¹, 王效科^{1,*}, 冯宗炜¹, 宋文质¹, 刘文兆², 李双江², 庞军柱¹, 欧阳志云¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院水土保持研究所 长武黄土高原农业生态试验站, 陕西 722400)

摘要:全球气候变化的可能后果之一是干旱频繁, 强降雨增多。土壤呼吸是全球碳循环的关键组成部分, 探讨强降雨对土壤呼吸的影响, 有助于预知在全球变化背景下, 土壤 CO₂ 排放的可能反馈机制。然而, 由于测定技术限制, 目前在降雨前后, 对土壤呼吸进行原位、全天候、高频率测定的研究尚不够深入。研究选取黄土高原半干旱区小麦田土壤为研究对象, 采用全自动多通量箱系统, 对降雨前后的土壤呼吸及环境因子在原位置进行了全天候连续监测, 分析了 3 次强降雨前后的土壤呼吸变化。结果表明, (1) 强降雨对土壤呼吸促进还是抑制取决于雨前、雨中、以及雨后的土壤水分状态。土壤水分相对亏缺条件下的强降雨促进土壤呼吸, 降雨结束后土壤呼吸的平均水平是降雨发生前的 1.5~2 倍; 湿季的强降雨整体上抑制土壤呼吸, 降雨过程中观测到呼吸波谷, 雨中及雨后土壤呼吸分别下降了约 33% 和 15%。(2) 土壤呼吸与土壤水分之间存在二次曲线关系, 此关系同时受土壤水分状况和温度的影响。当土壤由干旱和水分相对亏缺状态过渡到湿润时, 上述二次曲线关系可靠; 当土壤水分充裕时, 该二次曲线关系减弱。在干湿交替情况下, 二次曲线拐点是土壤呼吸因土壤水分增加而受到抑制的临界点, 并且当温度升高时, 该临界点相应升高。(3) 温度和水分共同影响土壤呼吸。在土壤水分相对亏缺时, 水分的增加是影响土壤呼吸的关键因子, 温度对土壤呼吸的影响处于相对次要的位置; 在水分充裕时, 温度是影响土壤呼吸的关键因子, 水分的增加会抑制土壤呼吸, 但其对土壤呼吸变化的影响相对弱化。

关键词:黄土高原; 小麦田; 土壤呼吸; 强降雨

文章编号: 1000-0933(2008)12-6189-08 中图分类号: Q143 文献标识码: A

The great rainfall effect on soil respiration of wheat field in semi-arid region of the Loess Plateau

ZHANG Hong-Xing¹, WANG Xiao-Ke^{1,*}, FENG Zong-Wei¹, SONG Wen-Zhi¹, LIU Wen-Zhao², LI Shuang-Jiang², PANG Jun-Zhu¹, OUYANG Zhi-Yun¹

1 Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 722400, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6189 ~ 6196.

Abstract: To discern the response of soil respiration to heavy rainfall in semi-arid region of the Loess Plateau, soil respiration of wheat field was monitored during three heavy rainfall periods. The first heavy rainfall event happened on May 15, 2005, after a one-month arid period. The soil was in semi-arid state before the second heavy rainfall on May 30. And the soil was wet before the third heavy rainfall which started on July 1 and lasted nearly 3 days. Soil respiration of wheat

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40321101); 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2002CB412503); 中国科学院创新工程重大资助项目(KZCXI-SW-01-17)

收稿日期:2007-08-20; **修订日期:**2008-01-24

作者简介:张红星(1977~), 男, 河南淇县人, 博士, 主要从事植物生理生态学及全球气候变化研究. E-mail: zhx973@yahoo.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxk@cees.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40321101); The National Key Basic Research and Development Plan (973) of China (No. 2002CB412503); The main Project of Knowledge Innovation CAS (No. KZCXI-SW-01-17)

Received date:2007-08-20; **Accepted date:**2008-01-24

Biography: ZHANG Hong-Xing, Ph. D., mainly engaged in physiological ecology, global change and carbon cycle. E-mail: zhx973@yahoo.com

field was continuously monitored for about 20 days around each rainfall separately (i. e. 10 days before and 10 days after each of the three rainfalls), using three chambers of a multi-channel automated chamber system. Environmental factors were also simultaneously measured. The main factors affecting the soil respiration were selected by stepwise regression method and the relationship between the soil volume water content (SVWC) and soil respiration (SR) was analyzed. The results showed that, (1) Heavy rainfall could both promote and inhibit soil respiration and its effect on SR depended on the soil water state before, during and after the rainfall event. The rainfall promoted the SR when the soil was in arid or water deficit state, but restrained it when the soil was wet. Comparing the values after and before the rain, the SR increased almost 2 and 1.5 times respectively for the first and second rain, but reduced nearly 15% for the third one. The SR reduced 33% during the third rain course. (2) The relationship between the SR and SVWC could be described in a quadratic equation. According to this equation, the inflexion could be considered as a critical SVWC. The SR increased with the increment of SVWC when the SVWC was below the critical value, but decreased with the building up of SVWC when the SVWC was above the critical value. (3) The quadratic relationship was influenced by soil water state and temperature. It was more reliable when the soil changed from arid or water deficit state to soil wet state due to rainfall than that from wet to wetter. On the other hand, the inflexion of the quadratic equation increased with temperature when the soil changed from water deficit state to superfluous state. (4) Temperature and SVWC were interdependent in their effects on SR, and the effects depended on the soil water state before the rainfall. The SVWC was the most influencing factor when the soil was in arid or semiarid state before rain, but its effect on soil respiration weakened and the temperature became the most influencing factor when the soil was enough wet before rain.

Key Words: the Loess Plateau; wheat field; soil respiration; great rainfall

土壤呼吸是全球碳循环中一个最重要的组成部分之一,其轻微变化就能够对大气中 CO_2 浓度产生较大影响^[1]。大气中 CO_2 浓度的增加以及其他温室气体的排放在通过温室效应增加全球温度的同时可能会改变降雨模式^[2,3]。有证据表明极端降雨事件开始在世界范围内出现^[4]。气候变化可能导致干旱频发,强降雨增多^[5]。这种干旱和强降雨交替的格局会引起土壤呼吸的变化。但对于这种变化的特点以及可能的后果的研究还不够,特别是较大降雨对土壤呼吸的可能影响有待深入研究。

关于土壤呼吸对水分的响应,科研人员在人工或实验室模拟条件下,做了大量研究^[6~8]然而在自然条件下,实地测定降雨对土壤呼吸的影响的研究非常少,并且因为技术限制,连续性不够^[9]。在降雨过程中以及降雨前后对土壤呼吸进行连续全天候监测对于理解土壤呼吸的降雨响应机理有非常重要的意义。然而,目前还没有在降雨过程中以及降雨前后进行连续测定的报道。本研究利用黄土高原春季干旱后的 2 次强降雨以及雨季的 1 次强降雨,以期通过对降雨发生过程中,以及 3 次降雨前后约 20d 内小麦田土壤呼吸的连续监测,探讨土壤呼吸对强降雨的响应特征及机理。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

本研究场地布设于中国科学院长武农业生态试验站,该站位于黄土高原中南部的陕甘交界处。北纬 $35^{\circ}12'$,东经 $107^{\circ}40'$,海拔 1200m,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降雨 584mm,多分布在 7 到 9 月份,平均气温 9.1°C ,农业生产全部依靠自然降水,属典型的旱作农业区。土壤属黑垆土,pH 值为 8.4,土壤有机质含量约 3%,土质均匀疏松。降雨分布不均,年际间变异大,干旱频繁。

1.2 样地特征及处理

小麦田是该研究区域的一种主要土地利用类型。每年在秋耕秋播时施肥,施肥标准一般为,每 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮肥, $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷肥。本研究为了探讨土壤呼吸对强降雨的响应特征及机制,利用了 2005 年的 3 次典型降雨。采用自行开发的全自动通量箱系统中的 3 个通量箱,对每次降雨前后和降雨过程中约 20d 左右

时间范围内的土壤呼吸进行连续测定。3次降雨情况如下:第1次降雨发生在2005年5月15日到16日,小麦生育期为育穗期,降雨42.7mm,历时约34h,降雨前历经近1个月的干旱;第2次强降雨发生在2005年5月30日晚20:00,冰雹大风,最快风速54.7m/s,降雨26.6mm,历时30min,小麦生育期为灌浆期;第3次强降雨发生在6月30日到7月2日,总降雨量约107.8mm,历时约37h。属于雨季的连阴雨天,发生在小麦收获以后。

1.3 环境因子及土壤呼吸测定

降雨量数据和大气压数据来源于中国科学院长武农业生态试验站气象站。采用热电偶(T型)测定土壤温度(10、20cm);采用ECH2O传感器测定土壤10cm土壤水分;采用温湿传感器(HMP45C)测定气温及空气湿度,这些传感器都连接在数据采集器(CR10X)上。数据采集器每3min记录1次测得的环境因子数据。

本研究中,采用张红星等开发的多通量箱自动测定系统中的3个通量箱^[10],在选定的强降雨发生前后约20d内以及降雨过程中,对小麦田土壤呼吸进行连续全天候监测。在测定前一个月将通量箱覆盖区域(50cm×50cm)的小麦连根拔除,依小麦行势放置通量箱。每小时内,每个通量箱依次关闭3min用于测定,其他时间内都处于打开状态。因为关闭时间比较短,降雨过程中被排除在通量箱外的水分比较少。以50mm·d⁻¹的特大降雨为例,造成的误差也不到5%。而且土壤水分的侧渗等因素也使土壤水分的箱内外差别趋于均衡。5月17日降雨后,对小麦田里的通量箱内外表层5cm的土壤容积含水量进行了测定,结果表明箱内外的土壤湿度差别不显著($n=10, P>0.05$)。

1.4 数据处理

1.4.1 数据预处理

用C++语言编写程序,把下载到计算机里的原始数据(CO₂浓度数据和气象数据)分配到各个对应的通量箱,计算出通量箱内CO₂浓度变化率。为了减小偶然误差,剔除 $R^2<0.95$ 的数据;为了排除因为通量箱关闭对测定的影响,在计算CO₂浓度变化率时,选取通量箱闭合1min后到打开前20s的CO₂浓度数据。在Excel下,依据公式 $A = \frac{dc}{dt} \frac{V}{S} \frac{P}{RT}$ 计算土壤呼吸速率。方程中, A 是单位面积上单位时间内CO₂释放量($\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); c 是CO₂摩尔浓度($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$); t 是时间(s); V 是通量箱体积(m^3); S 是通量箱底面积(m^2); P 是大气压(KPa); R 是气体常数($8.3 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{kPa} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T 是通量箱内气体温度(K); dc/dt 是通量箱中CO₂浓度变化率^[11]。

1.4.2 数据分析

在描述降雨前后的土壤呼吸变化规律以及分析土壤呼吸和水分的关系时,土壤呼吸数据采用每个小时中3个自动通量箱的平均值,数据频率每小时1次。采用Excel软件描述降雨过程及前后的土壤呼吸变化和环境因子变化;应用Sigma plot10.0软件分析土壤呼吸和水分间的关系并画图。采用SPSS13.0软件分析土壤呼吸和环境因子的关系,作逐步回归分析。

2 结果与分析

2.1 强降雨前后的土壤呼吸及土壤容积含水量变化

2.1.1 干旱条件下,强降雨(第1次强降雨)前后土壤呼吸和土壤容积含水量的变化

图1是第1次降雨前后20d的土壤呼吸和土壤容积含水量的变化情况。降雨发生前,干旱持续了一个月。图中箭头所指示位置为降雨开始时间5月15日和降雨结束时间5月16日。在降雨发生前的约10d时间内,土壤容积含水量平均值为 $0.08 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,降雨结束后,跃升到了 $0.23 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,然后逐渐下降,雨后10d内的平均土壤容积含水量为 $0.15 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,雨后10d,下降到约 $0.11 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。降雨改善了土壤水分状况。

由图1可以看出,就整体而言,降雨结束后的土壤呼吸水平比降雨前高。降雨前约10d内,土壤平均呼吸速率为 $2.01 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;降雨过程中平均为 $2.45 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;降雨后约10d内,平均为 $3.71 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,比降雨前增加了约2倍。从图上可以看出,降雨结束后,土壤容积含水量达到了一个高峰,

土壤呼吸逐渐增强,有连续 3d 的呼吸跃升,且每天峰值有渐强趋势,在降雨结束后的第 3 天达到最高峰。然后,土壤呼吸在明显高于降雨前的高水平上波动。

显然,降雨发生前长达一个月的干旱使土壤水分处于亏缺状态,土壤呼吸受到了水分不足的制约。强降雨有效的补给了土壤水分,促进了土壤 CO_2 释放。在干湿交替时期水分是影响土壤呼吸的重要因素。

2.1.2 干旱缓解后,强降雨(第 2 次)前后土壤呼吸和土壤容积含水量的变化

第 2 次降雨距第 1 次降雨约 15d。发生在 5 月 30 日 20:00。图 2 表示了降雨前后土壤呼吸和土壤水分随时间的变化情况,箭头所示位置为降雨发生时间。降雨前土壤容积含水量平均为 $0.13 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,降雨后最高达到 $0.36 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,平均为 $0.23 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。降雨前土壤每小时的平均呼吸速率为 $3.59 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,降雨后为 $5.41 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,约为降雨前的 1.5 倍。呼吸最高峰比土壤容积含水量最高峰滞后 3d。与第 1 次降雨后(图 1)不同的是,呼吸高峰过后,呼吸强度的下降趋势不明显,在降雨后的第 8 天甚至出现了超过呼吸后高峰的情况。第 2 次降雨促进了土壤呼吸,尽管促进的相对程度没有第 1 场降雨大,但是,降雨后土壤的平均呼吸强度比第 1 次降雨后的要强。

2.1.3 雨季的连阴强降雨(第 3 次)前后土壤呼吸的变化

在第 3 次强降雨前 3d,每天都有小规模降雨。图 3 中箭头所指位置为强降雨开始发生时间 6 月 30 日和降雨结束时间 7 月 2 日。强降雨开始后,持续了约 2d,降雨结束后持续了 5d 的阴天,然后从第 190 天开始,连续有 5 个晴天。强降雨发生前,土壤容积含水量为 $0.15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,降雨过程中一度达到了 $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,雨后平均为 $0.24 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。在降雨前,土壤呼吸的平均值为 $5.28 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在降雨过程中,土壤呼吸的平均值为 $3.52 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,约降低了 33%;降雨后,土壤呼吸的平均值为 $4.44 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,相对于雨前,降低了约 15%。降雨整体上抑制了土壤呼吸,这种土壤呼吸降低在降雨发生过程中更明显。比如,降雨发生过程中土壤呼吸相对于雨前和雨后有一个明显的波谷(图 3)。

2.2 降雨前后土壤呼吸和土壤容积含水量之间的关系

图 4 反映了 3 次(I、II、III)降雨前后,土壤呼吸对土壤容积含水量的响应特征,二者之间的关系可以用二次曲线来描述。根据二次曲线方程可以求出方程的拐点,当土壤容积含水量的值小于拐点时,容积含水量的进一步增加促进土壤呼吸;当容积含水量的值大于方程的拐点时,容积含水量的增大抑制土壤呼吸。表 1 是 3 次(I、II、III)降雨前后,描述土壤呼吸和土壤容积含水量之间关系的二次曲线方程的情况。

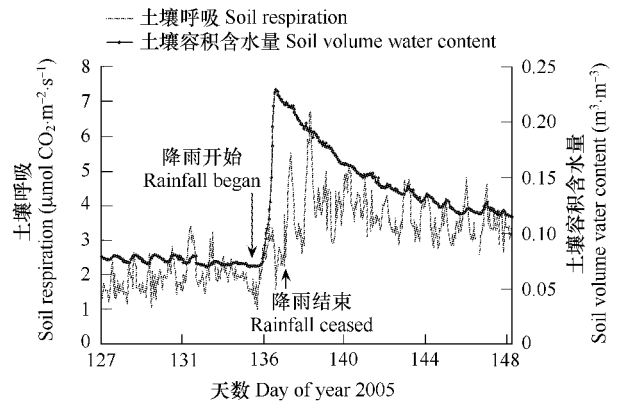


图 1 第 1 次强降雨前后,土壤呼吸(SR)和土壤容积含水量(SVWC)的变化

Fig. 1 Soil respiration (SR) and soil volume water content (SVWC) changed with time around the first great rainfall in the year of 2005

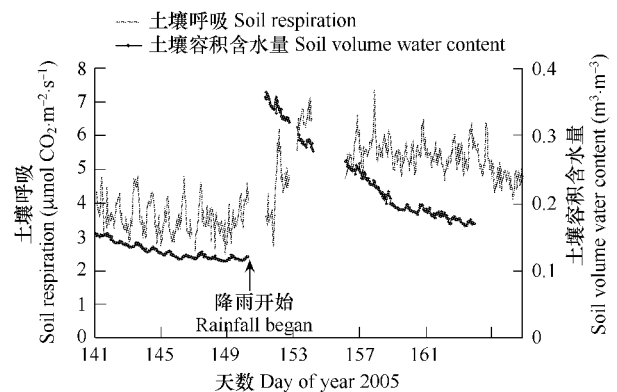


图 2 第 2 次降雨前后,土壤呼吸(SR)和土壤容积含水量(SVWC)的变化

Fig. 2 Soil respiration (SR) and soil volume water content (SVWC) changed with time around the second great rainfall in the year of 2005 图中第一处断开部分是因为大风冰雹引起的设备故障,第二和第三处断开部分是因为停电 The first absence of data was due to malfunction of equipment caused by rainstorm; the second and the third discontinuity were because of power cuts

第 1 次降雨前后约 20d 范围内,约 85.5% 的数值位于拐点值($0.167 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)的左侧;第 2 次降雨前后,约 85.1% 的数值位于拐点值($0.247 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)的左侧;第 3 次降雨前后,几乎全部的值都位于拐点值($0.116 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)的右侧。所以,长期干旱后的降雨(Ⅰ),以及干旱情况改善后的降雨(Ⅱ)整体上促进土壤呼吸,而雨季的强降雨(Ⅲ)整体上抑制了土壤呼吸。然而,在第 1、第 2 次降雨前后,参与统计的数值中,都各有约 15% 的数值位于各自二次曲线拐点的右侧(图 4 Ⅰ Ⅱ),这说明,即便降雨引起的水分增加整体上促进土壤呼吸,在土壤水分改变过程中,当水分超过拐点时,也可能发生土壤呼吸被抑制的情况。

不过,第 3 次降雨前后,土壤容积含水量对土壤呼吸的解释力明显要低于第 1 和第 2 次降雨,表现为二次方程的复决定系数($R^2 = 0.2445$)比第 1 次($R^2 = 0.6961$)和第 2 次($R^2 = 0.7271$)小。在第 1 次降雨前,土壤经历了历时近一个月的干旱,水分是土壤呼吸的限制因子;在第 2 次降雨前,土壤容积含水量的平均水平因第 1 次降雨而得到了改善,但经过两个星期的蒸发下渗,土壤水分再次处于相对亏缺状态。所以,在干湿交替和水分相对亏缺的条件下,二次曲线能够很好的反映土壤呼吸和土壤容积含水量的关系,水分是影响土壤呼吸的关键因素。但是,在土壤水分充裕的情况下,水分和土壤呼吸之间的二次曲线关系减弱,比如在第 3 次降雨发生前后土壤容积含水量和土壤呼吸的相关性较之前两次较小。

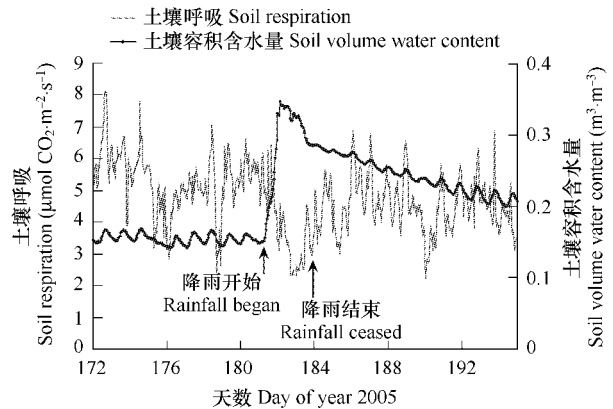


图3 第 3 次强降雨前后,土壤呼吸(SR)和土壤容积含水量(SVWC)的变化

Fig. 3 Soil respiration (SR) and soil volume water content (SVWC) changed with time around the third great rainfall of 2005

表 1 3 次降雨前后,土壤呼吸和土壤容积含水量之间的二次曲线关系

Table 1 The quadratic relationships between soil respiration (SR) and soil volume water content (SVWC) around the three rainfalls separately

序号 No.	方程 Model	拐点 Inflexion	复决定系数 R^2	显著性 Significance
Ⅰ	$y = -2.8336 + 82.0142x - 245.1092x^2$	0.167	0.6961	$P < 0.0001$
Ⅱ	$y = -3.8264 + 79.2326x - 160.2145x^2$	0.247	0.7271	$P < 0.0001$
Ⅲ	$y = 4.6917 + 9.8198x - 42.3718x^2$	0.116	0.2445	$P < 0.0001$

$P < 0.0001$ 表示方程极显著; $P < 0.0001$ indicated that the equation is significant

3 讨论

3.1 强降雨对土壤呼吸的影响

有研究表明,土壤呼吸在降雨过后明显增强^[12~14]甚至有报道指出,在农田中,降雨后的土壤呼吸比降雨发生前高达九倍^[15]。也有研究认为土壤呼吸在降雨刚开始时突然增强,降雨结束后很快回到降雨前的水平^[8]。土壤呼吸在降雨后增强的原因可能存在于两方面。其一,置换效应,降雨填充了土壤空隙,把土壤中的 CO_2 气体置换出来。这种原因引起的土壤 CO_2 释放在水分改善后的几分钟内就会发生,可能持续几个小时。其二,长期干旱导致土壤微生物活性降低,土壤呼吸较弱,降雨增加了对基质的利用率,促进 N 矿化,激活了微生物活性,进而促进土壤呼吸^[16]。

然而,有相反的报道认为,农田中的土壤呼吸在强降雨后迅速降低^[17]。Davidson 等在研究巴西亚马逊河流域东部森林和草原的土壤呼吸时,在强降雨发生后也观测到了呼吸减弱的情况^[14]。因为水分填充土壤空隙,阻止气体扩散,强降雨可能暂时抑制土壤呼吸^[18]。不同的地区土壤基质不同,降雨模式各异,这可能是导致在不同的地区对于降雨的研究得出不同结论的原因。此外,因为技术原因,不能够对降雨前后以及过程中的土壤呼吸变化进行全天候观测也可能导致错过一些典型过程。

本研究在黄土高原半干旱地区的小麦田,对发生在不同时期,且降雨前土壤水分条件不同的 3 次典型降

雨前后的土壤呼吸进行了全天候测定,结果表明,降雨不一定促进或抑制土壤呼吸,其对土壤呼吸的影响取决于降雨前和降雨后的水分状态。土壤容积含水量和土壤呼吸之间的关系能够用二次曲线来表示,二次曲线的拐点可以作为判定促进或抑制作用的临界点。当降雨前土壤的容积含水量小于临界容积含水量时,降雨的发生促进土壤呼吸;当降雨对土壤水分的补给超过临界点时,土壤呼吸开始减弱,降雨对土壤呼吸的抑制作用就会表现出来。如果降雨发生前土壤的容积含水量就介于临界容积含水量以上时,降雨总体上就会抑制土壤呼吸。长期干旱以后的降雨容易整体上促进土壤呼吸,但降雨过程中以及降雨结束后,如果土壤容积含水量大于临界容积含水量,土壤呼吸就会受到一定的抑制。相对而言,湿季的降雨更容易抑制土壤呼吸。

上述二次曲线受两方面因素的影响。其一,降雨前土壤的水分状况影响二次曲线的可靠性。在长期干旱或者水分相对亏缺的情况下,降雨对土壤水分的改善成为影响土壤呼吸的主要原因,此时二次曲线可以很好的描述土壤呼吸和土壤容积含水量的关系。比如,第1次和第2次降雨前后的土壤呼吸和土壤容积含水量的关系(图4 I、II,表1 I、II)。但是,当降雨前土壤水分充裕时,土壤呼吸和土壤容积含水量之间的这种二次曲线关系减弱,比如第3次降雨发生前后(图4 III,表1 III)。其二,温度影响二次曲线的临界点。第2次降雨前后,平均气温为20.7℃,第1次降雨前后,平均气温为16.7℃。第2次降雨前后,二次曲线的拐点为0.247 m³·m⁻³,高于第1次降雨前后的0.167 m³·m⁻³。这意味着,一方面,在温度比较低的情况下,土壤呼吸更容易受到水分的抑制;另一方面,在温度高的情况下,水分的改善能更加促进土壤呼吸。在全球变暖背景下,如果干旱和强降雨交替出现,可能导致土壤呼吸急剧增强,进一步加强温室效应。Borken 等认为^[19],土壤越干旱,因为土壤水分的改善而引起的土壤呼吸越强。在第2次强降雨前,土壤的容积含水量已经下降到了0.11~0.12 m³·m⁻³,但比第1次降雨前土壤容积含水量0.070~0.088 m³·m⁻³高。然而,第2次降雨后,土壤呼吸平均为5.41 μmol·m²·s⁻¹,比第1次降雨后3.71 μmol·m²·s⁻¹强,造成这种情况的原因显然不是因为土壤更干燥。第2次降雨前后温度比第1次高,这可能是第2次降雨后土壤呼吸比第1次降雨后强的主要原因。温度和水分共同影响土壤呼吸,当土壤水分亏缺时,水分补给会促进土壤呼吸,此时温度的升高会使这种促进作用加强。

3.2 降雨前后影响土壤呼吸的关键因子

为了阐释发生在不同时期的这3次强降雨(I、II、III)前后影响土壤呼吸的关键因子,对数据作了逐步回归分析。借此,从气温(X_1)、10cm地温(X_2)、20cm地温(X_3)、土壤容积含水量(X_4)等变量中挑选出和土壤呼吸(Y)相关性最大的变量,结果如表2。

在模型I中,变量 X_4 和 X_1 依次进入方程,两个进入模型的变量都和因变量显著正相关。表明在第一次降

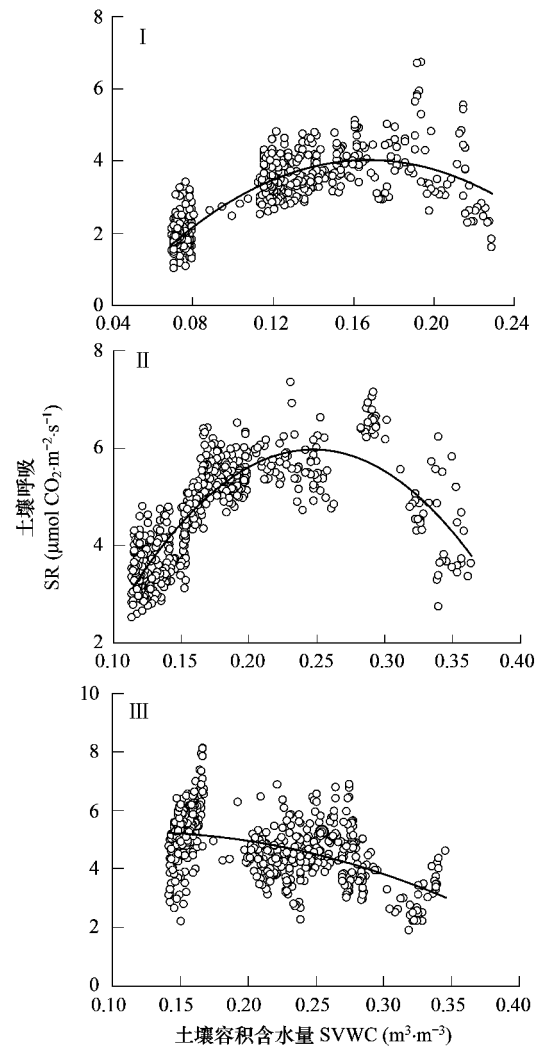


图4 3次降雨前后,土壤呼吸和土壤容积含水量之间的关系
Fig. 4 The relationships between the soil respiration (SR) and soil volume water content (SVWC) around the three rainfalls separately 第1次降雨(I),第2次降雨(II),第3次降雨(III); The first great rainfall (I), the second great rainfall (II), the third great rainfall (III).

雨前后,土壤容积含水量(X_4)与气温(X_1)都与土壤呼吸显著正相关;在模型Ⅱ中, X_4 、 X_1 进入方程,这表明在第2次降雨前后,土壤容积含水量(X_4)及气温(X_1)与土壤呼吸显著正相关。在方程Ⅰ和Ⅱ中, X_4 都先于 X_1 进入模型,所以,前两次强降雨前后,土壤容积含水量的变化超过气温及其他环境因子,对土壤呼吸影响最大。在模型Ⅲ中, X_1 和 X_4 依次进入方程,这表明气温和土壤容积含水量都与土壤呼吸显著相关,不过,与前两次强降雨不同的是,第3次降雨前后土壤容积含水量与土壤呼吸显著负相关。而且,气温先于土壤容积含水量进入方程,表明在水分充裕及过剩时气温对土壤呼吸的影响强于土壤容积含水量。

表2 3次降雨前后土壤呼吸的逐步回归模型

Table 2 Stepwise regression models of soil respiration corresponding to the three rainfall

序号 No.	模型 Model	复决定系数 R^2	显著性 Significance
Ⅰ	$Y = -0.118 + 17.415X_4 + 0.0657X_1$ $t_0 = -0.900 \quad t_4 = 25.693 \quad t_1 = 11.590$	0.579	0.0001
Ⅱ	$Y = 1.514 + 9.32X_4 + 0.073X_1$ $t_0 = 9.623 \quad t_4 = 16.787 \quad t_1 = 11.908$	0.466	0.0001
Ⅲ	$Y = 4.697 + 0.161X_1 - 7.553X_4$ $t_0 = 22.066 \quad t_1 = 12.088 \quad t_4 = -11.879$	0.372	0.0001

$P < 0.0001$ 表示方程极显著; $P < 0.0001$ indicates that the equation is significant

由表2可以看出, X_1 和 X_4 总是同时出现在每一个方程中。所以,温度和水分对土壤呼吸的影响是相互交叠在一起的,同时影响土壤呼吸,不能截然分开。在土壤水分相对亏缺时,水分的改变是影响土壤呼吸的关键因子,温度对土壤呼吸的影响处于相对次要的位置;在水分充裕时,温度是影响土壤呼吸的关键因子,水分的增加会抑制土壤呼吸,但其对土壤呼吸变化的影响处于相对次要的位置。

4 结论

强降雨促进土壤呼吸与否取决于降雨前后的土壤水分状态。干旱和土壤水分相对亏缺时的强降雨(图1、图2)总体上促进土壤呼吸,土壤呼吸在降雨结束后逐渐增强,约2~3d后逐渐达到高峰;土壤水分充足时的强降雨(图3),整体上抑制土壤呼吸,降雨结束后土壤呼吸水平比降雨前低,并且在降雨过程中有明显的呼吸低谷。

在土壤由干变湿或由土壤水分相对亏缺变化到土壤水分充裕的过程中,土壤容积含水量和土壤呼吸之间的关系可以用二次曲线表示,二次曲线拐点是促进与抑制作用的临界点;当土壤容积含水量介于临界点下时,土壤水分的增加促进土壤呼吸,当土壤容积含水量超过临界点时,土壤水分的进一步增加抑制土壤呼吸;土壤水分临界点随温度改变,温度升高,临界点相应升高。在土壤水分充裕的雨季,土壤容积含水量和土壤呼吸负相关,二者之间的关系也可以用二次曲线解释,但解释力下降,此时温度是影响土壤呼吸的关键因子。

温度和水分共同影响土壤呼吸。在土壤水分相对亏缺时,水分的增加是影响土壤呼吸的关键因子,温度的影响处于相对次要的位置;在水分充裕时,温度是影响土壤呼吸的关键因子,水分的增加会抑制土壤呼吸,但其对土壤呼吸变化的影响相对弱化。

References:

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7—20.
- [2] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: implications for rainfall rates and climate change. *Climatic Change*, 1998, 39(4): 667—694.
- [3] Trenberth K E. Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 327—339.
- [4] Groisman P Y, Karl T R, *et al.* Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 243—283.

- [5] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, *et al.* Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289:2068 — 2074.
- [6] Borken W, Davidson E A, Savage K, *et al.* Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67:1888 — 1896.
- [7] Liu X Z, Wan S Q, Su B *et al.* Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tall grass prairie ecosystem. *Plant and Soil*, 2002, 240(2):213 — 223.
- [8] Lee X H, Wu H J, Sigler J, *et al.* Rapid and transient response of soil respiration to rain. *Global Change Biology*, 2004, 10(6):1017 — 1026.
- [9] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, *et al.* Effects of rainfall events on CO₂ flux in a cool temperature deciduous broad-leaved forest. *Ecological Research*, 2002, 17:401 — 409.
- [10] Zhang H X, Wang X K, Feng Z W, *et al.* Multi-channel automated chamber system for continuously monitoring CO₂ exchange between agroecosystem and the atmosphere. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4):1273 — 1282.
- [11] Reicosky D C. Canopy gas-exchange in the field: closed chambers. *Remote Sensing Reviews*, 1990, 5(1):163 — 177.
- [12] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4(2):217 — 227.
- [13] Borken W, Xu Y J, Brummer R, *et al.* A climate change scenario for carbon dioxide and dissolved organic carbon fluxes from a temperate forest soil: Drought and rewetting effects. *Soil Science Society America Journal*, 1999, 63:1848 — 1855.
- [14] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):53 — 69.
- [15] Rochette P, Desjardins R L, Pattey E. Spatial and temporal variability of soil respiration in agriculture fields. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71:189 — 196.
- [16] Austin A T, Yahdjian M L, Stark J M, *et al.* Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141:254 — 268, DOI10.1007/s00442-004-1519-1.
- [17] Ball B C, Albert S, Jone P 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.
- [18] 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.
- [19] Borken W, Xu Y J, Davidson E A, *et al.* Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 2002, 8(12):1205 — 1216.

参考文献:

- [10] 张红星,王效科,冯宗炜,等. 用于测定陆地生态系统与大气间 CO₂ 交换量的多通道全自动通量箱系统. *生态学报*, 2007, 27(4):1273 ~ 1282.