

# 水分对苹果园土壤呼吸季节性与年际变化的影响

高胜<sup>1</sup>, 王蕊<sup>1</sup>, Salman Ali<sup>2</sup>, 郭胜利<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 了解果园土壤呼吸的季节和年际变化及其影响因素, 为退耕还果条件下黄土高原地区土壤碳源汇功能变化研究提供依据。[方法] 在长武农田生态系统国家野外站, 以盛产期果园为对象, 利用土壤碳通量监测系统 (Li-COR, Lincoln, NE, USA) 连续 3 a 原位监测了土壤呼吸、土壤水分和温度变化, 分析了土壤呼吸的季节性和年际间的变化及其与水分、温度变化之间的关系。[结果] 土壤呼吸具有明显的季节和年际变异特征: 最高值出现在雨季(7—9 月), 3 a 分别为 3.14, 3.98, 4.71  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 最低值出现在 11 月后, 3 a 依次为 0.99, 0.88, 0.69  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 年际间累积呼吸量变异约 21%。土壤呼吸与温度呈显著指数关系, 而不同水分状况下土壤呼吸及温度敏感性( $Q_{10}$ )不同, 当土壤水分含量 < 11.12% 时, 土壤呼吸为 2.01  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 当土壤含水量变化于 11.12%~23.63% 之间时, 土壤呼吸为 2.24  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 当土壤含水量 > 23.63% 时, 土壤呼吸则为 1.38  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 相应地不同水分条件下  $Q_{10}$  值分别为 1.57, 1.63 和 1.38。[结论] 土壤水分显著影响黄土区苹果园土壤呼吸和  $Q_{10}$ , 研究结果为黄土区果园生态系统碳汇功能的估算提供了依据。

**关键词:** 苹果园; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤水分; 温度敏感性  $Q_{10}$

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2019)05-0060-07

**中图分类号:** S154.1

**文献参数:** 高胜, 王蕊, Salman Ali, 等. 水分对苹果园土壤呼吸季节性与年际变化的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 60-66. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.009; Gao Sheng, Wang Rui, Salman Ali, et al. Impact of soil moisture on seasonal and annual variations in soil respiration in an apple orchard on Loess Plateau region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 60-66.

## Impact of Soil Moisture on Seasonal and Annual Variations in Soil Respiration in an Apple Orchard on Loess Plateau Region

Gao Sheng<sup>1</sup>, Wang Rui<sup>1</sup>, Salman Ali<sup>2</sup>, Guo Shengli<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] Identifying the variations in soil respiration and its influencing factors, to provide the basis for evaluating the carbon sequestration resulting from converting cropland to apple orchards on the Loess Plateau. [Methods] A field experiment was conducted in a mature apple orchard at the Changwu State Key Agro-Ecological Station, Shaanxi, China. Soil respiration, soil temperature, and soil moisture ( $\theta$ ) were periodically measured in situ for three years by an automated soil  $\text{CO}_2$  flux system (Li-COR, Lincoln, NE, USA). [Results] Soil respiration exhibited very significant seasonal and annual variations. The highest values for soil respiration were 3.14, 3.98, and 4.71  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , which appeared during the rainy season (July to September); the lowest soil respiration value appeared in November, at 0.99, 0.88, and 0.69  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  for three years; and the coefficient of variation for the cumulative soil respiration was 21%. Soil respiration and soil temperature followed an exponential relationship, and the soil moisture significantly influenced the soil respiration and temperature sensitivity of soil respiration( $Q_{10}$ ) values. Soil respiration was 2.01  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  when  $\theta < 11.12\%$ , while it increased to 2.24  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  when  $\theta$  ranged from 11.12% to 23.63%, and decreased to 1.38  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  when  $\theta > 23.63\%$ . The  $Q_{10}$  value was 1.57, 1.63, and 1.38 when  $\theta < 11.12\%$ ,  $11.12\% < \theta < 23.63\%$ ,  $\theta > 23.63\%$  at the apple orchard. [Conclusions] Soil moisture significantly influences soil respiration and  $Q_{10}$ . This study is useful for

收稿日期: 2019-05-08

修回日期: 2019-05-28

资助项目: 中国博士后科学基金面上项目“不同粒径团聚体中微生物变化及其对土壤呼吸的影响(2018M643755)”; 国家自然科学基金面上项目“黄土区植被恢复过程中根系对深层土壤活性有机碳的影响”(41071338)

第一作者: 高胜(1996—), 男(汉族), 山西省闻喜县人, 硕士研究生, 研究方向为土壤碳循环过程。E-mail: 1224406842@qq.com。

通讯作者: 郭胜利(1969—), 男(汉族), 河北省栾城县人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与碳循环过程研究。E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn。

estimating the soil carbon sequestration in orchard ecosystems on the semi-arid Loess Plateau.

**Keywords:** apple orchard; soil respiration; soil temperature; soil moisture; temperature sensitivity of soil respiration( $Q_{10}$ )

大气  $\text{CO}_2$  浓度升高引起的温室效应是全球变暖的重要原因之一<sup>[1-4]</sup>。全球尺度上,陆地生态系统是仅次于海洋释放  $\text{CO}_2$  的第二大生态系统<sup>[5]</sup>,土壤呼吸微小变化会对大气  $\text{CO}_2$  浓度造成显著影响<sup>[4]</sup>,同时土壤呼吸也是调控陆地生态系统碳循环的重要生态过程<sup>[6]</sup>。因此,监测土壤呼吸的动态变化,对于研究碳循环以及预测全球气候变化趋势有非常重要的意义。

温度和水分是影响土壤呼吸的重要环境因素<sup>[6-8]</sup>,水热因子对土壤呼吸作用机理是准确地评估土壤碳循环过程的关键环节之一<sup>[9]</sup>。已有研究表明,温度在很大程度上可以解释土壤呼吸的季节变化<sup>[10-13]</sup>,而水分对土壤呼吸的影响尚未取得共识<sup>[8, 14-18]</sup>;有研究表明水分促进土壤呼吸作用<sup>[8, 14]</sup>,也有研究表明水分抑制土壤呼吸作用<sup>[15-16]</sup>或者无明显影响<sup>[17-18]</sup>。王凤玉等<sup>[9]</sup>对内蒙古草地水分与土壤呼吸的定量研究中发现土壤水分含量不同时,影响和决定土壤呼吸的机制也会发生变化。

在黄土高原地区,种植果园既是当地居民脱贫致富的重要途径,也是坡地治理水土流失的重要措施。1980年以来苹果树种植面积逐年增加,至2009年,黄土区苹果园面积已达到  $1.00 \times 10^6 \text{ hm}^2$  多,已成为黄土区支柱性产业<sup>[19]</sup>。果园土壤有机碳库的动态变化与区域果业的持续发展密切相关,而土壤呼吸变化是影响土壤有机碳库的重要过程。与黄土区农田和林草生态系统相比,果园土壤呼吸变化及其影响因素报道较少<sup>[20-21]</sup>。研究水分对旱地苹果园土壤呼吸季节性与年际变化的影响是理解黄土区土壤有机碳库动态变化的基础。基于此,本研究选取黄土高原旱塬区典型盛果期果园,通过原位监测土壤呼吸速率,分析土壤呼吸季节性和年际性变化特征,讨论不同水分状态下温度对果园土壤呼吸的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验地位于陕西省长武县(东经  $107^\circ 40'$ ,北纬  $35^\circ 12'$ ),属于典型的黄土高原沟壑区,海拔 1 200 m,为大陆性季风气候。1984—2012年期间,年平均降水量为 576 mm,其中最高年份为 954 mm,最低年份为 296 mm,7—9月份降水量约占全年总降水量的 49%,年平均蒸发量为 1 565 mm。年平均气温为  $9.4^\circ\text{C}$ ,大于等于  $10^\circ\text{C}$  积温为  $3\ 029^\circ\text{C}$ ,年日照时数为 2 230 h,日照率为 51%,年辐射总量为  $484 \text{ kJ/m}^2$ 。地带性土壤为黏壤质黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,

土层深厚,土质疏松。土壤肥力指标为:有机碳 6.50 g/kg,全氮 0.62 g/kg,碱解氮 37.0 mg/kg,速效磷 3.0 g/kg,速效钾 129.3 mg/kg。

### 1.2 试验设计

供试果园面积为  $2\ 000 \text{ m}^2$ (建于 2000 年),主要品种为红富士(*Malus pumila*),多年平均产量为  $4\ 000 \text{ kg/hm}$ ,冠幅  $3.2 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ ,茎粗约为 15 cm。为增加监测点的代表性,将果园沿对角线三等分,各区段内选取 1 棵长势良好且无病虫害果树,间距约为 50 m,共计 3 棵。以树主干为中心,沿三等分圆半径方向取 0.5,1,2 m 3 点,每株果树设置 9 个监测点,共计 27 个(如图 1 所示)。各监测点上安装 PVC 管( $d \times h = 20 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ ),PVC 管高出地面 2 cm,用于测定土壤呼吸速率<sup>[22]</sup>。

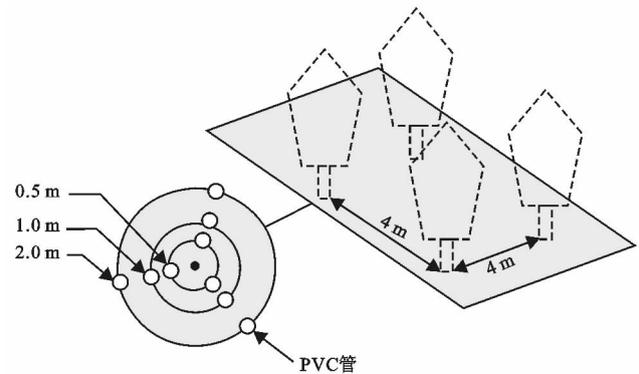


图 1 苹果园 PVC 管设置示意图

### 1.3 土壤呼吸、水分及温度的测定

土壤呼吸速率测定采用便携式土壤碳通量测量系统 LI-8100(LI-COR, Lincoln, NE, USA)。土壤温度测定利用 LI-8100 自带的土壤温度计。土壤水分的测量采用烘干法,利用直径为 1 cm 土钻采集 0—5 cm 土层土壤样品,重复 3 次,混合均匀后采用四分法留取适量样品,其余样品回填。于 2011 年 3 月至 2013 年 11 月(除 12, 1, 2 月),选择晴朗天气在 09:00—11:00 进行土壤呼吸速率、土壤温度及水分的测定<sup>[22]</sup>。3 a 试验期间共计测量 57 次,其中 2011 年测量 19 次,2012 年测量 22 次,2013 年测定 16 次。

### 1.4 数据处理与统计分析

利用 Sigmpilot 软件制作相关的基础图件。采用 SAS(SAS 9.1, SAS Institute)软件中非均衡数据方差分析(Proc GLM 程序包)分别进行土壤呼吸、土壤温度、土壤水分、土壤累积呼吸量的方差分析。在评价环境因子对土壤呼吸的影响时,利用指数关系( $y = ae^{bx}$ )模拟土壤呼吸与土壤温度的关系,用一元

二次方程( $y=ax^2+bx+c$ )模拟土壤呼吸与土壤水分的关系,利用线性内插法推算不同年际间的累积土壤呼吸量( $\text{g}/\text{m}^2$ )(以  $\text{CO}_2\text{-C}$  计)<sup>[23]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤温度与水分

受大陆性季风气候影响,研究区降水和气温呈现

明显的季节变动格局。2011 降水量高于近 30 a 年均降水量,2012 年和 2013 年低于年均降水量(图 2a)。3 a 试验期间降水总量依次为 624,469,520 mm,其中雨季降水量分别占到 62.2%(388 mm),65.0%(305 mm),75.4%(392 mm)。有效降水( $>5$  mm)2011 年 44 次,2012 年 25 次,2013 年 24 次,雨季分别为 25,15,15 次。

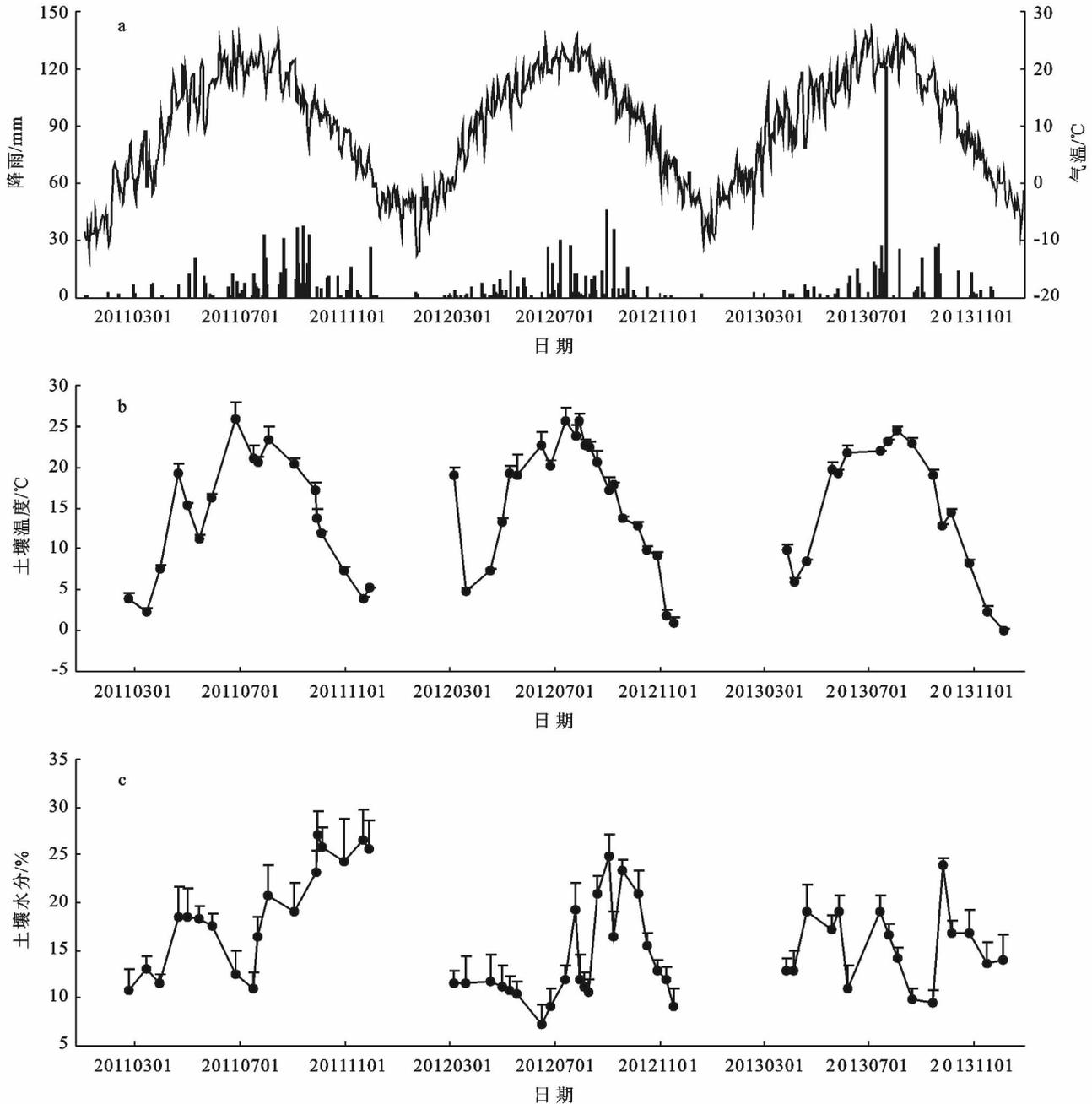


图 2 2011—2013 年黄土区苹果园降雨、气温、土壤温度和土壤水分的季节性变化

土壤温度呈现显著季节变异性(图 2b):地表 5 cm 处温度在春季逐渐增加,夏季达到最高值,秋季逐渐降低:2011 至 2013 这 3 a 最高值均出现在 7 月(25.86 °C,25.73 °C 和 24.58 °C),最低值出现在 11

月(3.87 °C,1.97 °C,2.41 °C)。试验期间年均土壤温度差异不大( $p<0.01$ ),分别为 14.28 °C(2011),15.95 °C(2012),15.65 °C(2013)。0—5 cm 土壤水分受降雨量及降雨频率的影响波动较为剧烈:2011

年变动范围为 10.95%~27.15%,2012 年波动于 7.24%~24.80%,2013 年处于 9.41%~23.92%。3 a 间年平均土壤水分:2011 年(19.41)>2013 年(15.39)>2012 年(13.84),与年降水总量趋势相一致(图 2c)。

## 2.2 土壤呼吸速率的季节性与年际变化

如图 2—3 所示,果园土壤呼吸速率随季节变化波动。雨季前(3—6 月),土壤温度逐渐回升,但受土壤干旱影响,土壤呼吸较低。2011 年为  $2.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,2012 年为  $1.82 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,2013 年  $2.68 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。雨季(7—9 月),土壤呼吸速率随降水波动,2011 年平均为  $2.30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,2012 年  $2.45 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,2013 年  $3.21 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,均高于雨季前。但是雨水较多时,土壤呼吸会

因土壤温度的降低或者水分过饱和而有所降低。雨季后(10 月后),随着土壤温度下降,土壤呼吸呈现快速降低趋势:2011 年土壤呼吸年平均速率为  $1.30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,2012 年为  $1.52 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,2013 年为  $2.25 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

此外,土壤呼吸速率存在显著年际差异。2011 年土壤呼吸速率于  $0.97 \sim 3.14 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之间波动,平均为  $1.80 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;2012 年均值为  $2.01 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  [ $0.89 \sim 3.98 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];2013 年变化于  $0.69 \sim 4 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,均值为  $2.81 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。依据观测期内所测定的数据对土壤  $\text{CO}_2$  累积量进行估算,与年土壤呼吸平均值表现出一致的变化规律:2013 年最高值( $772 \text{ g}/\text{m}^2$ ),2012 年最低值( $525 \text{ g}/\text{m}^2$ )(见图 4)。

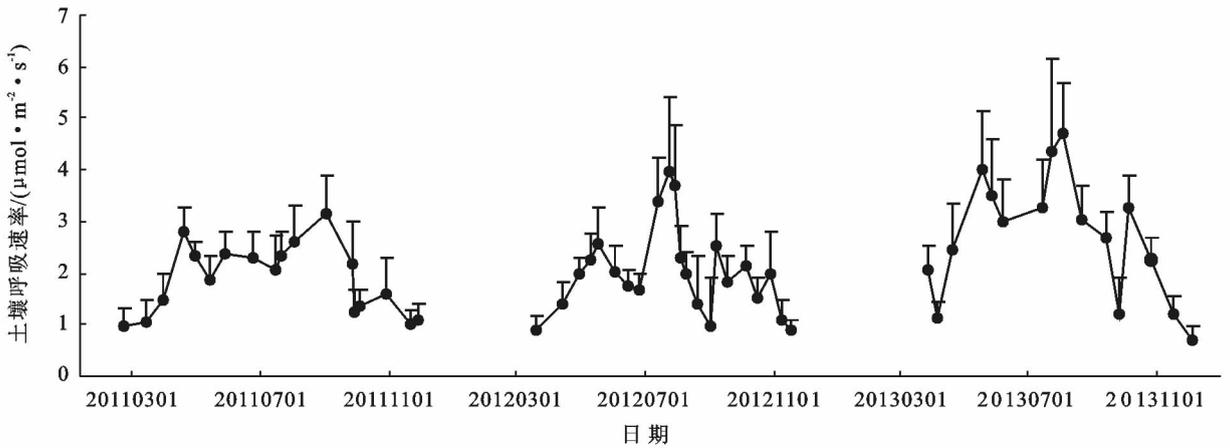


图 3 2011—2013 年土壤呼吸的季节性变化

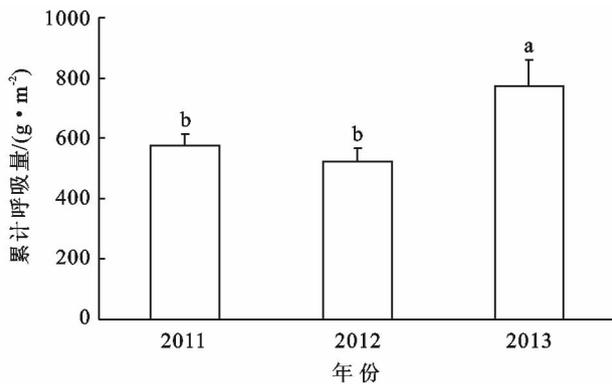


图 4 土壤累积呼吸量

## 2.3 土壤呼吸速率与土壤温度、水分的关系

3 a 试验期间(2011—2013),土壤呼吸速率与 5 cm 处土壤温度呈现明显的指数相关性( $p < 0.01$ ),土壤温度的变化最高可表达土壤呼吸变异性的 83%(2011),最低为 54%(2012);表征土壤呼吸温度敏感性的  $Q_{10}$  值 3 a 分别为 1.67(2011),1.51(2012)和

1.82(2013),变异系数为 9.30%(图 5)。土壤呼吸速率与土壤水分的相关分析显示,土壤呼吸与土壤水分呈负线性相关关系,但仅可以表达土壤呼吸速率的 23%~62%的变异性(图 5)。

进一步对观测期内全部土壤呼吸与水分测定数据进行偏相关分析,并对土壤水分和土壤呼吸速率与水分的偏相关系数进行二次函数拟合<sup>[9]</sup>,拟合函数如下:

$$P_{R_s} = -0.080x^2 + 0.278x - 2.102 \quad (1)$$

式中:  $P_{R_s}$ ——偏相关系数;  $x$ ——土壤水分含量(%)。

对函数(1)进行求解,得出偏相关系数为零时所对应的水分为 11.12%和 23.63%(图 6)。以 11.12%和 23.63%为分界点探讨水分差异对土壤呼吸速率及其对温度的响应,结果显示土壤含水量处于 11.12%~23.63%之间时土壤呼吸速率最大为  $2.24 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,较低水分条件( $< 11.12\%$ )和高水分条件( $>$

23.63%)分别提高了 11%和 70%(图 7);3 种不同水分状态(<11.12%, 11.12%~23.63%, >23.63%)下,

温度的变化分别可以表达土壤呼吸变异性的 72%, 75%和 44%(图 8)。

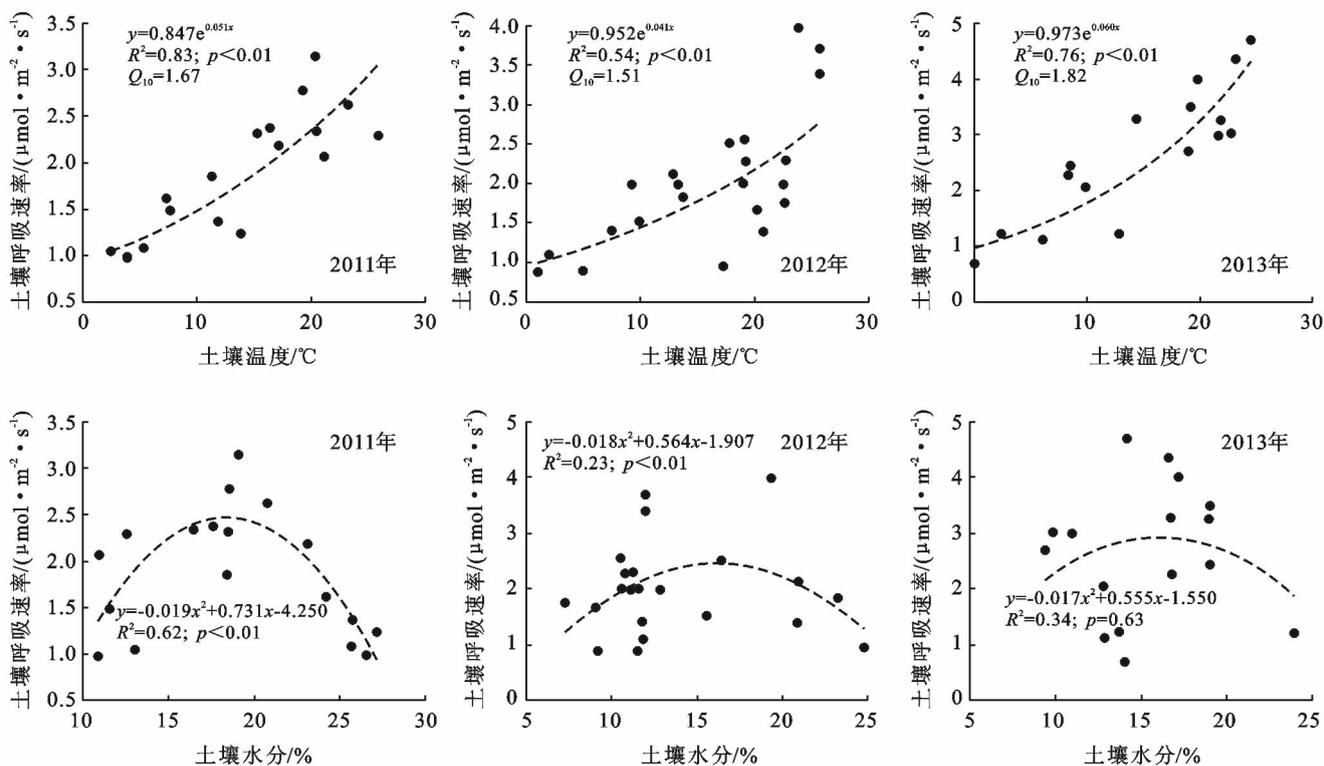


图 5 土壤呼吸与温度、水分的关系

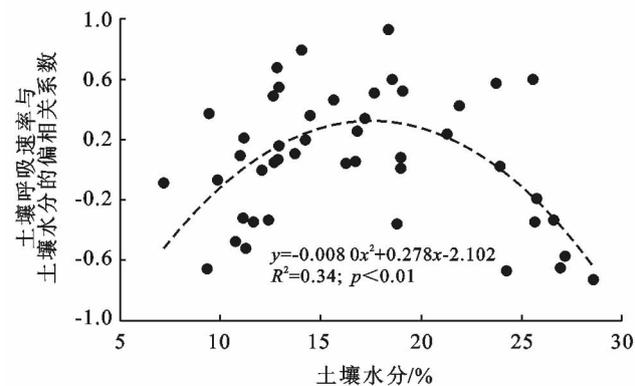


图 6 土壤呼吸与土壤含水量的偏相关系数

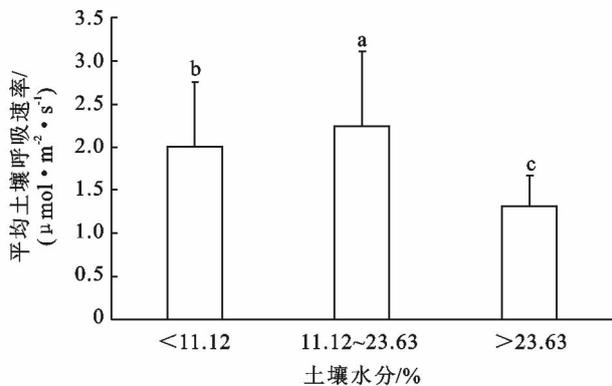


图 7 不同水分状况下平均土壤呼吸速率

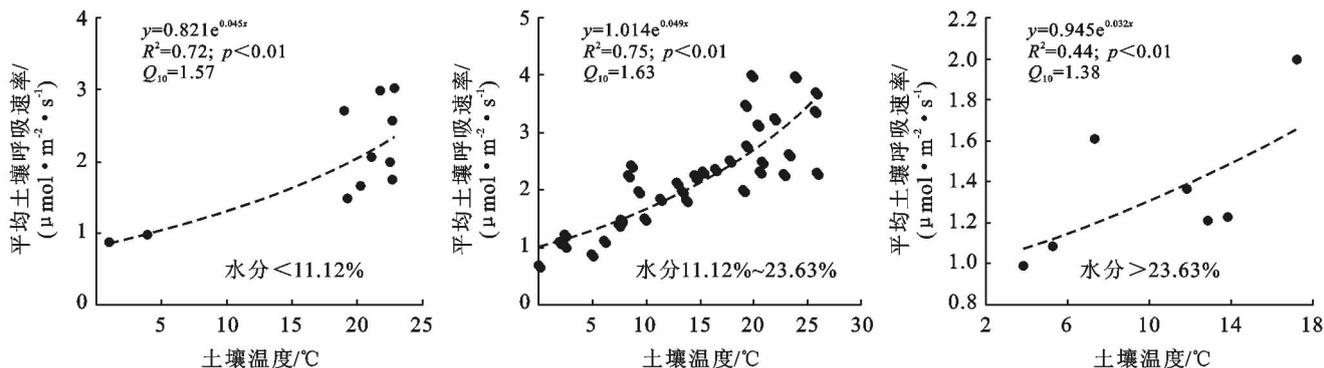


图 8 不同水分状况下土壤呼吸随温度的变化

### 3 讨论

#### 3.1 水分对土壤呼吸及温度敏感性的影响

土壤水分是影响土壤呼吸的重要因素,尤其是在受季风气候影响的干旱半干旱区。但是受到温度等其他因素影响,水分对土壤呼吸的影响较为复杂。本研究中,土壤呼吸速率与土壤水分的相关性较差,图5明显表明水分对土壤呼吸的影响程度不同( $R^2$ 为23%~62%),其原因可能是雨季与非雨季下频繁的干湿交替现象影响微生物活动。图7显示水分升高条件下土壤呼吸降低,这可能与以下因素有关:①土壤中氧气含量及扩散性能降低;②植物根系活动和微生物的活动受到抑制。且土壤水分在11.12%~23.63%时,土壤呼吸速率较高。此结论与王凤玉等<sup>[9]</sup>对内蒙古区草地土壤呼吸的研究结论(7.5%~18.4%)略有不同,可能与气候及植物本身的性状差异有关;也与张芳等<sup>[20]</sup>在该地区对夏闲期小麦研究时所定临界值(18%)不同,主要因为苹果树吸水根下扎消耗深层水分。

现阶段研究表明土壤水分含量不同时,土壤呼吸机制发生变化<sup>[24]</sup>,进而引起 $Q_{10}$ 值的变化<sup>[3]</sup>。目前,关于水分对 $Q_{10}$ 值的影响尚未统一:部分研究指出 $Q_{10}$ 值随着水分的升高逐渐增强<sup>[8,14]</sup>,但有研究显示 $Q_{10}$ 值随水分的减少呈降低趋势<sup>[15-16]</sup>,也有水分对 $Q_{10}$ 值无明显影响的结论<sup>[17-18]</sup>。本研究 $Q_{10}$ 值呈现先增加然后降低的趋势,土壤呼吸适宜含水量(11.12%~23.63%)时 $Q_{10}$ 值最大(1.63),分别比<11.12%与>23.63%时提高4%和18%。这可能是由于低水分条件下,底物的有效性受水分干旱胁迫的影响,而土壤水分升高时 $Q_{10}$ 降低,这可能是因为高水分条件导致氧气受阻所致。这与陈全胜等<sup>[3]</sup>所认为的 $Q_{10}$ 值随水分含量升高呈上升趋势的结论略有不同。此外,有研究表明土壤呼吸在含水量低时会缓慢甚至停滞<sup>[2,25]</sup>,但本文对果园土壤呼吸速率及 $Q_{10}$ 值研究时并未发现这种现象,这可能与果树根系下扎较深受表层土壤水分影响较小有关,也可能是11.12%并未达到苹果树凋萎含水量的下限。

#### 3.2 气温及降水对土壤呼吸累积量年际变化的影响

图5表明土壤呼吸累积量年际间变异系数达到21%。3a观测期内的平均气温差异不大,但年降水量及雨季降水量存在显著年际差异:年降水量依次为624,469,519 mm;雨季降水量分别为388,305,392 mm。观测期内,年际间土壤呼吸累积量的变化(图4)与年降水量变化不一致。通过进一步对不同时期降水对土壤呼吸累积量的分析,发现雨季降水量

不仅与雨季土壤呼吸累积量规律一致,而且和整个观测期间内的土壤累积呼吸量规律相一致(雨季土壤呼吸累积量为244,221,308 g/m<sup>2</sup>)。由此说明土壤呼吸累积量与年降水量,尤其是雨季降水量的年际变化有关。但是降水对土壤呼吸的影响结果也因时因地而异:在湿润季节或地区,降水时间对土壤呼吸可能会产生明显的抑制作用;而在干旱季节或地区,降水时间可能会强烈地激发土壤呼吸<sup>[24]</sup>。降水过程及随后的水分下渗,土壤的通透性、土壤溶液中的可溶性有机物浓度等理化性质都会发生改变;降水强度、频率都会对土壤呼吸产生影响<sup>[9]</sup>,其具体影响机理有待进一步深入研究。

### 4 结论

黄土区盛果期苹果园土壤呼吸速率平均值3.94  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,年均积累量为624 g/m<sup>2</sup>。因年际降水波动,累积呼吸量年际变异达到21%。水分是影响黄土高原果园土壤呼吸速率及其温度敏感性的重要因素。土壤水分含量<11.12%时,果园土壤呼吸速率为2.01  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,11.12%~23.63%之间时土壤呼吸速率则为2.24  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,土壤水分含量>23.63%时为1.38  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;相应地, $Q_{10}$ 值分别为1.57,1.63和1.38。土壤水分显著影响黄土区苹果园土壤呼吸,研究结果可以作为黄土区果园生态系统碳汇功能估算的依据。

**致谢:**陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站对本研究给予了大力支持。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 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[J].生态学报,1997,17(5):469-476.
- [2] 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.
- [3] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等.典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系[J].生态学报,2004,24(4):831-836.
- [4] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: Implications for climate change[J]. Biogeochemistry, 2000,48(1):1-6.
- [5] Borken W, Xu Yijun, Davidson E A, et al. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests [J]. Global Change Biology, 2002,8(12):1205-1216.
- [6] Luo Ji, Chen Youchao, Wu Yanhong, et al. Temporal-

- spatial variation and controls of soil respiration in different primary succession stages on glacier forehead in Gongga mountain, China[J]. *PLoS One*, 2012, 7(8): e42354. DOI:10.1371/journal.pone.0042354.
- [7] Yuste J C, Janssens I A, Carrara A, et al. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest[J]. *Tree Physiology*, 2003, 23(18):1263-1270.
- [8] Davidson E C 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[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [9] 王凤玉, 周广胜, 贾丙瑞, 等. 水热因子对退化草原羊草恢复演替群落土壤呼吸的影响[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(5):644-649.
- [10] Yan M, Zhang X, Zhou G, et al. Temporal and spatial variation in soil respiration of poplar plantations at different developmental stages in Xinjiang, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(1):51-57.
- [11] Ceccon C, Panzacchi P, Scandellari F, et al. Spatial and temporal effects of soil temperature and moisture and the relation to fine root density on root and soil respiration in a mature apple orchard[J]. *Plant and Soil*, 2011, 342(1/2):195-206.
- [12] Lee M S, Mo Wenhong, Koizumi H. Soil respiration of forest ecosystems in Japan and global implications [J]. *Ecological Research*, 2006, 21(6):828-839.
- [13] Khomik M, Arain M A, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/2/3/4):244-256.
- [14] Gulledge J, Schimel J P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska[J]. *Ecosystems*, 2000, 3(3): 269-282.
- [15] Parker L W, Miller J, Steinberger Y, et al. Soil respiration in a chihuahuan desert rangeland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, 15(3):303-309.
- [16] Dörr H, Münnich K O. Annual variation in soil respiration in selected areas of the temperate zone[J]. *Tellus B*, 1987, 39B(1/2):114-121.
- [17] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2):155-165.
- [18] Luo Yiqi, Wan Shiqiang, Hui Dafeng, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413(6856):622-625.
- [19] 李泽, 郭胜利, 张芳, 等. 退耕还果对黄土高原沟壑区坡地土壤和植被碳、氮储量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4):919-924.
- [20] 张芳, 邹俊亮, 李泽, 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.
- [21] 周小刚, 张彦军, 南雅芳, 等. 黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素[J]. *环境科学*, 2013, 34(3):1026-1033.
- [22] 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 等. 苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(5): 1915-1921.
- [23] Wilson H M, Al-Kaisi M M. Crop rotation and nitrogen fertilization effect on soil CO<sub>2</sub> emissions in central Iowa[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(3):264-270.
- [24] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*, 2003, 23(5):972-978.
- [25] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri[J]. *Ecology*, 1971, 52(5): 912-915.

(上接第 59 页)

- [8] 夏振尧, 刘琦, 许文年, 等. 多花木蓝根系与土体界面摩擦阻特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1):128-134.
- [9] 程磊, 姚磊华, 张生旭, 等. 根系形态对土体强度影响的试验研究[J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(1):40-49.
- [10] 杨永红, 王成华, 刘淑珍, 等. 不同植被类型根系提高浅层滑坡土体抗剪强度的试验研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(2):233-235.
- [11] 张兴玲, 胡夏嵩. 青藏高原东北部黄土区草本植物根系加筋土的抗剪特性[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(4): 185-188.
- [12] 中华人民共和国水利部: 中华人民共和国国家标准: 土工实验方法标准 GB/T50123-1999 [M]. 北京: 中国计划出版社, 1999.