

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应

赵慢¹ 王蕊¹ 李如剑³ 杜兰兰³ 吴得峰¹ 孙棋棋² 高鑫³ 郭胜利^{1,2,3*}

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所 杨凌 712100)

摘要: 了解土壤微生物呼吸对极端降水的响应对深入理解全球变暖趋势下降水格局的改变对土壤碳循环的影响具有重要意义。于 2015 年雨季 (7~9 月) 在长武农田生态系统国家野外站 模拟了 3 种雨季降水量 (最高 600 mm; 平均 300 mm; 最低 150 mm) 条件下两种降水形式 (每次 10 mm: P_{10} , 每次 150 mm: P_{150})。利用土壤碳通量测量系统 (Li-COR, Lincoln, NE, USA) 监测不同降水条件下土壤微生物呼吸速率及其土壤水分、温度的变化。相同次降水量条件下, 土壤微生物呼吸波动因雨季降水量变化而不同。 P_{150} 较 P_{10} 波动剧烈, 600 mm 降水量下土壤微生物呼吸变异系数分别为 36% 和 33%; 300 mm 降水量下为 28% 和 22%, 150 mm 降水量下依次为 43% 和 29%。与 P_{10} 相比, P_{150} 土壤微生物呼吸累积量在 600 mm 降水量下降低 20%; 但 150 mm 降水量下增加 22%, 300 mm 降水量下二者无显著差异。土壤累积呼吸量与水分胁迫时间长短呈显著负相关 ($R^2 = 0.75$)。全球变暖趋势下极端性降水事件增加对土壤微生物呼吸的影响不容忽视。

关键词: 极端降水; 降水形式; 土壤微生物呼吸; 土壤水分; 水分胁迫

中图分类号: X144; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2714-07 DOI: 10.13227/j.hjx.2016.07.039

Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions

ZHAO Man¹, WANG Rui¹, LI Ru-jian³, DU Lan-lan³, WU De-feng¹, SUN Qi-qi², GAO Xin³, GUO Sheng-li^{1,2,3*}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Evaluating the response of soil microbial respiration to extreme precipitation event is significant for a better understanding about the influence of the change of precipitation regime on soil carbon cycling under global warming. A simulated experiment of extreme precipitations was conducted during the rainy season (July–September 2015) in the Changwu State Key Agro–Ecological Station, Shaanxi, China. The treatments consisted of three total precipitations in rainy season (600 mm, 300 mm, and 150 mm) and two precipitation regimes (10 mm, 150 mm; P_{10} , P_{150}). Soil microbial respiration varied differently in the same single rainfall event among three precipitations. The variation coefficient of soil microbial respiration under 600 mm total precipitation was 36% (P_{150}) and 33% (P_{10}), and 28% and 22% under 300 mm total precipitation, 43% and 29% under 150 mm total precipitation. Under 600 mm total precipitation, the cumulative soil microbial respiration under P_{150} was 20% less than that under P_{10} ; however, the cumulative soil respiration of P_{150} under 150 mm total precipitation was 22% more than that under P_{10} ; and there was no significant difference between P_{10} and P_{150} under 300 mm total precipitation. Therefore, the duration in soil water stress must be considered to estimate soil microbial respirations under extreme precipitations.

Key words: extreme precipitation; precipitation regime; soil microbial respiration; soil moisture; water stress

全球变暖将会引起降水格局的改变,尤其是极端降水事件的增多^[1~4]。伴随极端降水的增加,全球范围内周期性干旱将更为频繁,降水的时空分布发生明显变化,这势必会影响生态系统碳循环^[5]。陆地表面三分之一以上为干旱半干旱生态系统,而降水是调节该地区水分和碳平衡的关键因素^[5]。因此,了解干旱半干旱地区土壤微生物呼吸对极端降水的响应程度及过程,有助于深入了解气候变化对此区域全球碳循环的影响。

土壤微生物呼吸对降水的响应过程复杂^[6],降水量和降水频率变化都会对土壤的通气状况^[7]、呼

吸底物的组成和有效性^[8~10]、土壤微生物的活性^[11]产生影响。但至今降水对土壤微生物呼吸影响的研究结果不一。湿润生态系统中小频率高强度的降水事件会导致生长期内的土壤微生物呼吸降低^[12,13]; 干旱生态系统中降水变异性的增加会促进土壤微生物呼吸^[14,15]; 也有研究表明土壤微生物呼吸对降水变化响应不明显^[16]。目前,多数研究

收稿日期: 2015-12-14; 修订日期: 2016-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371279)

作者简介: 赵慢(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤碳循环及生态环境, E-mail: zhaomanxbl@126.com

* 通讯联系人, E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

集中于降水量的增减对土壤微生物呼吸的影响,而土壤微生物呼吸对极端降水事件的响应程度及过程的研究较少。

钱维宏等^[17]利用多年平均逐日降水资料研究指出,我国极端强降水有增多的趋势。有研究显示,西北地区降水量和极端降水事件发生概率均会增加^[18-20]。西北地区是我国主要的雨养旱作农业区,降水是该地区土壤水分的唯一来源,农业生产更容易受到极端降水的影响^[21]。因此,了解土壤微生物呼吸对极端降水的响应有助于深入理解该区域土壤碳循环的机制。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015 年 7~9 月在中国科学院长武农业生态试验站(长武站)的干旱棚下进行,该站位于陕西省长武县(35°12'N, 107°40'E; 海拔 1 220 m),属暖温带半湿润大陆性季风气候,1981~2014 年间年均降水量为 584 mm,其中最高年份为 954 mm,最低年份为 296 mm,7~9 月降水量占年总量的 49% 左右,年平均蒸发量为 1 565 mm。年平均气温 9.1℃,大于等于 10℃ 积温为 3 029℃,年日照时数为 2 230 h,日照率为 51%,年辐射总量为 484 kJ·cm⁻²,无霜期 171 d。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。土壤容重为 1.3 g·cm⁻³,土壤田间持水量 27.3%~30.9% (文中提到的含水量均为体积含水量),凋萎含水量 11.7%~15.6%。土壤肥力指标为:有机碳 6.64 g·kg⁻¹,全氮 0.62 g·kg⁻¹,碱解氮 37.0 mg·kg⁻¹,速效磷 3.0 g·kg⁻¹,速效钾 129.3 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

根据长武站气象资料统计,1957~2014 年间 7~9 月降水量平均 313 mm,最高为 608 mm,最低为 140 mm,单次最大降水量为 120.7 mm。另外,该地区降雨多集中在 5~10 mm,且在月尺度上整体分布均匀。基于此,试验设置 3 个降水量:600、300、150 mm,设置最大单次降水量 150 mm,并设置单次降水量 10 mm 作为对照,将总降水量按照单次降水量在 30 d 内通过控制相同降雨间隔均匀分配,依据基座内外圈面积比(2:3)分别量取对应的水量,倒于喷壶中均匀喷洒。供试土壤取自休闲季小麦耕作层(0~20 cm),自然风干后,去除植物残体和根系,过 2 mm 筛,统一调整初始含水量为 12%,分层装于花

盆(口径 32 cm,高 25 cm)中,统一控制容重在 1.3 g·cm⁻³,即每盆装土质量 16 kg、土面直径 28 cm、土层高度 20 cm,填装下一层土壤之前将表土打毛,以消除两层土壤之间的垂直层理。为保证更接近于田间温度情况,盆栽埋于试验站干旱棚地下。花盆中安装外径 20 cm,高 12 cm 的 PVC 管,PVC 管露出地面 2 cm,用于测定土壤微生物呼吸速率。

1.3 试验方法

待各处理土壤微生物呼吸速率无显著差异后,按照不同单次降水量加水。模拟降水采用喷壶喷洒的方式,选用 250 mL 和 2 L 规格的喷壶;喷洒时间选择蒸发量较小的 19:00,对于 600 mm 总降水量,10 mm 单次降水量每天喷洒两次,时间点分别为 19:00 和 07:00。土壤微生物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) 连续测定 32 d,测定时间为上午 09:00~11:00,这个时间段土壤 CO₂ 通量能够代表全天的平均值^[22],每个基座上连续测定两次取均值,两次测定值[单位为 μmol·(m²·s)⁻¹]差值控制在 ±0.3 之内。采用数字显示温度计 (Li-Corthermocouple probe) 测定土壤 5 cm 处温度,便携式水分仪 (Theta Probe ML2X with an HH2 moisture meter Delta-T Devices, Cambridge, England) 测定土壤 0~5 cm 水分,各取 3 次重复。土壤微生物呼吸、温度和水分同步监测。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 软件进行数据的预处理, SigmPlot 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) 分别进行不同处理件土壤微生物呼吸,土壤水分的方差分析,用以比较不同降水方式下土壤微生物呼吸、土壤水分之间的差异。

1.5 土壤 CO₂-C 排放量估算

根据连续测定的土壤微生物呼吸速率估算土壤 CO₂-C 日排放量,累加求 8 月 7 日~9 月 7 日的土壤 CO₂-C 排放量。公式为:

$$X = R_s \times 3\ 600 \times 24 \times 12 \div 10^6 \text{CO}_2\text{-C} \text{ (g} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$$

$$= \sum_{i=1}^n X_i$$

式中 X 为土壤每天 CO₂ 排放量 (g·m⁻²), R_s 为测定的土壤微生物呼吸速率 [μmol·(m²·s)⁻¹], 12 为 CO₂-C 的摩尔质量 (g·mol⁻¹), 3 600 和 24 为换算系数, i 为第一次测定土壤微生物呼吸速率, n 为监测次数。

1.6 土壤微生物呼吸胁迫的定义及计算方法

土壤含水量在一定范围内(田间持水量和萎蔫系数之间)时,对土壤微生物呼吸没有显著影响^[23],该试验地土壤凋萎含水量 12% (体积含水量),田间持水量 28% (体积含水量)^[24]. 而在本试验中,当土壤体积含水量小于 15%,土壤微生物呼吸逐渐受到抑制,因此,定义 15%~28% (体积含水量)为该试验适宜含水量区间,将超出这一范围的土壤含水量定义为存在土壤微生物呼吸水分胁迫. 当土壤含水量超过田间持水量时,视为过湿胁迫;低于凋萎含水量时,视为干旱胁迫. 胁迫天数计算方法如下:

$$\text{胁迫天数} (D) = \text{干旱胁迫天数} (d_1) + \text{过湿胁迫天数} (d_2)$$

2 结果与分析

2.1 不同降水条件下土壤微生物呼吸和土壤水分的动态变化

土壤含水量与降水变化基本同步: P_{10} 土壤含水量整体较平稳 [图 1(a)、图 2(a) 和图 3(a)], 600 mm 降水量下土壤水分随周期性降水小幅度升高并逐渐稳定于 28%; 300 mm 和 150 mm 降水量下土壤水分始终保持在凋萎含水量上下, 平均含水量分别为 13% 和 9%. 相较于 P_{10} , P_{150} 水分波动较为剧烈 [图 1(b)、图 2(b) 和图 3(b)], 降水后土壤水分迅速升高, 然后逐渐下降至凋萎含水量以下至下次降水. 3 种雨季降水量下含水量波动范围 150 mm 最大 (6.0%~31.7%), 300 mm 次之 (9.3%~38.5%), 600 mm 最小 (14.2%~38.2%).

水分变化显著影响土壤微生物呼吸. P_{10} 下土壤微生物呼吸在降水初期 (8 月 7~16 日) 被显著激发, 出现离群值 [图 1(a)、图 2(a) 和图 3(a)]; 8 月 16 日之后, 土壤微生物呼吸速率随土壤水分进入稳定状态, 土壤微生物呼吸速率均值分别为 2.13、1.74 和 1.08 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. P_{150} 土壤微生物呼吸对水分变化响应剧烈 [图 1(b)、图 2(b) 和图 3(b)]: 降水后, 土壤水分剧增, 土壤微生物呼吸速率突降至最低; 随着土壤水分下降, 土壤微生物呼吸速率在 5~9 d 上升至峰值; 后土壤微生物呼吸逐渐降低. 600 mm 降水量下 P_{150} 土壤微生物呼吸变化范围 [0.61~3.21 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] 最大, 平均值为 2.06 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 、其次为 300 mm 降水量 [0.90~3.10 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$], 平均值最大 (2.11 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$) 而 150 mm 降水量最低 [0.53~

2.84 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$], 平均值最小 [1.55 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$].

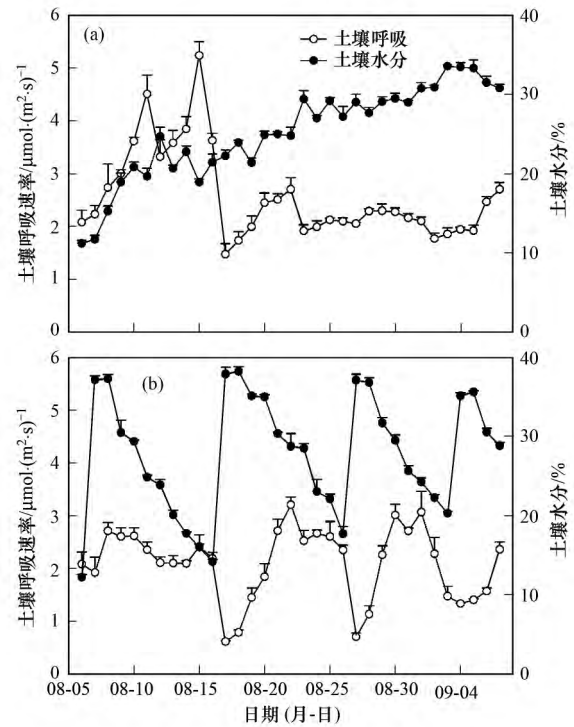


图 1 600 mm 降水量下土壤微生物呼吸及水分动态变化特征

Fig. 1 Dynamics of soil microbial respiration and soil moisture under 600 mm total precipitation

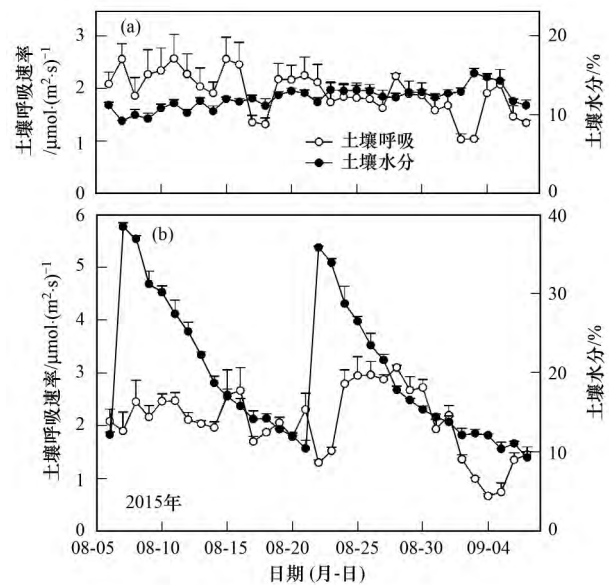


图 2 300 mm 降水量下土壤微生物呼吸及水分动态变化特征

Fig. 2 Dynamics of soil microbial respiration and soil moisture under 300 mm total precipitation

2.2 极端降水对土壤累积呼吸量的影响

降水频率影响土壤累积呼吸量 (图 4). 600 mm 和 300 mm 降水量下不同降水频率土壤累积呼吸量存在显著差异 ($P < 0.05$): 600 mm 降水量下,

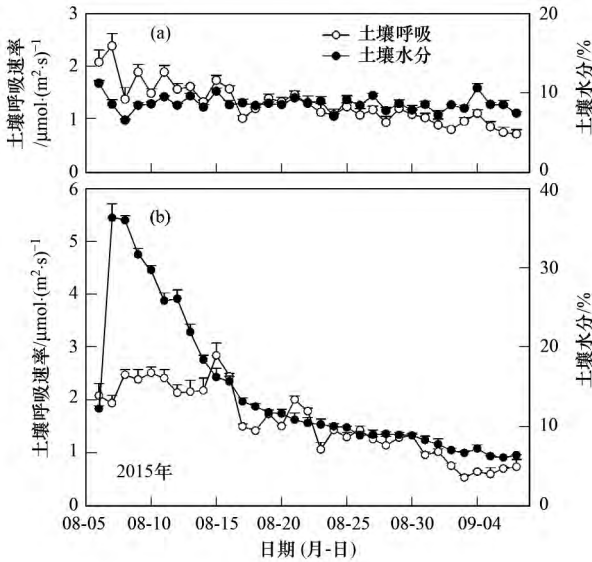
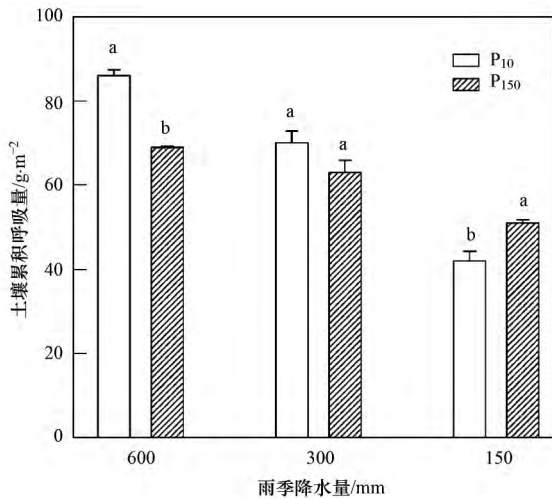


图3 150 mm 降水量下土壤微生物呼吸及水分动态变化特征
Fig. 3 Dynamics of soil microbial respiration and soil moisture under 150 mm total precipitation

土壤累积呼吸量分别为 $69 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $86 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, P_{150} 相较 P_{10} 土壤微生物呼吸累积量降低 20%; 150 mm 降水量下不同频率土壤累积呼吸量规律相反, P_{150} 土壤累积呼吸量 ($51 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) 较 P_{10} ($42 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) 增加 22%; 300 mm 降水量下差异不显著 ($P > 0.05$): 两种降水频率对应的土壤累积呼吸量分别为 $63 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $70 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$.



图中不同小写字母代表不同雨季降水量下, 两种降水频率间存在显著差异, 否则无显著差异
图4 3种雨季降水量下不同降水土壤累积呼吸量的差异
Fig. 4 Differences of the cumulative soil microbial respirations under the three total precipitations in rainy season

2.3 水分胁迫对土壤微生物呼吸的影响

600 mm 降水量下, P_{10} 、 P_{150} 含水量超过田间持水量的时间比例分别为 41% 和 60%, 小于凋萎含水

量的时间比例均为 3% (表 1), 主要表现为过湿胁迫. P_{10} 和 P_{150} 胁迫期内土壤平均呼吸速率较适宜含水量下分别降低 27% 和 20%; 胁迫期内土壤微生物呼吸速率均值依次为 $2.14 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $1.88 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 适宜含水量条件下依次为 $2.93 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $2.35 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 从土壤累积呼吸量看, P_{10} 胁迫期内累积呼吸量为总累积呼吸量的 36%, P_{150} 为 57%; 而胁迫时间分别占到试验总时间的 43% 和 63%.

300 mm 降水量下, P_{10} 胁迫期土壤微生物呼吸速率均值为 $1.93 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 胁迫时间比例为 97% 且全部为干旱胁迫. P_{150} 胁迫期土壤微生物呼吸速率均值为 $1.82 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 累积呼吸量占总累积呼吸量的 54%; 胁迫时间比例为 63%, 其中过湿和干旱胁迫比例分别为 22% 和 41%.

150 mm 降水量下, P_{10} 土壤微生物呼吸始终处于干旱胁迫, 土壤平均呼吸速率 $1.27 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$; P_{150} 下胁迫期土壤平均呼吸速率为 $1.36 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 较适宜水分条件下土壤微生物呼吸速率减少 42%, 胁迫时间比例为 82% (过湿: 13%、干旱: 69%).

表 1 不同降水条件下土壤微生物呼吸胁迫天数比例
Table 1 Time ratio of soil microbial respiration stress under different total precipitations in rainy season

雨季降水量 /mm	次降水量 /mm	胁迫天数比例/%		总计/%
		过湿 (>28%)	干旱 (<15%)	
600	P_{10}	41	3	44
	P_{150}	60	3	63
300	P_{10}	0	97	97
	P_{150}	22	41	63
150	P_{10}	0	100	100
	P_{150}	13	69	82

3 讨论

3.1 土壤水分与土壤微生物呼吸动态变化

大量研究表明土壤微生物呼吸的变化受温度和水分共同作用^[25]. 本研究中, 土壤温度波动较小, 且当土壤水分成为胁迫因子时, 其可能取代温度成为土壤微生物呼吸的主要控制因子^[26, 27]. 降水量和降水形式的改变通过影响土壤水分的波动模式影响土壤微生物呼吸动态. 有研究指出干旱生态系统对降水形式的改变高度响应^[14]. 极端降水的出现一般伴随着干旱周期的延长, 土壤水分变异性增加^[28], 土壤深层和浅层的水分动态变化发生改变. P_{10} 下降水频率较高, 土壤水分随降水事件的发生持

续升高或保持平稳: 600 mm 降水量下土壤含水量在降水后期稳定于 28%, 处于土壤田间持水量以上, 300 mm 和 150 mm 降水量下土壤平均含水量分别为 13% 和 9%, 始终保持在凋萎含水量上下; P_{150} 下, 土壤水分随着降水事件的发生迅速升高, 之后随蒸发逐渐降低到接近雨前水平。

两种降水方式下土壤微生物呼吸的动态差异与极端降水引起的土壤水分双向调节有关^[29] (图 5)。 P_{10} 下降水初期土壤微生物呼吸速率被迅速激发, 造成这种现象的原因可能是由于低含水量时土壤水分影响可溶性基质的扩散^[30], 降水后水分可用性的增加导致微生物细胞质溶解和迅速矿化^[31], 土壤呼吸迅速增加; 降水后期, 随着小强度高频率降水事件的发生, 600 mm 降水量下土壤水分达到田间持水量, 而 300 mm 和 150 mm 降水量下土壤水分始终波动于凋萎含水量上下, 土壤微生物呼吸均达到相对稳定状态, 激发效应不显著 (图 2 和图 3)。与 P_{10} 不同, P_{150} 下土壤微生物呼吸速率则呈现不同的规律 [图 1 (b)、图 2 (b) 和图 3 (b)]: 降水发生后, 土壤水分迅速升高至田间持水量以上, 大量的水分聚集在土壤表面, 土壤的通透性变差, 土壤微生物呼吸处于被抑制的状态, 这与 Harper 等^[12] 对农田和草原的研究结果相似, 很多野外测量的结果也表明强降雨或土壤水分过高的情况下会抑制土壤微生物呼吸^[32, 33]。后期, 土壤水分逐渐下降至凋萎含水量以下, 偏低的土壤含水量造成微生物活性下降^[34], 土壤微生物呼吸显著降低。

3.2 降雨量对土壤累积呼吸量的作用机制

降水总量显著影响土壤累积呼吸量 ($P < 0.05$)。本研究显示, 土壤累积呼吸量随总降水量减少而降低 (图 4)。土壤累积呼吸量 600 mm > 300 mm > 150 mm, 其中 P_{10} 下, 相较于 150 mm 降水量, 300 mm 和 600 mm 降水量下土壤累积呼吸量分别增加了 67% 和 105%; P_{150} 下, 增加比例分别为 24% 和 35%, 由此表明对于相对干旱的土壤, 随着土壤干湿交替过程的循环, 土壤碳矿化作用会被增强^[35]。类似的结果在其他研究中也有报道^[36, 37], 且与陈书涛等^[38] 对 40 年间 (1970 ~ 2009 年) 中国土壤微生物呼吸量的变异及其与气候因子的关系分析发现的土壤累积呼吸量与降雨量呈正相关结论一致。但 P_{10} 和 P_{150} 下的土壤累积呼吸量因降水总量呈现不同规律。600 mm 降水量下, 土壤累积呼吸量呈现 $P_{10} > P_{150}$ 的趋势 ($P < 0.05$); 150 mm 降水量下趋势相反 ($P_{150} > P_{10}$) ($P < 0.05$); 300 mm 降水量下则无显

著差异 ($P > 0.05$)。造成这一现象的原因可能与总降水量和降水大小显著影响土壤水分胁迫的时间长短有关 (表 1 和图 5)。

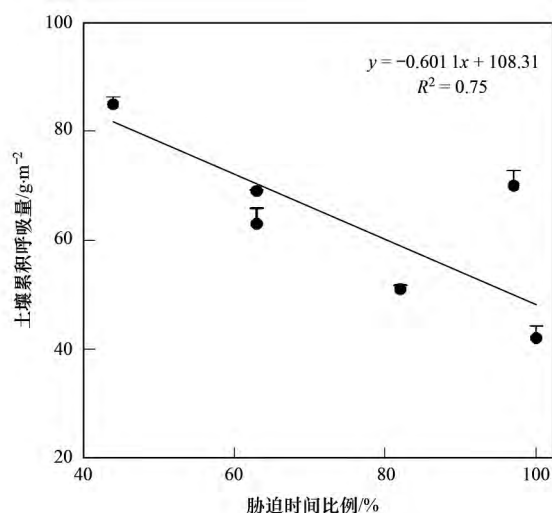


图 5 土壤累积呼吸量与胁迫时间比例的关系

Fig. 5 Relationship between the cumulative soil respirations and the time ratio of soil respiration stress

有研究指出, 极端降雨伴随频率干旱事件间隔较长, 土壤水分胁迫的严重程度会增加^[14]。本研究发现, P_{150} 下土壤过湿胁迫的时间始终大于 P_{10} , 而干旱胁迫时间则随降水量的变化呈现不同的变化。600 mm 降水量下, P_{150} 干旱胁迫时间较 P_{10} 延长; 150 mm 降水量下 P_{150} 土壤干旱胁迫时间缩短; 但是 300 mm 降水量下土壤干旱胁迫的时间无显著差异 ($P > 0.05$)。在前人关于土壤水分胁迫的研究中也出现过类似的规律: Porporato 等^[32] 对湿润生态系统的研究发现总降水量一致的条件下, 随单次降水量的增加, 干旱周期延长, 干旱胁迫时间和出现次数增加, 土壤微生物呼吸降低, 与本研究 600 mm 降水量下结果一致; Knapp 等^[28] 在干旱生态系统的研究指出大强度的极端降水事件会更加充分地补给土壤水分, 使土壤水分长时间地保持在干旱胁迫临界值之上, 季节性的水分胁迫将减少, 导致土壤微生物呼吸增加, 此研究结果与 150 mm 降水量一致。因此, 土壤累积呼吸量与胁迫时间呈显著负相关 (表 1 和图 5)。600 mm 降水量下土壤总胁迫时间 $P_{10} < P_{150}$, 且从胁迫期内平均土壤微生物呼吸速率来看, $P_{150} < P_{10}$, P_{150} 下土壤微生物呼吸受胁迫程度更深, 因此, 土壤累积呼吸量 $P_{10} > P_{150}$; 150 mm 降水量下两种降水频率下土壤微生物呼吸胁迫程度相近, 但是 P_{10} 胁迫期更长, 土壤累积呼吸量 $P_{150} > P_{10}$; 300 mm 降水量下胁迫期平均土壤微生物呼吸速率 P_{10} 略大, 且

P_{10} 下土壤微生物呼吸 97% 的时间处于干旱胁迫, P_{150} 胁迫时间比例为 63% (包括干旱胁迫 22%、过湿胁迫 41%) ,但是二者累积呼吸量却无显著差异, 这说明过湿胁迫和干旱胁迫对呼吸的作用机制不同, 其对土壤微生物呼吸的影响值得进一步探讨。

降雨模拟试验人为创造出试验所需特殊气候条件的同时, 与具体田间降水相比存在一定的局限性^[39]。本研究中降雨量和降雨频率等因素均设置在可以控制的范围, 通过把较长时间尺度上才可能发生的极端降水事件缩短到较短的时间尺度上来实现, 克服了实际中极端降水事件概率很小的问题。本研究中依据长武雨季前高温少雨的气候特征, 统一控制土壤初始含水量为凋萎含水量; 另外, 依据该地区 1957~2015 年雨季降水资料设置 6 种降水处理, 相较于雨季气候的多变性, 模拟降雨为本研究提供了一个相对理想的试验条件。因此, 二者间存在一定的差异, 与实际有所出入但不影响试验规律的科学性。

4 结论

极端降水事件显著影响土壤微生物呼吸速率动态变化及土壤累积呼吸量。相对于 P_{10} , P_{150} 下土壤微生物呼吸速率波动较剧烈; 不同雨季降水量下, 土壤累积呼吸量随降水量呈现 600 mm > 300 mm > 150 mm 的趋势; 相同降水量下, 600 mm 降水量, 土壤累积呼吸量表现为 $P_{10} > P_{150}$ 的趋势; 150 mm 降水量下趋势相反: $P_{150} > P_{10}$; 300 mm 降水量下则无显著差异。土壤微生物呼吸胁迫时间是影响土壤微生物呼吸累积量的重要因素。全球变暖趋势下极端性降水事件对土壤微生物呼吸的影响不容忽视。

致谢: 感谢长武站对本研究的支持。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Wolters V, Silver W L, Bignell D E, et al. Effects of global changes on above-and belowground biodiversity in terrestrial ecosystems: implications for ecosystem functioning [J]. *Bioscience*, 2000, **50**(12): 1089-1098.
- [3] Kharin V V, Zwiers F W, Zhang X B, et al. Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations [J]. *Journal of Climate*, 2007, **20**(8): 1419-1444.
- [4] 王苗, 郭品文, 邬响, 等. 我国极端降水事件研究进展 [J]. *气象科技*, 2012, **40**(1): 79-86.
- [5] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, et al. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems [J]. *Oecologia*, 2004, **141**(2): 221-235.
- [6] 陈书涛, 胡正华, 张勇, 等. 陆地生态系统土壤呼吸时空变异的影响因素研究进展 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2184-2192.
- [7] Luo Y Q, Zhou X H. Soil respiration and the environment [M]. London: Academic Press, 2006. 92-97.
- [8] Van Gestel M, Merckx R, Vlassak K. Microbial biomass responses to soil drying and rewetting: the fate of fast-and slow-growing microorganisms in soils from different climates [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, **25**(1): 109-123.
- [9] Miller A E, Schimel J P, Meixner T, et al. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(12): 2195-2204.
- [10] 王丽丽, 宋长春, 郭跃东, 等. 三江平原不同土地利用方式下凋落物对土壤微生物呼吸的贡献 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3130-3135.
- [11] Grant R F, Rochette P. Soil microbial respiration at different water potentials and temperatures: theory and mathematical modeling [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58**(6): 1681-1690.
- [12] Harper C W, Blair J M, Fay P A, et al. Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO₂ flux in a grassland ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(2): 322-334.
- [13] Knapp A K, Fay P A, Blair J M, et al. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland [J]. *Science*, 2002, **298**(5601): 2202-2205.
- [14] Thomey M L, Collins S L, Vargas R, et al. Effect of precipitation variability on net primary production and soil respiration in a Chihuahuan Desert grassland [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(4): 1505-1515.
- [15] Vargas R, Collins S L, Thomey M L, et al. Precipitation variability and fire influence the temporal dynamics of soil CO₂ efflux in an arid grassland [J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(4): 1401-1411.
- [16] Jongen M, Lecomte X, Unger S, et al. Precipitation variability does not affect soil respiration and nitrogen dynamics in the understory of a Mediterranean oak woodland [J]. *Plant and Soil*, 2013, **372**(1-2): 235-251.
- [17] 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 等. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述 [J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(7): 673-684.
- [18] 李志, 郑粉莉, 刘文兆. 1961-2007 年黄土高原极端降水事件的时空变化分析 [J]. *自然资源学报*, 2010, **25**(2): 291-299.
- [19] 赵宗慈, 丁一汇, 徐影, 等. 人类活动对 20 世纪中国西北地区气候变化影响检测和 21 世纪预测 [J]. *气候与环境研究*, 2003, **8**(1): 26-34.
- [20] Deng H J, Chen Y N, Shi X, et al. Dynamics of temperature

- and precipitation extremes and their spatial variation in the arid region of northwest China [J]. *Atmospheric Research*, 2014, **138**: 346–355.
- [21] Zhang H X, Wang X K, Feng Z W, *et al.* Multichannel automated chamber system for continuous monitoring of CO₂ exchange between the agro-ecosystem or soil and the atmosphere [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(4): 1273–1281.
- [22] Iqbal J, Hu R G, Feng M L, *et al.* Microbial biomass, and dissolved organic carbon and nitrogen strongly affect soil respiration in different land uses: a case study at Three Gorges Reservoir Area, South China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **137**(3–4): 294–307.
- [23] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤微生物呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*, 2003, **23**(5): 972–978.
- [24] 官情, 王俊, 宋淑亚, 等. 黄土旱塬区不同覆盖措施对冬小麦农田土壤微生物呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(6): 1471–1476.
- [25] Davidson E A, Verchot L V, Cattanio J H, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 53–69.
- [26] 师广旭, 耿浩林, 王云龙, 等. 克氏针茅(*Stipa krylovii*) 草原土壤微生物呼吸及其影响因子[J]. *生态学报*, 2008, **28**(7): 3408–3416.
- [27] 李明峰, 董云社, 齐玉春, 等. 锡林河流域羊草群落春季 CO₂ 排放日变化特征分析[J]. *中国草地*, 2003, **25**(3): 9–14.
- [28] Knapp A K, Beier C, Briske D D, *et al.* Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems [J]. *Bioscience*, 2008, **58**(9): 811–821.
- [29] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 等. 黄土高原小麦田土壤微生物呼吸对强降雨的响应[J]. *生态学报*, 2008, **28**(12): 6189–6196.
- [30] Wan S Q, Norby R J, Ledford J, *et al.* Responses of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(11): 2411–2424.
- [31] Yan L M, Chen S P, Xia J Y, *et al.* Precipitation regime shift enhanced the rain pulse effect on soil respiration in a semi-arid steppe [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(8): e104217.
- [32] Porporato A, Vico G, Fay P A. Superstatistics of hydro-climatic fluctuations and interannual ecosystem productivity [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(15): L15402.
- [33] Liu X Z, Wan S Q, Su B, *et al.* Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem [J]. *Plant and Soil*, 2002, **240**(2): 213–223.
- [34] Borken W, Davidson E A, Savage K, *et al.* Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**(6): 1888–1896.
- [35] Huang G, Li Y, Su Y G. Effects of increasing precipitation on soil microbial community composition and soil respiration in a temperate desert, Northwestern China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **83**: 52–56.
- [36] Potts D L, Huxman T E, Cable J M, *et al.* Antecedent moisture and seasonal precipitation influence the response of canopy-scale carbon and water exchange to rainfall pulses in a semi-arid grassland [J]. *New Phytologist*, 2006, **170**(4): 849–860.
- [37] Chen S P, Lin G H, Huang J H, *et al.* Responses of soil respiration to simulated precipitation pulses in semiarid steppe under different grazing regimes [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, **1**(4): 237–246.
- [38] 陈书涛, 黄耀, 邹建文, 等. 中国陆地生态系统土壤呼吸的年际间变异及其对气候变化的响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, **42**(8): 1273–1281.
- [39] Lee X H, Wu H J, Sigler J, *et al.* Rapid and transient response of soil respiration to rain [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(6): 1017–1026.