

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150431

小兴安岭典型温带森林土壤呼吸对强降雨的响应

刘博奇^{1,2} 牟长城¹ 邢亚娟² 韩士杰³ 姜思领² 王庆贵^{1,2}

(1 东北林业大学生态研究中心 2 黑龙江大学农业资源与环境学院 3 中国科学院沈阳应用生态研究所)

摘要: 森林土壤呼吸是全球碳循环的重要组成部分,其对降雨格局的变化如何响应,是当前全球变化研究中的热点问题。本研究以小兴安岭地区原始温带森林(云冷杉红松林)为研究对象,使用 SF-3000 土壤气体通量自动测量系统,对雨季不同时期 4 次强降雨前后的土壤呼吸速率、土壤呼吸的组分和相关环境因子进行了连续观测。结果表明:1) 土壤温度和含水量协同影响土壤呼吸强度。降雨是影响甚至改变控制土壤呼吸(R_s)的关键环境因子,强降雨使土壤含水量激增,并对土壤温度也有不同程度的影响。雨季初期强降雨对 R_s 的扰动作用相对较小,雨季中期强降雨可抑制 R_s ,在雨季结束后强降雨可促进 R_s 。2) 在雨季不同时期的强降雨均不同程度的影响了土壤异养呼吸(R_h)与土壤呼吸的比例(R_h/R_s)。相对于土壤自养呼吸(R_a),短时极强降雨对 R_h 的抑制作用更强。3) 加入水分修正系数 c 的 R_s 与 T_s 、 W_s 指数关系模型可更好的表征土壤含水量和土壤温度对土壤呼吸的影响。不同雨季时期的强降雨均对土壤的温度敏感系数(Q_{10})有着显著的影响。强降雨使得土壤对水分的敏感性降低,处于雨季不同时期的土壤水分敏感性表现为:在雨季的开始和结束后,土壤呼吸的水分敏感性较高,而雨季中期的水分敏感性较低。

关键词: 小兴安岭; 强降雨; 土壤呼吸; 云冷杉红松林

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2016)04-0077-09

LIU Bo-qi^{1,2}; MOU Chang-cheng¹; XING Ya-juan²; HAN Shi-jie³; JIANG Si-ling²; WANG Qing-gui^{1,2}. **Effect of strong rainfalls on soil respiration in a typical temperate forest in Lesser Xing'an**

Mountains northeast China. *Journal of Beijing Forestry University* (2016) 38(4) 77-85 [Ch 44 ref.]

1 Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, 150040, P. R. China;

2 College of Agricultural Resource and Environment, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang, 150086, P. R. China;

3 State Key Laboratory of Forest and Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Jilin, 110015, P. R. China.

Forest soil respiration is an important component of ecosystem carbon cycle. Under the context of global climate change, extreme climate events present a high-rate tendency. How the change affects soil respiration in the forest ecosystem has attracted more and more attention. In order to investigate the response of soil respiration to strong rainfalls during different periods of the wet season, we used SF-3000 automated soil flux system to monitor different components of soil respiration in a typical temperate forest (spruce-fir-Korean pine forest) in Lesser Xing'an Mountains, northeast China. Environmental factors were also measured simultaneously. The results showed that, 1) soil respiration (R_s) was influenced by soil temperature and soil water content. The strong rainfalls altered the determining factors that control R_s . Soil water content was stimulated greatly by strong rainfalls. During the early period of wet season,

收稿日期: 2015-11-30 修回日期: 2016-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170421、41575137、31370494、31070406)、科技部基础性工作专项 A 类项目(2014FY110600)、黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD201406)。

第一作者: 刘博奇, 博士生。主要研究方向: 气候变化与生态系统响应。Email: liuboqi@live.cn 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学生态研究中心。

责任作者: 王庆贵, 博士, 教授。主要研究方向: 气候变化与生态系统响应。Email: qgwang1970@163.com 地址: 150080 黑龙江省哈尔滨市南岗区学府路 74 号黑龙江大学农业资源与环境学院。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

R_s was merely disturbed by strong rainfalls, whereas it decreased R_s during the wet season and increased R_s after the wet season. 2) The influences of strong rainfalls on heterotrophic respiration/soil respiration (R_h/R_s) varied during different periods of the wet season. Compared to autotrophic respiration (R_a), strong rainfalls greatly inhibited R_h . 3) The relationship between R_s and soil temperature at 5 cm depth (T_5) as well as soil water content at 5 cm depth (W_5) could be better explained by an exponential equation which contains soil moisture parameter c . Strong rainfalls had varying effects on temperature sensitivities of R_s (Q_{10}) during different periods of the wet season. The soil moisture sensitivity of R_s was decreased after rainfall. The moisture sensitivities (c) during different periods of the wet season were characterized as follow: wet season < early wet season < after the wet season.

Key words Lesser Xing'an Mountains; strong rainfall; soil respiration; spruce-fir-Korean pine forest

土壤呼吸是陆地生态系统碳(C)循环的主要方式,是大气和陆地生态系统之间仅次于植物光合作用的第二大C排放源^[1-2],土壤呼吸的细微变化都显著影响全球的C循环动态^[3],因此土壤呼吸研究在过去几十年中成为了科学界关注的热点。此外土壤C库是陆地生态系统最大的C库^[4],森林生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,其土壤C库约占全球土壤C库的73%^[5],森林土壤C库在维持全球C循环平衡方面有不可替代的作用。因此,森林土壤呼吸是陆地生态系统C循环研究中的重要部分。

土壤呼吸由土壤异养呼吸(R_h)和土壤自养呼吸(R_a)组成, R_a 也被称为根系呼吸,而 R_h 又被称为土壤微生物呼吸,其所包含的生物学过程主要包括根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸,非生物学过程为含C矿物质的化学氧化作用^[6]。一般而言,土壤呼吸主要受到环境因子(土壤温度、含水量等)、底物供应等因素的影响^[7-8]。这些生物、非生物学过程往往由于环境因子的变化,而产生不同的响应机制,当影响土壤呼吸的因素发生变化时,对土壤呼吸的不同组分(R_h 、 R_a)会产生不同的影响,因此土壤呼吸不同组分对土壤总呼吸贡献的研究是土壤C循环研究的重要环节。

根据IPCC的预测显示,气候变化会导致各种极端气候事件频发^[9-10]。在气候变化的背景下,北半球中高纬度地区出现了降雨频率、强度均增加的趋势,未来可能会发生更多的强降雨过程^[11]。根据中央气象局规定,强降雨即极端降水是指1 h内降雨量16 mL以上或24 h内50 mL以上的降雨。在降雨之中与之后都会产生大量水分穿透地表植被覆盖而下渗至土壤之中,甚至在短时强降雨影响下会引起地表径流的发生^[12-13]。这种强降雨会导致土壤水分在短期内迅速增加,使土壤理化性质如土壤通气透水性、土壤温湿度、土壤微生物等发生剧烈的变化,进而影响土壤呼吸的变化^[14-24]。尽管降雨对土

壤呼吸的影响研究有一定的进展,在自然条件下全天候的针对温带森林降雨过程的土壤呼吸,特别是强降雨过程前后土壤呼吸(包括自养呼吸、异养呼吸)以及相关的环境因子(土壤温、湿度)的研究鲜有报道。本研究通过小兴安岭地区典型温带森林在雨季前后的几次强降雨过程中不同组分的土壤呼吸速率和相关环境因子的连续观测,探讨温带森林土壤呼吸对强降雨的响应机制,为全球气候变化背景下温带森林的区域C排放动态提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

试验样地位于黑龙江省伊春市五营区丰林国家级自然保护区(48°02'~48°12'N, 128°58'~129°15'E),属黑龙江省东北部小兴安岭南坡北段,地处北半球气候变化敏感区域。该区为低山丘陵地段和宽广谷地,坡度在10°~25°之间。该区气候属大陆性季风气候,1月份平均气温为-24.2℃,7月份平均气温为20.3℃,年均气温-0.5℃(1959—2013年),无霜期120天左右。四季分明,春季多风,7—8月为雨季,年降雨量为680~750 mm。地带性植被为温带针阔叶混交林,属中国东北区长白植物区系小兴安岭亚区。土壤类型为暗棕壤,土壤pH值为5.6,有机质含量为(407.50±66.51) g/kg,速效氮含量为(354.56±52.12) mg/kg^[25],有岛状多年冻土分布。云冷杉红松林是小兴安岭地区的典型地带性群落,群落郁闭度90%。林冠层主要树种为红松(*Pinus koraiensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)等,林分密度为(972±96)株/hm²,林龄为210年。

1.2 试验样地设置

试验样地选在低山东坡,平均坡度小于3°,于2013年5月布设20 m×20 m的试验区,将并试验区分成4 m宽的3行3列共9块样地,其间保留4 m宽的缓冲区;在每行中随机挑选1个样地设置2个

1 m × 1 m 的试验小样方,每两个小样方间缓冲距离为 2 m,在每个小样方内设置土壤呼吸底座(soil collar),共设置 3 组、6 个底座,每个底座(直径 20 cm,高度 12 cm)距最近树干 1.5 m 左右,深入土壤至露出地面 3 cm,保留其中的枯枝落叶自然状态。采用壕沟断根法随机选取上述小样方中的 3 个进行土壤异养呼吸(Rh)的测量,其余 3 个进行对照的土壤呼吸(Rs)的测量,自养呼吸(Ra)为对照的 Rs 减去 Rh。在小样方四周挖壕深至植物根系分布层以下,壕沟用双层塑料布隔离小样方周围的根系,并除去小样方内的所有活体植物,并在随后的测量中始终保持小样方内没有活体植物。

1.3 环境因子及土壤呼吸的测定

降雨量数据来源于丰林国家级自然保护区自动气象站,2013 年降雨量为 766.3 mm,其中 7、8、9 月降雨量分别为 184.0、276.5、70.3 mm,选取 7—9 月内发生的 4 次典型强降雨(表 1) 4 次强降雨情况如下:第 1 次发生在雨季初期(7 月 14 日),第 2、3 次降雨正值雨季(8 月 2 日、8 月 7 日),最后 1 次发生在雨季结束后(9 月 20 日)。

表 1 强降雨基本情况

Tab. 1 Basic information of strong rainfalls in 2013

日期 Date	开始 时间 Start time	降雨时长 Duration/ min	降雨量 Precipitation/ mm	雨强 Rainfall intensity/ (mm·h ⁻¹)
2013-07-14	14:44	207	33.2	9.6
2013-08-02	14:45	70	26.6	22.8
2013-08-07	15:11	124	70.9	34.3
2013-09-20	21:00	60	25.7	25.7

自 2013 年 5 月起,使用 SF-3000 土壤气体通量自动测量系统(Lica, Beijing, China)开始监测土壤呼吸速率,每个底座测量时间为 2 min,每次测量设置 3 次重复,每小时 6 个底座依次监测 3 次,全天 24 h 不间断测量。每小时内每个测量关闭 3 次每次约 2 min 进行测量,其他时间均处于开放状态,降雨过程中被排除在底座外的降雨较少。在测定土壤呼吸速率的同时,使用 Em-50 传感器(Decagon Devices, Inc. USA),每分钟测定土壤 5 cm 处的温度(T_5)和土壤含水量(W_5)。

1.4 数据分析

在不同降雨阶段,对强降雨前后共 5 天(指降雨前日,降雨当日,降雨后 3 日)的环境因子和土壤呼吸数据进行处理(此时土壤水分含量已基本恢复至降雨前水平)。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(Rs、

Rh)数据采用每个小时中 3 个气室 3 次测量的平均值,数据频率每小时 1 次。采用 MATLAB7.0(The Math Works, Natick, MA, USA)绘制降雨过程以及前后的土壤呼吸和环境因子变化。采用 MATLAB7.0 进行模型拟合,降雨前、后不同时期内的 Rs 与 T_5 的单变量模型^[26-27]拟合如下:

$$R_s = R_0 e^{bT_5} \quad (1)$$

式中:Rs 表示土壤呼吸($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), R_0 表示 0 °C 时的土壤呼吸($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), b 为温度反应系数, T_5 为距地表 5 cm 的土壤温度(°C)。

用 Q_{10} 表征土壤呼吸的温度敏感系数(即温度每增加 10 °C 呼吸变为初始值的倍数),计算公式^[28]如下:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

综合考虑 Rs 与 T_5 、 W_5 (距地表 5 cm 的土壤含水量)双变量关系,模型^[28]拟合如下:

$$R_s = a e^{bT_5} c^{W_5} \quad (3)$$

式中: a 为特征参数, c 为土壤呼吸的水分敏感性参数。

2 结果与分析

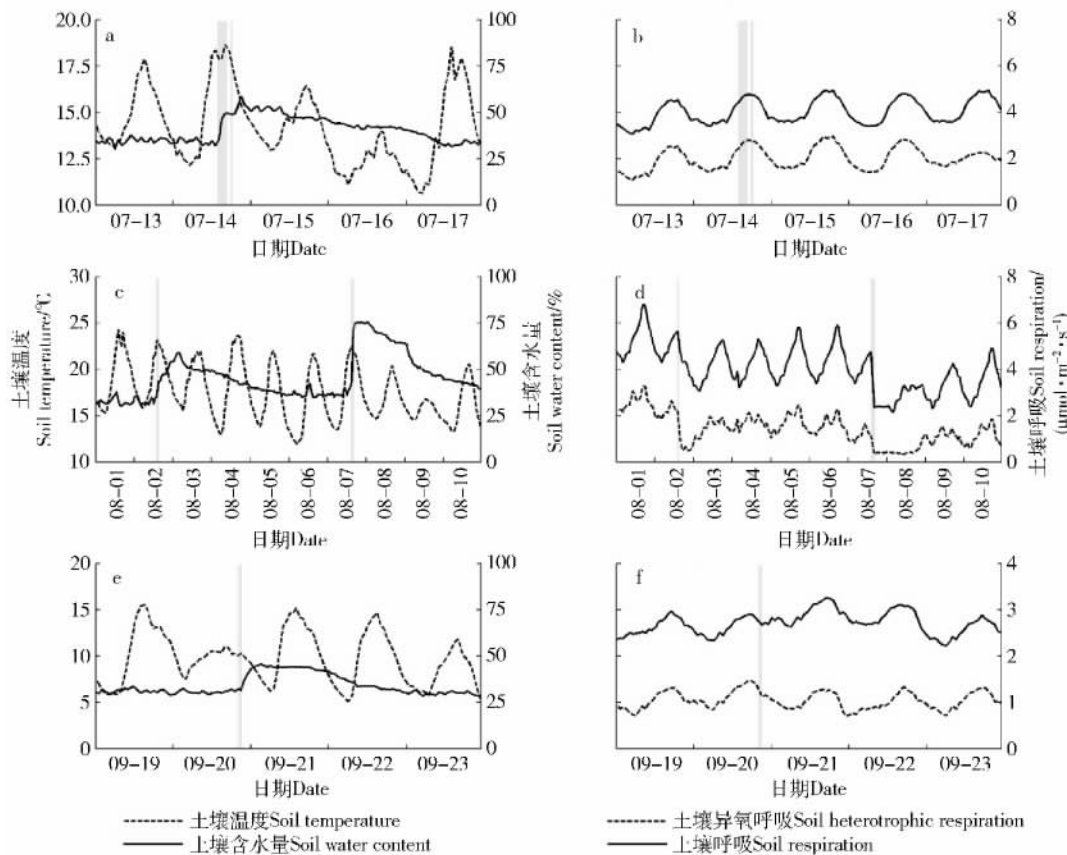
2.1 强降雨前后的土壤呼吸和环境因子的变化

图 1 是雨季初期、雨季期和雨季结束后 4 次强降雨前后共 5 天的土壤呼吸(Rs)、土壤异养呼吸(Rh)和 5 cm 土壤温度(T_5)、含水量(W_5)的变化情况。在雨季不同时期,强降雨均对控制土壤呼吸的环境因子有影响。土壤含水量在强降雨后激增,而后逐步恢复;而且对土壤温度也有不同程度的扰动,强降雨有使土壤温度降低的趋势。

在雨季初期(图 1a、b),土壤呼吸(Rs)、土壤异养呼吸(Rh)和 5 cm 土壤温度(T_5)有着明显的日变化特征,Rs、Rh 与 T_5 的变化曲线走势一致,表明土壤温度 T_5 是影响土壤呼吸的重要因素,雨季前期的强降雨并未改变 Rs、Rh 的日变化周期。在雨季阶段(图 1c、d)共经历两次强降雨,其中第 2 次形成了极大的地表径流。第 1 次强降雨前后 Rs、Rh 和 T_5 有着明显的日变化特征,强降雨后随着 W_5 的突然增大 Rs 降低,日均 Rs 由 $(5.37 \pm 0.76) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (8 月 1 日)降低为 $(4.14 \pm 0.73) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (8 月 3 日)。第 2 次强降雨使得 Rs 由 $(4.46 \pm 0.76) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (8 月 6 日)骤降为 $(2.91 \pm 0.41) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (8 月 8 日)。两次强降雨后土壤湿度逐渐恢复,但 Rs 未能恢复至强降雨之前的水平。所以正值雨季的强降雨对 Rs 有明显的抑制作用,随着降雨强度的增大,其抑制作用更大。与此同时,Rh

在两次强降雨后均有明显程度的下降;尤其第2次强降雨后 R_h 几乎停止,由 $(1.60 \pm 0.34) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (8月6日)骤降至 $(0.47 \pm 0.20) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (8月7日),而后随土壤湿度下降逐渐恢复,但未能恢复至第2次强降雨之前的水平。雨季的两次强降雨改变了 R_s 、 R_h 的日变化周期,随着土壤湿度的激增, R_s 、 R_h 与 T_5 的日变化周期一致性被减弱,表明

土壤含水量是影响强降雨后 R_s 、 R_h 的重要因素,正值雨季期的强降雨明显抑制了 R_s 、 R_h 。在雨季结束后(图1e、f), R_s 、 R_h 和 T_5 有着明显的日变化特征,强降雨对 R_s 有短暂的激发作用。而 R_h 与 T_5 的变化曲线走势基本一致,表明土壤温度 T_5 是影响 R_h 的重要因素,在雨季结束后的强降雨短暂的提高了 R_s ,但并未改变 R_s 、 R_h 的日变化周期。



图中阴影表示降雨时间 Shadow indicates the duration of strong rainfall

图1 强降雨前后5 cm土壤温度、5 cm土壤含水量、土壤总呼吸和土壤异养呼吸的变化

Fig. 1 Changes of soil temperature at 5 cm depth, soil water content at 5 cm depth, soil respiration and soil heterotrophic respiration rate with the duration of strong rainfalls

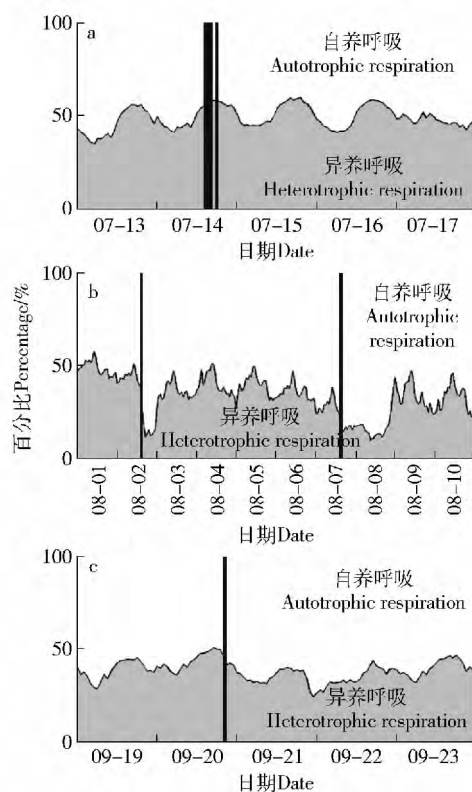
2.2 土壤自养呼吸(R_a)、异养呼吸(R_h)对强降雨的响应

图2是 R_a 、 R_h 对强降雨的响应,以及强降雨前后 R_a 、 R_h 占总呼吸(R_s)的比例随时间的变化过程。雨季初期的强降雨对 R_h/R_s 没有显著影响(图2a),雨季初期的强降雨有提高 R_h/R_s 的趋势。而在雨季中期的两次强降雨中(图2b), R_s 的组成都经历了剧烈的变化。第1次强降雨使 R_h/R_s 由 $(44.43\% \pm 3.23\%)$ (降雨前24 h)骤降至 $(13.98\% \pm 2.94\%)$ (8 h);第2次强降雨使 R_h/R_s 由 $(30.51\% \pm 4.97\%)$ (强降雨开始前的24 h)下降至 $(14.88\% \pm 2.91\%)$ (27.33 h)。正值雨季的强降雨降低了 R_h/R_s 的比例,强降雨对 R_h 的影响大于对 R_a 的影响,突发性的强降雨使得 R_h 受到极大的

抑制,而对 R_a 的影响相对 R_h 较弱。雨季结束后(图2c)的强降雨对 R_h/R_s 没有显著影响,有降低 R_h/R_s 的趋势。相比正值雨季的强降雨,雨季结束后强降雨的 R_h/R_s 经历了较为缓慢的变化过程。在雨季不同时期的强降雨均不同程度的影响了 R_h/R_s 相对于土壤自养呼吸 R_a 短时强降雨对 R_h 的抑制作用更强。

2.3 强降雨前后的土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量的关系

表2反映了处于雨季不同时期的4次强降雨事件前、后,土壤呼吸(R_s)对5 cm土壤温度(T_5)响应特征。总体来说, R_s 随 T_5 的上升而显著增加。比较各次降雨前后的指数方程拟合优度 R^2 可知,在雨季开始和雨季结束的两次强降雨前后, R^2 分别由



图中深色阴影表示降雨时间 Deep shadow indicates the duration of the strong rainfalls

图2 土壤自养呼吸、异养呼吸对强降雨的响应

Fig. 2 Change of soil autotrophic respiration and heterotrophic respiration with the duration of strong rainfalls

0.63 ($P < 0.001$) 和 0.50 ($P < 0.001$) 上升至 0.80 ($P < 0.001$) 和 0.71 ($P < 0.001$)。正值雨季中期的第 1 次强降雨在降雨前后 R^2 没有变化。在第 2 次

的降雨过后 R^2 从降雨前的 0.79 ($P < 0.001$) 下降至 0.03 ($P = 0.41$) ,即降雨过后的 24 h 内 R_s 对 T_5 的响应变得不显著,强降雨可影响甚至改变控制土壤呼吸的环境因子。各次强降雨前、后 R_s 的温度敏感性 (Q_{10}) 与指数方程的 R^2 有不同的变化趋势: 雨季初期的强降雨和正值雨季的第 1 次强降雨过后, Q_{10} 分别从 1.46 和 1.58 上升至 2.53 和 1.79; 而在 9 月 20 日的降雨后, 尽管 R^2 增加了, 但 Q_{10} 从 1.42 下降至 1.22。强降雨对土壤的温度敏感性有着明显的影响。

表 3 反映了处于雨季不同时期的 4 次强降雨事件前后, 土壤呼吸 (R_s) 对 5 cm 土壤温度 (T_5)、5 cm 土壤含水量 (W_5) 的响应特征。比较表 2 与 3 可知, 模型拟合优度 (R^2) 在降雨前后的变化与只有土壤温度的 R^2 的变化基本一致。但在模型中加入了土壤水分修正系数后, R^2 都有了不同程度的提高 (表 3), 尤其在正值雨季 (08-07) 的第 2 次强降雨后 R^2 由原来的 0.03 ($P = 0.41$) 提高至 0.78 ($P < 0.001$)。除正值雨季 (08-02) 的第 1 次强降雨 Q_{10} 由 1.79 变为 1.64 外, 加入水分修正系数的 $R_s = ae^{bT_5}c^{W_5}$ 模型计算出的 Q_{10} 与只有土壤温度的 $R_s = R_0e^{bT_5}$ 模型基本一致。 R_s 对土壤水分的水分敏感性, 以系数 c 表征。4 次强降雨前后 c 值均减小, 如雨季前期 (07-14) 的强降雨之前后的 c 值分别为 5.44 和 0.38, 强降雨使得土壤对于水分的敏感性降低。处于雨季不同时期的土壤水分敏感性 c (雨季前期) 为 5.44, c (雨季中期) 为 0.36, c (雨季结束) 为 6.55, 即 c (雨季中期) $< c$ (雨季前期) $< c$ (雨季结束期)。

表 2 强降雨前后土壤呼吸 (R_s) 与 5 cm 土壤温度 T_5 的指数关系模型 ($R_s = R_0e^{bT_5}$)

Tab. 2 Exponential relationship between soil respiration rate (R_s) and soil temperature at 5 cm depth (T_5) before and after each of the strong rainfalls ($R_s = R_0e^{bT_5}$)

降雨事件 Rainfall event	降雨过程 Rainfall process	参数 Parameters				温度敏感系数 Temperature sensitivity (Q_{10})
		R_0	b	R^2	P	
07-13T14:44—07-14T14:44	降雨前 Before rainfall	2.22	0.04	0.63	<0.001	1.46
07-14T19:17—07-15T19:17	降雨后 After rainfall	1.05	0.09	0.80	<0.001	2.53
08-01T14:45—08-02T14:45	降雨前 Before rainfall	2.16	0.05	0.86	<0.001	1.58
08-02T15:55—08-03T15:55	降雨后 After rainfall	1.27	0.06	0.85	<0.001	1.79
08-06T15:11—08-07T15:11	降雨前 Before rainfall	1.88	0.05	0.79	<0.001	1.64
08-07T17:19—08-08T17:19	降雨后 After rainfall	2.16	0.01	0.03	0.41	1.12
09-19T21:00—09-20T21:00	降雨前 Before rainfall	1.82	0.04	0.50	<0.001	1.42
09-20T22:00—09-21T22:00	降雨后 After rainfall	2.35	0.02	0.71	<0.001	1.22

表3 强降雨的前后土壤呼吸(Rs)速率与5 cm 土壤温度 T_5 、5 cm 土壤含水量 W_5 指数关系模型($R_s = ae^{bT_5}c^{W_5}$)

Tab.3 Exponential relationship between soil respiration (Rs) rate and soil temperature at 5 cm depth (T_5) as well as soil water content at 5 cm depth (W_5) before and after each of the strong rainfalls ($R_s = ae^{bT_5}c^{W_5}$)

降雨事件 Rainfall event	降雨过程 Rainfall process	参数 Parameters					Q_{10}
		a	b	c	R^2	P	
07-13T14:44—07-14T14:44	降雨前 Before rainfall	1.23	0.04	5.44	0.68	<0.001	1.47
07-14T19:17—07-15T19:17	降雨后 After rainfall	1.94	0.08	0.38	0.85	<0.001	2.32
08-01T14:45—08-02T14:45	降雨前 Before rainfall	3.03	0.05	0.36	0.88	<0.001	1.58
08-02T15:55—08-03T15:55	降雨后 After rainfall	4.24	0.03	0.23	0.89	<0.001	1.42
08-06T15:11—08-07T15:11	降雨前 Before rainfall	5.45	0.05	0.05	0.84	<0.001	1.66
08-07T17:19—08-08T17:19	降雨后 After rainfall	28.90	0.01	0.03	0.78	<0.001	1.12
09-19T21:00—09-20T21:00	降雨前 Before rainfall	1.01	0.04	6.55	0.56	<0.001	1.44
09-20T22:00—09-21T22:00	降雨后 After rainfall	1.71	0.02	2.07	0.74	<0.001	1.22

3 讨 论

3.1 强降雨对土壤呼吸的影响

影响 R_s 的生物因子(如土壤微生物群落、地表植被等)和非生物因子(如温度、水分、土壤理化性质、近地面大气等)之间是相互作用、相互影响的^[29]。降雨首先改变与土壤呼吸相关的气象因素,而后改变土壤的通气状况、呼吸底物的组成和有效性以及植物根系及土壤微生物的生理活性来影响土壤呼吸^[30-32]。降雨对 R_s 的影响是极为复杂的过程,生态系统的植被覆盖变化、土壤水分状况改变以及降雨强弱的变化都会对 R_s 产生不同的影响。相对于 R_s 来说,最优的土壤水分状况通常是最接近最大田间持水量,而当土壤处于过干或者过湿状态时, R_s 均会受到抑制^[33]。我们的研究表明雨季中期的两次强降雨后,土壤含水量激增(图1c、d), R_s 受到了极大的抑制,而后随着土壤含水量的下降, R_s 逐步恢复。当土壤含水量超过田间持水量时,土壤水分处于过饱和状态, R_s 会随着土壤水量的增加而下降^[15-17,34]。一般而言在干湿交替季节的生态系统中相对干旱的季节中,降雨会强烈的激发 R_s ^[18-19,35-36]。在我们的研究中,雨季结束后的强降雨使得 R_s 表现出了短时的促进作用(图1e、f), R_s 在降雨后明显增强的原因包括:水分在土壤孔隙下渗和侧渗的过程中,水分会取代土壤孔隙中气体所占据的位置,包括 CO_2 等气体在短时间内会被迅速排出;降雨后土壤水分的迅速增加会促进微生物的活动,而且会使微生物的生物量激增, R_s 因此迅速增大^[20-21]。

由植物根系的自养呼吸(R_a)和土壤微生物分解土壤有机碳而形成异养呼吸(R_h)这两部分构成的土壤呼吸占土壤总呼吸的90%以上^[3]。这两部

分的活动都受到土壤水分的影响,然而由于其所依赖的生物化学过程的不同,导致他们对水分变化有着不同的响应^[28]。首先,根呼吸可以依据能量的分配,划分为根生长呼吸、根维持呼吸和根离子吸收呼吸。水分通过促进或者抑制根的生长、影响土壤中离子的可利用性和可移动性等方面来改变根呼吸。其次,土壤水分的变化一方面通过改变含碳底物的可利用性、胞外酶的活性以及土壤中的氧气的分布等途径,直接地影响土壤微生物的代谢过程,改变土壤异养呼吸。另一方面,水分的变化还可以带来土壤中微生物群落组成的改变,进而间接地影响土壤异养呼吸的大小。以往的研究表明,在土壤水分条件改变时, R_a/R_h 的比例往往也会随之变化^[37]。在我们的研究中,也同样观察到了 R_a 、 R_h 对水分响应的不同步现象。首先, R_h/R_s 、 R_a/R_s 在一天当中存在着明显的日周期(图2)。然而瞬时强降雨会打破这种日周期,导致 R_h 的比例急剧下降(图2b)。这可能是由于,当土壤含水量过大时,土壤处于嫌气状态,好氧微生物的活动受到限制,微生物的活性和土壤有机质的分解都受到了极大的抑制^[38-39]。此时 R_h 接近停滞,而 R_a 受到的影响较小(图1d),导致 R_h 的比例骤降。值得注意的是,不同的降雨强度带来的 R_a 、 R_h 比例的变化不同。在雨季初期(图2a)和雨季末期(图2c)的两次降雨事件之后,都没有出现 R_h 比例骤然下降的现象。这可能是由于这两次降雨的量和强度都远小于雨季中期降雨事件,从而使变化过程趋于缓和。而且,中等强度的降雨相同程度地促进了 R_a 、 R_h (图1b、1f),导致二者的比例没有出现太大的变化。

3.2 强降雨前后影响土壤呼吸的关键环境因子

降雨不仅直接影响土壤呼吸过程本身,而且还通过改变土壤呼吸的温度敏感性进而间接地影响土

壤呼吸。以往的研究表明,土壤微生物是通过分泌胞外酶来分解土壤有机质,而胞外酶需要附着在土壤颗粒表面的水膜进行扩散,进而与土壤中可溶性的含碳底物相结合^[40]。因此,在这种情况下,土壤水分的提高会增加土壤呼吸的温度敏感性。然而,当土壤水分进一步提高,水分会限制土壤中的 O_2 的扩散^[36],使土壤形成厌氧状态,此时植物根系和土壤微生物的活性都会受到不同程度的抑制,从而使土壤呼吸的温度敏感性随着土壤水分的上升而降低。由此可见,土壤呼吸的温度敏感性对土壤水分的响应并不是一个简单的线性过程,而是受到诸如土壤温度、土壤孔隙度、植物和微生物的多样性等多方面因素的共同影响。在前两次的降雨事件中,强降雨使土壤水分含量上升(图1a),土壤呼吸的温度敏感性也随之提高(表2)。然而,当第3次降雨事件使土壤含水量提升至超过75%的时候(图1c),水分对土壤呼吸温度敏感性的抑制作用开始占主导地位,尤其是对异养呼吸的抑制更为显著(图2b)。而到了第4次强降雨,尽管土壤水分的变化幅度和第1次降雨时相类似, Q_{10} 反而降低了。这可能是由于在生长季的末期,植物根系和微生物群落都发生了较大的改变导致的,而更具体原因的阐释还有待进一步的研究。

为了更准确地反应土壤温度和土壤水分对土壤呼吸的协同影响,在传统 Q_{10} 方程的基础上我们引用了加入土壤水分修正系数的指数方程(3)^[28]。在模型中加入土壤水分的信息,的确提高了模型对土壤呼吸的拟合优度(R^2)(表3),尤其是在第3次降雨事件之后,模型的 R^2 由0.03提高至0.78。这一现象表明,当土壤含水量升高,逐渐偏离某一最优状况(如最大田间持水量)的时候,水分对土壤呼吸的影响增大,而温度对土壤呼吸的影响减小。甚至在第3次降雨事件之后,出现了土壤温度对土壤呼吸的影响不显著,而完全受土壤水分控制的极端情况。这一结果表明,不仅仅是在干旱时期^[41],在极端降雨事件之后,土壤水分也会超越土壤温度成为土壤呼吸的主要控制因子。

降雨不仅改变了土壤呼吸的温度敏感性,而且还影响土壤呼吸的水分敏感性。我们的结果表明,降雨事件发生后,土壤呼吸的水分敏感性都不同程度地降低了(表3),即在干旱条件下(降雨前),土壤呼吸的水分敏感性更高,而在较湿润的条件下(降雨后),土壤呼吸的水分敏感性更低。在季节间比较也可以发现,在雨季的开始和结束时,土壤呼吸的水分敏感性较高,而雨季中期的水分敏感性较低。降雨通过何种机理改变水分敏感性,至今仍未完全

阐明,但仍然存在这两种可能的解释。首先,降雨过后土壤含水量的变化会导致土壤中微生物群落的变化,尤其是真菌和细菌的组成比例的变化^[42]。而真菌和细菌在分解有机质的时候所需要的水分是存在差异的,由此,土壤呼吸的水分敏感性会发生变化。另外,在较干旱的条件下,植被为了提高其水分利用效率,会促进细根的生长^[43],而根生物量的不同也同样会影响土壤呼吸的水分敏感性^[44]。

4 结 论

强降雨导致土壤含水量在降雨后激增,对土壤温度也有不同程度的影响。雨季初期强降雨对 R_s 的扰动作用相对较小,强降雨并未改变由主要由土壤温度影响下的 R_s 的日变化周期;而在雨季时,强降雨改变了 R_s 的日变化周期、抑制了 R_s ;在雨季结束后,强降雨可促进 R_s 。在雨季不同时期的强降雨均不同程度的影响了 R_h/R_s 的比例,相对于 R_a ,短时的强降雨对 R_h 的抑制作用更强。可见土壤呼吸的不同组分对土壤水分的响应程度不同。土壤呼吸强度由土壤温度和水分两种环境因子协同影响,但强降雨可影响甚至改变控制 R_s 的关键环境因子。因此在某种环境因子发生变化时,影响土壤呼吸的关键因子是变化的,不应只考虑单一环境因子的影响。

加入水分修正系数 c 的 R_s 与 T_s 、 W_s 指数关系模型可更好的表征土壤含水量和土壤温度对土壤呼吸影响,不同雨季时期的强降雨对均对土壤的温度敏感系数 Q_{10} 有着明显的影响。强降雨使得土壤对于水分的敏感性降低,处于雨季不同时期的土壤水分敏感性表现为: c (雨季中期) $<c$ (雨季前期) $<c$ (雨季结束期)。在土壤呼吸拟合模型中不能只考虑单一变量的影响,而应综合考虑各变量的影响和影响模型的主要因子,从而提高模型的拟合优度。

参 考 文 献

- [1] COX P M, BETTS R A, JONES C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon: cycle feedbacks in a coupled climate model[J]. *Nature*, 2000, 408: 184-187.
- [2] LUO Y Q, ZHOU X H. Soil respiration and the environment[M]. Academic Press, 2010.
- [3] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81-99.
- [4] JOBBAGY E G, JACKSON R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [5] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298: 156-159.

- [6] 邓东周, 范志平, 王红 等. 土壤水分对土壤呼吸的影响[J]. 林业科学研究, 2009, 22(5): 722-727.
DENG D Z, FAN Z P, WANG H, et al. Influences of soil moisture on soil respiration[J]. Forest Research, 2009, 22(5): 722-727.
- [7] JASSAL R S, BLACK T A, NOVAK M D, et al. Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand [J]. Global Change Biology, 2008, 14(6): 1305-1318.
- [8] CRAINE J M, FIERER N, MCLAUCHLAN K K. Widespread coupling between the rate and temperature sensitivity of organic matter decay[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(12): 854-857.
- [9] 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: 2202-2205.
- [10] PACHAURI R K, ALLEN M R, BARROS V R, et al. Climate change 2014: synthesis report [R]. Geneva: Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2014.
- [11] FIELD C B. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [12] MOSLEY P M. Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand [J]. Water Resources Research, 1979, 15(4): 795-806.
- [13] 李耀明, 王玉杰, 储小院 等. 降雨因子对缙云山地区典型森林植被类型地表径流的影响[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 244-249.
LI Y M, WANG Y J, CHU X Y, et al. Effects of the rainfall factors on surface runoff of typical forest vegetations in three gorges region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(4): 244-249.
- [14] 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.
CHEN Q S, LI L H, HAN X G, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 23(5): 972-978.
- [15] KURSART A. Evaluation of soil respiration and soil CO₂ concentration in a lowland moist forest in Panama [J]. Plant and Soil, 1989, 113(1): 21-29.
- [16] CAVELIER J, PENUOLA M C. Soil respiration in the cloud forest and dry deciduous forest of Serrania de Macuira, Colombia [J]. Biotropica, 1990, 22(4): 346-352.
- [17] DAVISON E A, VERCHOT L V, CATTNIO J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. Biochemistry, 2000, 48(1): 53-69.
- [18] SINGH J S, GUPTA S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems [J]. The Botanical Review, 1977, 43(4): 449-528.
- [19] HOLT J A, HODGEN M J, LAMB D. Soil respiration in the seasonally dry tropics near Townsville, North-Queensland [J]. Soil Research, 1990, 28(5): 737-745.
- [20] ANDERSON J M. Carbon dioxide evolution from two temperate, deciduous woodland soils [J]. Journal of Applied Ecology, 1973, 10(2): 361-378.
- [21] ORCHARD V A, COOK F J. Relationship between soil respiration and soil moisture [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1983, 15(4): 447-453.
- [22] COOK F J, ORCHARD V A. Relationships between soil respiration and soil moisture [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(5): 1013-1018.
- [23] 张红星, 王效科, 冯宗炜 等. 黄土高原小麦田土壤呼吸对强降雨的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6189-6196.
ZHANG H X, WANG X K, FENG Z W, et al. The great rainfall effect on soil respiration of wheat field in semi-arid region of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6189-6196.
- [24] 金冠一, 赵秀海, 康峰峰 等. 太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1832-1841.
JIN G Y, ZHAO X H, KANG F F, et al. The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1832-1841.
- [25] LIU B Q, MOU C C, YAN G Y, et al. Annual soil CO₂ efflux in a cold temperate forest in northeastern China: effects of winter snowpack and artificial nitrogen deposition [J/OL]. Scientific Reports, 2016 [2015-10-15]. DOI: 10.1038/srep18957.
- [26] VANT HOFF J H. Études de dynamique chimique [M]. Amsterdam: Frederik Muller & Company, 1884.
- [27] LLOYD J, TAYLOR J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315-323.
- [28] GULLEDGE J, SCHIMMEL 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.
- [29] YANG J Y, WANG C K. Partitioning soil respiration of temperate forest ecosystems in northeastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1640-1646.
- [30] GESTEL M V, 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.
- [31] MILLER A E, SCHIMMEL 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.
- [32] 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.
- [33] KUCERA C L, KIRKHAM D R. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri [J]. Ecology, 1971, 52(5): 912-915.
- [34] REICHSTEIN M, REY A, FREIBAUER A, et al. Modeling temporal and large-scale variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices [J]. Global Biogeochemistry Cycles, 2003, 17(4): 1104-1119.
- [35] LAVIGNE M B, FOSTER R J, GOODINE G. Seasonal and annual changes in soil respiration in relation to soil temperature,

- water potential and trenching [J]. *Tree Physiology*, 2004, 24: 415–424.
- [36] 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 [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217–227.
- [37] NIKOLOVA P S, RASPE S, ANDERSEN C P, et al. Effects of the extreme drought in 2003 on soil respiration in a mixed forest [J]. *European Journal of Forest Research*, 2009, 128(2): 87–98.
- [38] MERILÄ P, OHTONEN R. Soil microbial activity in the coastal Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) forests of the Gulf of Bothnia in relation to humus-layer quality, moisture and soil types [J]. *Biology and Fertility Soils*, 1997, 25(4): 361–365.
- [39] COOK R J, PAPENDICK R I. Soil water potential as a factor in the ecology of *Fusarium roseum* f. sp. *cerealis* 'Culmorum' [J]. *Plant and Soil*, 1970, 32(1): 131–145.
- [40] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 2006, 440: 165–173.
- [41] XU M, QI Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(3): 687–696.
- [42] ZHANG W, PARKER K M, LUO Y, et al. Soil microbial responses to experimental warming and clipping in a tallgrass prairie [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 266–277.
- [43] LIMA T T S, MIRANDA I S, VASCONCELOS S S. Effects of water and nutrient availability on fine root growth in eastern Amazonian forest regrowth, Brazil [J]. *New Phytologist*, 2010, 187(3): 622–630.
- [44] JIANG H, DENG Q, ZHOU G, et al. Responses of soil respiration and its temperature/moisture sensitivity to precipitation in three subtropical forests in southern China [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(6): 3963–3982.

(责任编辑 范娟
责任编委 赵秀海)