不同生长时期极端降水事件对人工针叶林净生产力的影响
——以江西省吉安市千烟洲生态试验站为例

陈 晨[1]，贾 畅[2]，王晶苑[3]，唐亚坤[1,4]，陈云明[1,4]

（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 林学院，陕西 杨凌 712100；3.中国科学院 地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟院重点实验室，北京 100101；4.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室，陕西 杨凌 712100）

摘 要：[目的] 研究不同生长时期极端降水事件对生态系统碳通量的影响，为准确评估江西省吉安市千烟洲人工针叶林生态系统应对极端天气的响应机制提供理论基础。[方法] 对比 2008 年与 2010 年植物生长初期(4 月)与生长旺盛期(6 月)碳通量对环境因子(净辐射 RN、温度 TA、土壤含水量 SWC 与增强型植被指数 EVI)变化的响应差异。[结果] 4 月份净生态系统生产力(NEP)降低 22.87%，主要是初级生产总量和生态系统呼吸分别降低 17.36%〔GEP，9.56 g/(m² · d)〕和 2.84%〔RE，2.86 g/(m² · d)〕导致，而 6 月份 GEP 降低 3.58%〔7.17 g/(m² · d)〕以及 RE 增长 12.8%〔20.37 g/(m² · d)〕导致 NEP 降低 65.77%〔27.55 g/(m² · d)〕。[结论] 生长季初期 TA 降低对 RE 的抑制大于土壤含水量增加的影响，而生长旺盛期土壤含水量增加则会抵消降温对呼吸的抑制，造成更大的碳损失，因此后续研究森林生态系统碳通量对极端气候响应时还需要考虑植物生长时期的影响。

关键词：极端降水现象；亚热带人工针叶林；碳通量；环境因子；通径分析

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)02-0317-08 **中图分类号**：S718.5

文献参数：陈晨，贾畅，王晶苑，等.不同生长时期极端降水事件对人工针叶林净生产力的影响[J].水土保持通报，2020，40(2)：317-324. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.045；Chen Chen，Jia Chang，Wang Jingyuan，et al. Effects of extreme precipitation events at different growth stages on net productivity of artificial coniferous forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(2)：317-324.

Effects of Extreme Precipitation Events at Different Growth Stages on Net Productivity of Artificial Coniferous Forest
—A Case Study of Qianyanzhou Ecological Experimental Station in Ji'an City of Jiangxi Province

Chen Chen[1], Jia Chang[2], Wang Jingyuan[3], Tang Yakun[1,4], Chen Yunming[1,4]

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3. *Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*; 4. *Stake Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of extreme precipitation events on ecosystem carbon flux in different growth periods were studied, in order to provide a theoretical basis for accurately assessing the response mechanism of an artificial coniferous forest ecosystem to extreme weather at Qianyanzhou of Ji'an City, Jiangxi Province. [Methods] The response of carbon flux to changes in environmental factors (net radiation RN, temperature TA, soil water content SWC, and enhanced vegetation index EVI) in the early growth period (April) and flourishing period (June) in 2008 and 2010 were compared. [Results] The net ecosystem productivity (NEP) decreased by 22.87% in April, mainly due to a decrease of 17.36% 〔GEP, 9.56 g/(m² · d)〕 in total

收稿日期：2019-11-07 **修回日期**：2020-03-21

资助项目：国家重点研发计划项目“黄土丘陵沟壑区植被功能提升与山地果园管理关键技术及示范”(2016YFC0501703)；国家自然科学基金项目“抚育间伐调控黄土丘陵区刺槐人工林水分养分机理研究”(41771556)；陕西省水保局研发项目“秦巴山地坡面近自然水土保持关键技术集成与示范”(2017sbkj-01)

第一作者：陈晨(1994—)，男(汉族)，山西省临汾市人，硕士研究生，研究方向为植物生理生态。Email：18329685399@163.com。

通信作者：陈云明(1967—)，男(汉族)，陕西省渭南市人，研究员，博士生导师，主要从事植被生态与水土保持研究。Email：ymchen@ms.iswc.ac.cn。

primary production and 2.84% [RE, 2.86 g/(m² · d)] in ecosystem respiration by 17.36% [GEP, 9.56 g/(m² · d)]. While in June, a decrease of 3.58% [7.17 g/(m² · d)] in GEP and an increase of 12.8% [20.37 g/(m² · d)] in RE, led to a decrease of 65.77% [27.55 g/(m² · d)] in NEP. [Conclusion] The inhibition of RE caused by the reduction of TA at the early growing season was greater than that caused by the increase of soil moisture content, while the increase in soil moisture during the flourishing period would offset the inhibition of cooling on respiration, resulting in greater carbon loss. Therefore, the impacts of carbon flux on extreme climate should also be considered in future studies.

Keywords: extreme precipitation events; subtropical coniferous plantation; carbon flux; environmental factors; path analysis

全球变暖背景下,极端气候事件发生频率快速增加[1],通过多个大气循环模型预测,极端降水事件发生频率也将增加[2],目前已经成为研究热点之一。而由于陆地生态系统的适应能力有限并且敏感性较强,极端气候事件能够对其造成更为严重的破坏。碳循环过程作为驱动生态系统变化的关键因子,与生态系统水循环、养分循环和生物多样性有着密切的耦合关系[3]。因此,碳循环过程的变化能够综合体现出陆地生态系统对极端气候事件的响应过程。我国人工林面积居世界首位,其碳循环过程变化将严重影响全国生态系统碳循环,而南方人工林占全国人工林面积的54.3%,因此准确分析人工林生态系统碳通量对极端降水事件的响应过程,有助于完善生态系统对极端气候的响应机制,为评估人工林适应气候变化的能力提供重要科学依据。极端降水事件主要表现出降水(precipitation, *P*)增多,气温(air temperature, TA)降低,伴随着净辐射(net radiation, RN),土壤含水量(soil water content, SWC)等环境因子的变化。净生态系统生产力(net ecosystem production, NEP)是在生态系统总初级生产力(gross ecosystem production, GEP)的基础上减去生态系统呼吸(ecosystem respiration, RE)消耗,成为评价生态系统碳吸收能力的关键指标[4]。GEP 与 RE 对环境因子变化的响应程度与方式可能会有所不同,但两者都受温度与降水的影响,尤其在生长季初期更为敏感,初期降水与温度变化能够影响植物旺盛生长季的碳通量[5]。已有研究[6]表明,在温带与寒带地区,春季气温是影响加拿大道格拉斯冰原碳平衡年际变化的重要因素。另外降水通过影响土壤含水量进而影响生态系统碳通量,影响程度受植物生长时期对水分需求的调控。净生态系统生产力在不同生长时期对降水与温度变化的响应存在差异[7],土壤含水量不足能够限制植物的光合作用与呼吸作用。目前分析极端气候影响的研究多集中于单个因素,如生长季初期低温,降水的滞后效应,以及生长旺盛时期水分匮乏[8]的影响,但实际植物与大气之间碳交换过程受辐射、温度、水分等多种因子的共同控制,不同生长时期可能存在多个因素的作用相互抵消,而且目前有关生态系统碳循环对极端降水响应方面的研究主要集中于草地生态系统,主要通过增水控制试验途径进行,集中于森林生态系统的研究较少。因此人工针叶林不同生长发育时期碳通量对极端降水事件的响应差异,对完善极端天气下人工林生态系统的响应与适应机制有重要意义。

江西省吉安市千烟洲人工针叶林占该区亚热带森林总面积的 41%,易受极端降水事件影响,在 2010 年 4,6 月份发生两次较为明显的极端降水事件,其降水量是 2008 年同时期的 4.01 与 1.76 倍[9],为研究该地碳通量如何响应极端降水事件提供了基础条件。由于 2009 年是中度厄尔尼诺年,因此本研究主要以 4,6 月份两次极端降水事件与 2008 年同一时间对比,分析千烟洲人工针叶林生长初期与生长旺盛时期碳通量对极端降水事件的响应。主要研究目标为分析不同生长时期碳通量对极端降水事件的响应差异,探讨不同时期控制碳通量的主要环境因素,旨在阐明人工针叶林生态系统碳循环过程对极端降水事件的响应与适应机制,为准确评估气候变化背景下人工针叶林净生产力提供充足的理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究站点位于江西省吉安市千烟洲生态试验站(26°44′29″N,115°03′29″E,海拔 102 m),属于典型红壤丘陵区,常年受亚热带季风气候影响,冬季主要风向为西北偏北,夏季东南偏南。人工林林龄为 30 a 左右,主要树种为马尾松(*Pinus massoniana*),杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和湿地松(*Pinus elliottii*),冠层高度为 12 m;林下植被灌木有黄端木(*Adinandra millettii*)、米饭花(*Vaccinium sprengelii*)等;草本有狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*),暗鳞鳞毛蕨(*Dryopteris atrata*)等,植被覆盖率在 90%以上。成土母质多为红色砂岩、砂

砾岩或泥岩,土壤机械组成为 2.0～0.05 mm(17%),0.05～0.002(68%)与 0.002(15%)[10]。根据 1989—2010 年千烟州的气象观测,年平均气温为 18.0 ℃,年平均降水量为 1 509.0 mm,而 3—10 月份的温度与降水量为 23.9 ℃和 1 050 mm。本研究使用 2008 与 2010 年的通量数据进行对比分析,2010 年 4 月与 6 月分别发生极端降水事件,以 2008 年相同时间作为对照。

1.2　通量和气象观测的仪器设备

本研究所使用的观测数据取自位于试验站西南部上松塘的微气象观测塔上的开路式涡度相关系统(OPEC),系统安装在大约 3 倍冠层高度(39.6 m)处,主要由开路红外 CO_2/H_2O 气体分析仪(型号 Li-7500, licorInc Lincoln, Nebraska)、三维超声风速仪(型号 CSAT3, Campbell Scientific Inc., Logan Utah)和数据采集器(型号 CR5000, Campbell Scientific Inc)构成。原始数据频率为 10 Hz,数据采集器(型号 CR5000, Campbell Scientific Inc., Logan Utah)在采集实时数据的同时计算通量数据 30 min 的平均值并进行存储。

空气温度与相对湿度传感器(型号 HMP45C, Campbell)安装在高度为 23.6 m 的防辐射罩内。使用 TDR 探针(型号 CS615-L, KIPP&Zonen)测量 5 cm 深度的土壤含水量。使用量子传感器(型号 Li190SB, Licor Inc.)观测净辐射量,降雨量用雨量计(型号 52203, RM Young Inc., USA)监测。使用 3 个 CR10X 数据采集器采集 1 Hz 的上述环境变量数据,记录并存储 30 min 的平均数据。由于系统故障导致常规气象数据缺失的部分则采用滑动平均法插补,详细站点及数据材料描述见宋霞[11]的研究。

该观测系统从 2002 年 8 月开始正式运行,至今运行良好,本研究选取 2008—2010 年 4,6 月份 CO_2 通量及小气候数据进行分析。

1.3　通量数据处理

本研究使用千烟洲通量观测系统获取的 2008—2010 年 3 a 的 30 min 碳水通量数据。仪器、下垫面等因素变化会导致数据的缺失和异常数据的产生。因此为获得连续且有效的半小时数据,需对原始半小时通量数据进行预处理。具体处理步骤为:①坐标轴旋转(去除地形坡度的影响);②WPL 校正(去除水热传输引起的 CO_2 通量变化);③储存项计算;④数据筛选,从数据集中删除由于降雨,水凝结或者系统故障引起的异常数据。为避免在夜间稳定条件下可能低估通量,剔除夜间摩擦风速低于临界摩擦风速(u^*, 0.2 m/s)时的通量观测数据;⑤数据插补,数据质量控制导致数据缺失部分使用线性内插法插补[12]。

1.4　遥感植被指数

本研究使用增强型植被指数(EVI)描述植被生长和植被活动特征,该指数综合大气阻抗植被指数和土壤修正植被指数的优势,减小土壤背景的变化以及大气的干扰,作为植被状况对极端气候事件的响应指标被广泛使用。本研究使用 Oklahoma 大学 Earth Observation and Modeling 研究组提供的 8 d 尺度 500 m 分辨率的 MODIS 光谱数据计算 EVI(http://www.eomf.ou.edu/visualization/manual/)。

1.5　统计分析

2010 年 4,6 月降水量为 513.6 和 419.4 mm,分别是参考年份 4,6 月平均降水量的 3.99 和 1.76 倍,因此将 2010 年 4,6 月视为极端降水事件的代表月份。由于 2019—2010 年期间,厄尔尼诺现象向拉尼娜现象转变,且在 2009 年 7 月份之前降水均小于月平均降水量,因此本研究选择正常年份 2008 年对应月份数据作为参考。首先使用 SPSS 12.0 进行数据的正态分布与齐次性检验,与参考年 4,6 月份日尺度气象与通量数据进行相关性分析以及差异显著性检验,使用 Origin 9.2 绘图。

1.6　通径分析

通径分析能够分析环境和生物因素对 NEP 的控制机制,其以多元回归为基础,不仅能够建立自变量与因变量之间的控制路径,还能区分出自变量对因变量的直接和间接控制作用[13]。直接通径系数表示为环境因子对碳通量的直接影响程度,而间接通径系数为某一环境因子影响另一环境因子进而影响碳通量。总通径系数是直接通径系数和间接通径系数的加和值。本研究通径分析中使用的初始变量包括 RN, TA,SWC 与 EVI。为了确保通径分析的可靠性,首先采用逐步多元回归分析来选择进入最终方程的自变量($p<0.05$)。然后使用 Amos(2003, ver. 5.0; SPSSS Inc.)对所选变量进行通径分析,以解释自变量对 GEP 和 RE 的直接与间接控制机制,并删除不显著的路径($p<0.05$)。

2　结果与分析

2.1　环境因素与 EVI 对极端降水事件的响应

由图 1 可以看出,2008 与 2010 年,年均温 TA 与降水量 P 分别为 18.41 ℃和 1 332.9 mm,以及 18.37 ℃和1 854.3 mm,2010 年较高的降雨量主要是由于 4 月(513.6 mm)和 6 月(419.4 mm),相较于 2008 年分别增加了 299.69%与 76.07%。进一步分析表

明，与 2008 年相比，4 月份 RN 减少 41.02%，6 月份减少 31.61%，主要是由于极端降水事件发生时期云层增厚导致净辐射降低，而降水的增加直接导致温度降低与土壤含水量增加，2010 年 4 月，6 月份温度分别降低 15.97%和 8.43%，SWC 分别增加 18.76%和 22.91%，EVI 分别减少 32.62%和 9.28%（$p<0.001$）。

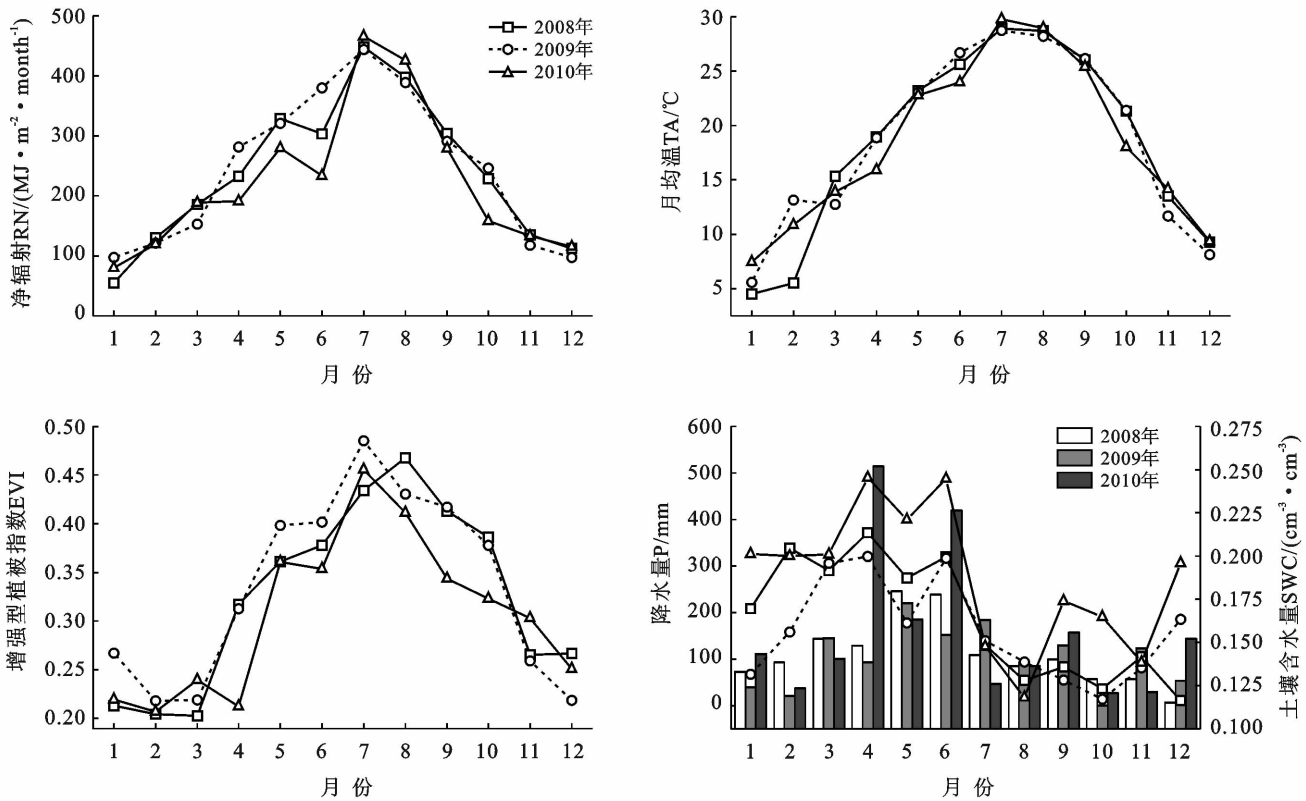


图 1 研究区月尺度净辐射（RN）、温度（TA）、EVI、降水与土壤含水量（SWC）的变化

2.2 CO_2 通量的日变化及其影响因素

由图 2 可以看出，与 2008 年 4 月相比，由于极端降水事件的发生，2010 年 4，6 月份 NEP 均降低。配对样本 T 检验分析表明，4 月份 GEP 降低 0.71%，主要发生在第 5～10 d，在第 14 d 达到最低点，RE 减少 2.84%，在第 6～10 d，13～19 d 均低于参考月份，且在第 15 d 达到最低值，4 月份 NEP 降低 22.87%，减少主要集中在第 1～8 d。逐步线性回归分析显示，NEP，GEP 与 RN 显著正相关（$R^2>0.85$，$N=30$，$p<0.001$），RE 与 TA 显著正相关（$R^2=0.65$，$N=30$，$p<0.001$），此时生态系统碳通量主要受到能量影响。与 2008 年 6 月份相比，2010 年 6 月份日尺度 GEP 降低 3.57%，降低主要集中于 13 d 之后，而 RE 上升 9.4%，在 13 d 之后均高于参照月份，NEP 降低 66.77%，也同样在 13 d 之后降低。生态系统碳损失率则由 0.79 显著增加为 7.76（$p<0.001$，$N=30$）。逐步回归分析显示，NEP，GEP 与 RN 显著正相关（$R^2>0.65$，$N=30$，$p<0.001$），RE 与 SWC 负相关，与 TA 显著正相关（$R^2=0.73$，$N=30$，$p<0.01$），6 月份 RE 同时受到水分与能量影响。

通径分析结果表明（图 3），参考年 4 月份 GEP 与 RN 的相关性最大（直接通径系数为 0.81），与 EVI 直接通径系数为 0.21，SWC 与 GEP 呈负相关（−0.20），在 2010 年 4 月份 GEP 与 RN 的直接通径系数为 0.93，与 EVI 直接通径系数为 0.17。对照组 6 月份 GEP 主要受 RN，TA 与 SWC 的共同作用，其中 RN 为影响 GEP 的主要影响因素，直接通径系数为 0.811，GEP 还受到 TA 与 SWC 的负作用，且直接通径系数为−0.23 与−0.37，共同解释 0.84 的 GEP 变化量，2010 年 6 月份主要受到 RN 的作用，通径系数为 0.90 而且解释量变为 0.82。

由图 4 可知，参考年 4 月份日尺度 NEP 与 RN，EVI 正相关（直接通径系数为 0.77 与 0.11），与，SWC 负相关（−0.09），2010 年 4 月份 NEP 主要受到 RN 影响（0.93），同时受到 TA 的负作用（−0.13）。2008 年 6 月份 NEP 与 RN 正相关（0.75），TA 与 SWC 则负相关（−0.40 与−0.43），2010 年 6 月份期间，直接通径系数的绝对值均减小，RN 变为 0.81，TA 变为−0.27，SWC 为−0.34，同时 NEP 的解释量由 0.91 变为 0.84。

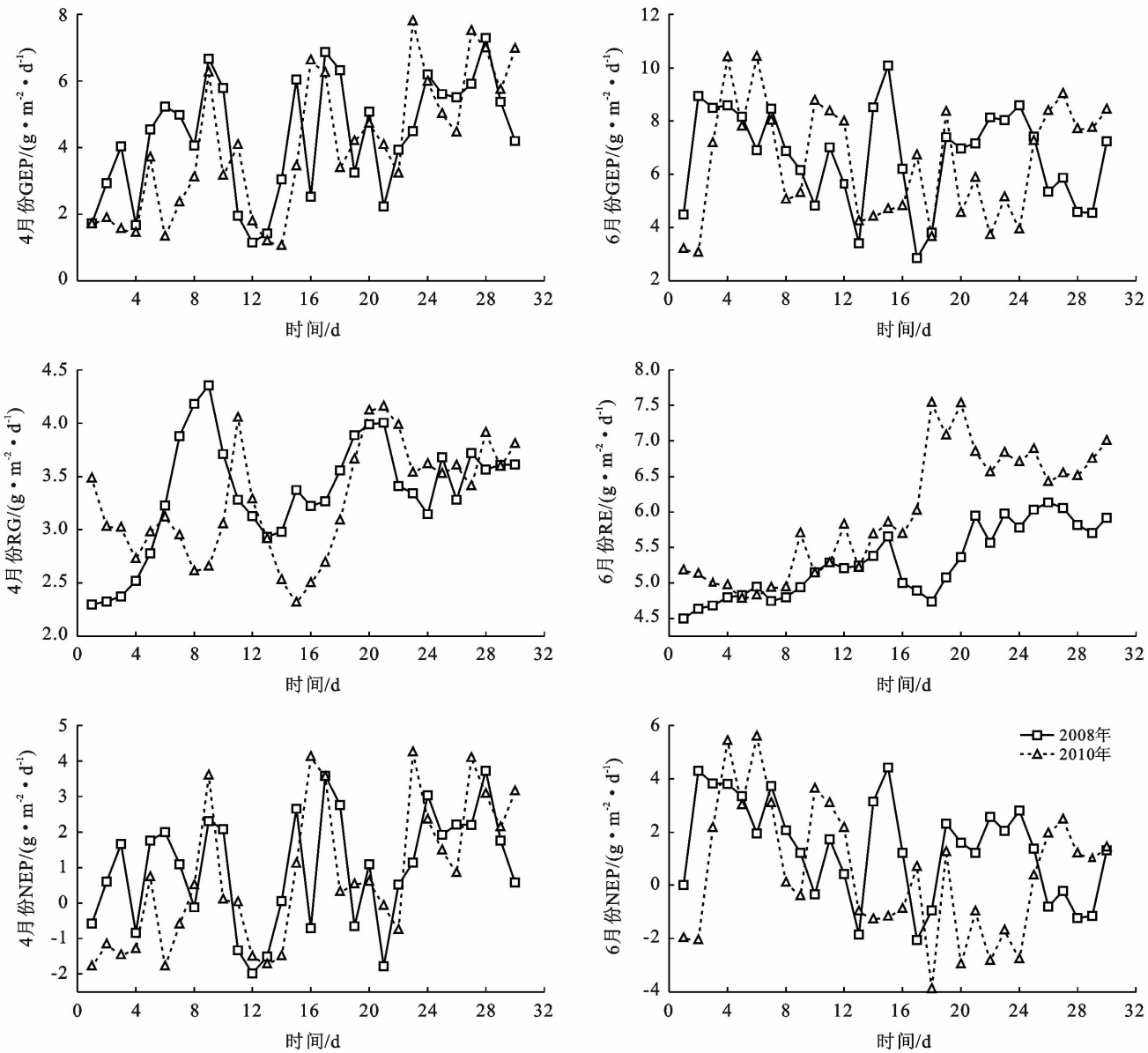
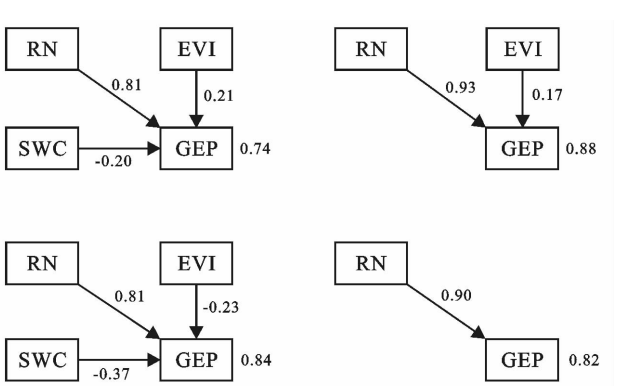


图 2　研究区 2008 年与 2010 年 4,6 月天尺度 GEP,RE 和 NEP 对比



注:A,C 代表 2008 年 4 月,6 月份;B,D 代表 2010 年 4 月,6 月份。下同。

图 3　研究区环境因子 RN,SWC,EVI 与 GEP 关系的路径分析

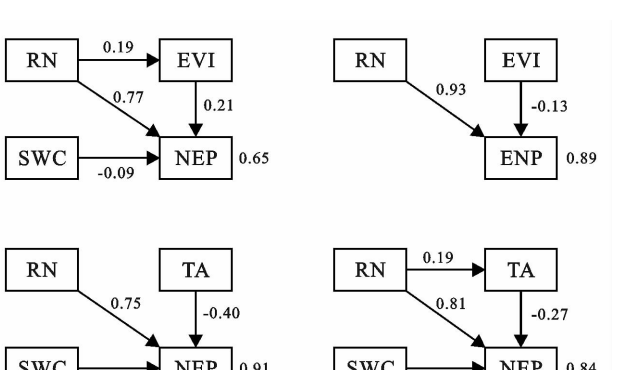


图 4　研究区环境因子 RN,TA,SWC 与 NEP 关系的路径分析

由图 5 可知,2008 年 4 月份 RE 主要受 TA 的影响(直接通径系数为 0.79),其次受 SWC 与 EVI 的影响(直接通径系数分别为 0.15 与 0.24)。2010 年 4 月份 TA 为 RE 的主要影响因素(直接通径系数为 0.72)也同样受到 EVI(0.25)与 SWC(0.30)的影响。2008 年 6 月份,EVI 对 RE 的直接通径系数为 0.61,

TA 与 SWC 通径系数分别为 0.32 与 0.24。2010 年 6 月份，EVI 对 RE 的通径系数减小为 0.16，TA 则上升为 0.51，同时 SWC 则以 0.79 的直接通径系数成为 RE 的主要影响因素。由表 1 可看出，在 2008 年 4 月，SWC 分别与 GEP，RE，NEP 显著负相关（$R^2>0.25$，$p<0.01$，$N=30$），在 2010 年 4 月极端降水之后，与 RE 相关性不明显（$N=30$），在 2008 年 6 月份，SWC 与 GEP 与 NEP 显著负相关（$R^2>0.35$，$p<0.01$，$N=30$），但与 RE 相关性不显著，在 2010 年 6 月时则显著正相关（$R^2=0.55$，$p<0.01$，$N=30$）。

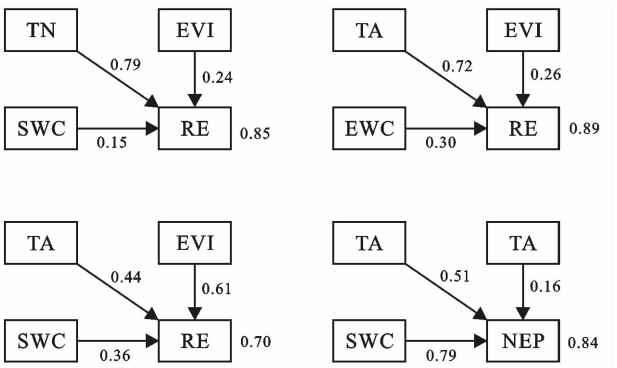


图 5 环境因子 TA，EVI，SWC 与 RE 关系的路径分析图

表 1 2008 年与 2010 年 4，6 月份土壤含水量与 GEP，RE 与 NEP 的相关性分析

月份	2008 年			2010 年		
	GEP	RE	NEP	GEP	RE	NEP
4	−0.605**	−0.551**	−0.486**	−0.48**	−0.109	−0.477**
6	−0.55**	0.274	−0.61**	−0.50**	0.74**	−0.70**

注：* 表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关；* * 表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关。

2.3 CO_2 通量的月变化

由图 6 可知，2010 年 4 和 6 月的 NEP 为 22.60 与 14.34 g/(m^2 · month)，均明显小于在参考月份的 39.30 与 41.90 g/(m^2 · month)。4 月份 GEP 以及 RE 的降低导致 NEP 减少，6 月份 NEP 下降主要是由于 GEP 下降与 RE 增加导致，两个月份的碳损失率平均为 0.92，比参考年份 4，6 月的 0.74 高出约 24%。

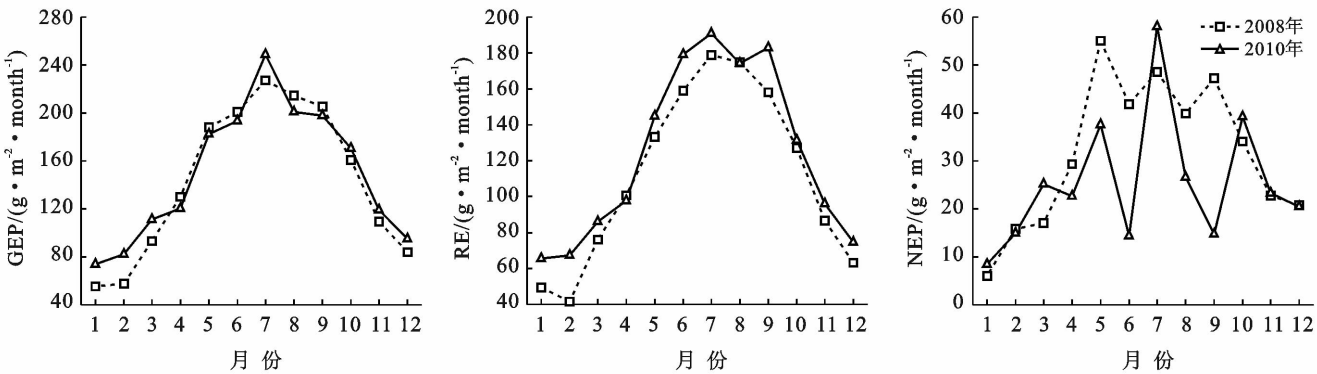


图 6 研究区月尺度 GEP，RE 与 NEP 对比

3 讨 论

3.1 极端降水对 GEP 的影响

极端降水现象时期，云量增多导致净辐射降低，4 月份 RN 对 GEP 的直接通径系数由 0.77 上升为 0.93，6 月份由 0.82 变为 0.90，RN 为 GEP 的主要影响因素（图 3）。净辐射作为 GEP 的主要能量来源，控制植物生长季内 GEP 的变化，RN 降低直接导致 GEP 降低，通过影响光照强度间接削弱植物的光合作用[14]。6 月份植物进入生长旺盛时期，叶片发育较为完全，RN 降低 31.61%，导致 GEP 的降低 3.57%。其次是温度降低，温度主要通过影响光合生化作用相关酶的活性进而影响陆地生态系统碳循环[15]，EVI 时间序列反映出生态系统明显的季节性，可侧面表示植物生长的动态变化。4 月份植物处于生长初期，此时植被恢复与叶片发育需要适宜的温度，降温推迟新叶片生长，导致 EVI 减少 32.62%，可能影响植物光合叶绿素含量与酶的活性[16]，进而影响光合作用，导致生态系统 GEP 减少。6 月份为植物生长旺盛期，叶片发育稳定且抵抗性增强，EVI 降低 9.35%。

3.2 极端降水事件对 RE 的影响

按照呼吸时消耗底物的差异，将生态系统呼吸（RE）分为自养呼吸（Ra）和异养呼吸（Rh）。其中 Ra 为植物必需的新陈代谢过程，以维持自身生命活动，

又可以分为维持呼吸和生长呼吸。维持呼吸与温度变化呈指数相关[17],生长呼吸可由植被指数 EVI 反映,与光合作用均发生于气孔,因此与 GEP 呈一定的比例。Rh 是残存有机质(凋落物)微生物分解过程中向大气释放 CO_2 的过程,主要受温度、土壤含水量与有机质含量的影响[18]。4 月份极端降水事件导致温度与 EVI 降低,TA 成为影响 RE 的主要因素(图 5),SWC 与 EVI 的直接通径系数均降低,RE 降低 3.01%,此时温度降低对 RE 的削弱作用抵消 SWC 升高对 RE 的促进作用。参考年 6 月份 EVI 为 RE 的主要影响因素,RE 可能以植物呼吸为主,降水引起温度降低,EVI 降低 9.28%,此时植物呼吸方面均降低。2010 年 6 月份 EVI 通径系数小于 0.48,RE 以异养呼吸为主[9],而 6 月份 RE 增多可能与土壤呼吸的激发效应有关。土壤呼吸的激发效应主要是因为地表凋落物的分解导致,地表凋落物分解部分占土壤呼吸的 8%～48%[19],降水迅速改变地表凋落物的水分状况,大量易变性有机底物淋溶释放出来,促进微生物分解;另一方面,可能与土壤有机质分解速率的变化有关,降水使土壤含水量增加,可能使微生物数量增加并且活性增强,促进了易分解有机底物的可利用性与扩散作用[20],导致土壤呼吸增强。刘博奇[21]在小兴安岭典型温带森林研究中也发现降水引起土壤呼吸的增强,而王磊[22]发现降水导致湿地松和尾巨桉人工林土壤总呼吸明显升高。

3.3　极端降水事件对 NEP 的影响

极端降水事件导致 2010 年 4 月份 NEP 降低 22.87%,6 月份降低 65.77%,4 和 6 月份 GEP 减少 7.36%与 3.58%9.56%,4 月份 NEP 的变化是因为 GEP 与 RE 的降低,而 6 月份 NEP 变化幅度较大则主要是因为 4 月份 RE 减少 2.84%,6 月份 RE 增加 12.8%(图 6)。结果表明,不同生长时期降水都会导致生态系统 NEP 降低,但 4 月份降低主要是因为 GEP,RE 同时降低,但 GEP 降低程度超过了 RE。而 6 月份降低则是 GEP 的降低以及 RE 的增加。生长阶段不同,GEP 与 RE 对极端降水事件的响应程度与方式存在差异,造成 NEP 下降程度不同。极端降水事件导致 6 月份植物光合作用降低[17],引起土壤呼吸激发效应。本研究与 Griffis[23]等人在北方落叶阔叶林的研究结果相似,NEP 随着 RE 的升高以及 GEP 的降低而下降。而张雷明[24]等人研究中由于 RE 增长以及 GEP 的降低生态系统甚至转变为碳源,同样的情况也发生在温度增高导致 RE 增多的高山草甸生态系统[51]。关于外界干扰导致 GEP 与 RE 响应差异的研究多集中于季节性干旱[10],而极端降水事件影响森林生态系统的光合作用与呼吸作用,发生于不同生长时期影响程度会有所差异。本研究只分析了 2010 年 4,6 月份范围内的极端降水事件,强度与次数较为单一,缺少足够数据支持。因此要明确不同强度极端降水事件对森林生态系统碳通量的影响,还需长时间并且持续对森林生态系统进行观测,在明确事件发生强度、时间及频率的基础上,分析对森林生态系统各个碳收支过程的影响,完善整个生长季内森林生态系统对不同强度极端降水事件的响应机制,为准确评估极端降水事件下森林生产力提供理论及数据支持。

4　结 论

(1) 极端降水事件导致生态系统 NEP 降低,发生时期不同,GEP 以及 RE 的响应程度与方式存在差异。4 月份降低主要是因为 GEP,RE 都降低,而 GEP 降低程度超过了 RE,但 6 月份降低则是 GEP 的降低以及 RE 的增加导致降低幅度更大。

(2) 极端降水事件发生于不同生长时期造成 NEP 减少量有所差异,4 月份 NEP 降低 22.87%,GEP 降低 7.36%,RE 降低 2.84%。6 月份 GEP 降低 3.58%,NEP 降低 65.77%,RE 增加 12.8%。

(3) 2008 年 4 月份,RN 与 NEP,GEP 正相关,TA 为影响 RE 最主要因子,2010 年 4 月份,RE 与 TA 正相关。2008 年 6 月份 GEP 与 RN 正相关,NEP 与 SWC,TA 负相关,EVI 为 RE 的主要影响因素,2010 年 6 月份,SWC 成为 RE 的主要影响因素,同时也受到 TA 的影响。

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟院重点实验室,以及千烟洲站提供通量观测数据。

[参 考 文 献]

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] Easterling, D. R. Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts [J]. Science, 2000, 289 (5487):2068-2074.

[3] 朴世龙,张新平,陈安平,等. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 中国科学:地球科学,2019,49(9):1321-1334.

[4] 于贵瑞,张雷明,孙晓敏,等. 亚洲区域陆地生态系统碳

通量观测研究进展[J].中国科学(D辑:地球科学),2004(S2):15-29.

[5] Baldocchi D, Chu H, Reichstein M. Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes: A review [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249:520-533

[6] Benjamin P, Neil P. Recent trends in InnerAsian forest dynamics to temperature and precipitation indicate high sensitivity to climate change [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013,178:31-45.

[7] Wen Xuefa, Wang Huimin, Wang Jianlin, et al. Ecosystem carbon exchanges of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought, 2003—2007 [J]. Biogeosciences, 2010,7(1):357-369.

[8] Xu Mingjie, Wang Huimin, Wen Xuefa, et al. The full annual carbon balance of a subtropical coniferous plantation is highly sensitive to autumn precipitation [J]. Scientific Reports, 2017,7(1):10025.

[9] Kim J, Kim W, Yeh S, et al. The unique2009-2010 El Niño event: A fast phase transition of warm pool El Niño to La Niña [J]. Geophysical Research Letters, 2011,38(15).

[10] Tang Yakun, Wen Xuefa, Sun Xiaomin, et al. The limiting effect of deep soil water on evapotranspiration of a subtropical coniferous plantation subjected to seasonal drought [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014,31(2):385-395.

[11] 宋霞,刘允芬,徐小锋,等.红壤丘陵区人工林冬春时段碳、水、热通量的观测与分析[J].资源科学,2004,26(3):96-104.

[12] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems [J]. Oecologia, 2004,141(2):254-268.

[13] Douglas W. Schemske and Carol C. Horvitz. Plant animal interactions and fruit production in a neotropical herb: A path analysis [J]. Ecology, 1988,69(4):1128-1137.

[14] Zhang Fawei, Li Hongqin, Wang Wenying, et al. Net radiation rather than surface moisture limits evapotranspiration over a humid alpine meadow on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Ecohydrology, 2017,12(2):e1925.

[15] Kato T, Tang Y, Song G U. Temperature and biomass influences on interannual changes in CO_2 exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Global Change Biology, 2006,12(7):1285-1298.

[16] Zhang Mi, Yu Guirui, Zhuang Jie, et al. Effects of cloudiness change on net ecosystem exchange, light use efficiency, and water use efficiency in typical ecosystems of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011,151(7):813-816.

[17] Sowerby A, Emmett B, Beier C, et al. Microbial community changes in heathland soil communities along a geographical gradient: interaction with climate change manipulations [J]. Soil Biology & Biochemistry,2005,37(10):1805-1813.

[18] Chen Shutao, Zou Jianwen, Hu Zhenghua, et al. Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics: Summary of available data [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2014,198:335-346

[19] Cleveland C C, Reed S C, Townsend A R. Nutrient regulation of organic matter decomposition in a tropical rain forest [J]. Ecology, 2006,87(2). 492-503.

[20] 王宁,王美菊,李世兰,等.降水变化对红松阔叶林土壤微生物生物量生长季动态的影响[J].应用生态学报,2015,26(5):1297-1305.

[21] 刘博奇,牟长城,邢亚娟,等.小兴安岭典型温带森林土壤呼吸对强降雨的响应[J].北京林业大学学报,2016,38(4):77-85.

[22] 王磊,桑昌鹏,余再鹏,等.滨海人工林土壤呼吸各组分对台风强降雨的响应[J].亚热带资源与环境学报,2019.14(01):42-50.

[23] Griffis T J, Black T A, Morgenstern K, et al. Ecophysiological controls on the carbon balances of three southern boreal forests [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2003,117:53-71.

[24] 张雷明,于贵瑞,孙晓敏,等.中国东部森林样带典型生态系统碳收支的季节变化[J].中国科学(地球科学),2006,36(S1):45-59.

[25] Li Hongqin, Zhang Fawei, Wang Wenying, et al. The strongest EI Niño event stimulated ecosystem respiration, not evapotranspiration, over a humid alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Ecological Indicators, 2018,91:562-569.