

模拟降雨对西双版纳热带次生林和橡胶林土壤呼吸的影响^{*}

董丽媛^{1,3} 武传胜^{1,2} 高建梅^{1,3} 沙丽清^{1,2**}

(¹中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 昆明 650223; ²中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站, 云南景东 676209; ³中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 降雨作为一个重要的环境因子, 对土壤呼吸具有重要的影响。研究土壤呼吸与降雨的关系, 对准确估算大气中的 CO₂ 含量具有重要意义。本研究通过人工模拟降雨事件, 应用野外原位测定方法, 测量了热带次生林和橡胶林土壤呼吸速率、地下 5 cm 土壤温度和土壤含水量的变化, 以探究热带两种主要植被类型的土壤呼吸、土壤温度、土壤含水量对旱季单次降雨事件的响应过程与规律。研究发现, 在旱季连续一周没有降雨的情况下, 人工模拟降雨事件使土壤呼吸在降雨后的 2 h 内被迅速激发, 次生林的土壤呼吸最大达到 11.15 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹, 是对照的近 7 倍; 橡胶林的土壤呼吸最大达到了 15.88 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹, 是对照的近 11 倍。随后激发效应迅速降低, 尤其是橡胶林, 在人工模拟降雨 6 h 后处理与对照间无显著差异。人工模拟降雨前两种林型的土壤含水量与对照相比均无显著性差异, 人工模拟降雨后的 2 d 内土壤含水量均显著高于对照; 人工模拟降雨前后土壤温度与对照相比均无显著性差异。本研究结果支持了“Birch effect”, 2 种主要热带林型在旱季时期, 由于单次降雨事件激发而释放到大气中的 CO₂ 是降雨前的数倍。

关键词 单次人工降雨; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤含水量

中图分类号 S718.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)8-1887-06

Effects of simulated rainfall on the soil respiration in tropical secondary forest and rubber plantation in Xishuangbanna of Yunnan, Southwest China. DONG Li-yuan^{1,3}, WU Chuan-sheng^{1,2}, GAO Jian-mei^{1,3}, SHA Li-qing^{1,2**} (¹ Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; ² Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies, Chinese Academy of Sciences, Jingdong, 676209, China; ³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(8): 1887–1892.

Abstract: Rainfall has important effects on soil respiration. To understand the relationship between rainfall and soil respiration is of significance in accurately estimating carbon flux. In this paper, an in situ observation was conducted in a tropical secondary forest and a rubber plantation in Xishuangbanna of Yunnan to measure the soil respiration rate and the soil temperature and moisture content at the depth 5 cm after a simulated rainfall, aimed to understand the responses of the soil respiration, soil temperature, and soil moisture content under the two main vegetation types to the simulated rainfall. Under the condition of one week no-rainfall in dry season, the soil respiration was rapidly stimulated 2 hours after the rainfall, with the maximum soil respiration rate in the secondary forest rubber plantation reached 11.15 and 15.88 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹, being 7 and 11 times greater than that of the control, respectively. This effect decreased through time, particularly in rubber plantation where the difference with the control was not significant 6 hours after the rainfall. Two days after the simulated rainfall, the soil moisture contents in the

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070303, XDA05050601)和国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833501)和国家自然科学基金项目(41071071)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: shalq@xtbg.ac.cn

收稿日期: 2012-02-19 接受日期: 2012-05-09

tropical secondary forest and rubber plantation were significantly higher than the control, but the soil temperature had less difference. This study supported the “Birch effect”, and showed that due to the rainfall event, the CO_2 release from the two major tropical forest types in dry season was increased several folds.

Key words: single artificial rainfall; soil respiration; soil temperature; soil moisture content.

未来全球气候变化情景下,全球或局部地区的降水格局(降水量、降水强度及降水的季节分配)将发生改变(IPCC,2007)。降水格局改变引起的土壤水分变化将直接影响植物和土壤微生物对水分的利用,并间接影响到陆地生态系统功能与过程(Weltzin *et al.*,2003)。土壤呼吸是陆地生态系统土壤与大气之间 CO_2 交换的唯一输出途径,也是陆地生态系统碳循环的重要组成部分(刘绍辉和方精云,1997)。土壤呼吸对降雨的响应非常复杂,包括一系列物理、生物及化学过程(王义东等,2010)。

近年研究表明,降雨通过改变土壤的通气状况(Luo & Zhou,2006)、呼吸底物的组成与有效性(van Gestel *et al.*,1993;Miller *et al.*,2005),以及土壤微生物和根系的生理活性(Grant & Rochette,1994),进而影响土壤呼吸。温度和湿度是影响土壤呼吸最重要的因子(Kucera & Kirkham,1971;Wildung *et al.*,1975;Kirschbaum,1995),其微小变化都会对土壤呼吸产生巨大影响。单次降雨事件使得土壤湿度迅速改变对土壤呼吸的物理作用也不容忽视(邓琦等,2009)。在干旱的生态系统或干湿交替季节的生态系统中比较干旱的季节里,降水事件会强烈地激发土壤呼吸。研究发现,降雨能够使旱季时期的热带森林土壤呼吸在1~2 d内显著增加(Medina & Zelwer,1972)。Birch(1958)发现了降雨会在短时间内激发土壤呼吸这一现象,并将这一现象称之为“Birch effect”。而土壤呼吸的微小变化将对全球碳平衡产生明显的影响,并影响未来大气中 CO_2 浓度的变化。

处于世界第二大雨林(印度-马来西亚热带雨林)北缘的西双版纳热带雨林,由于受印度季风控制,存在明显的干雨季,具有热带森林结构和群落特征,既是许多珍稀动植物的栖息地,同时也是全球陆地生态系统重要的碳库。目前橡胶林是西双版纳地区分布面积最大的人工林,这2种林型在西双版纳地区占有很大的比重,其土壤碳库对区域碳平衡具有重要影响。近年来,全球降水格局的改变使得西双版纳地区旱季降雨有增加趋势,如果这种趋势连

年加剧,那么将会对西双版纳地区的土壤呼吸造成什么样的影响?为此,本研究利用人工模拟降雨设备来模拟单次降雨事件,并采用野外原位测定的实验方法来测量热带次生林和橡胶林的土壤呼吸,以便预测西双版纳地区旱季时期的降雨对大气中 CO_2 的贡献。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

西双版纳位于云南南部边缘(约 $21^{\circ}09'N$ — $22^{\circ}36'N$, $99^{\circ}58'N$ — $101^{\circ}50'N$),终年受西南季风控制,属热带季风气候。一年中干湿季分明,可分为干热季(3—4月)、湿热季(5—10月)及雾凉季(11月—次年2月)。年平均气温 21.6°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温 7860°C ,最热月(6月),平均气温 25.3°C ,最冷月(1月)平均气温 15.5°C ,年日照时数 1828 h,年平均降雨量 1557 mm,有雾日数为 173.7 d,终年无霜。年相对湿度 86%,干燥度 1.01。土壤为由白垩纪砂岩发育而成的砖红壤,土层深厚,土壤呈酸性,pH 值为 6.0 左右。2011 年 3 月一次性最大降水量为 26.2 mm。

本研究中,热带雨林次生林样地位于云南省勐腊县勐仑镇中国科学院西双版纳热带植物园迁地保护区内,是热带雨林经刀耕火种后撂荒自然演替形成的 38 年生左右次生林群落,群落优势种为绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa*)、刺通草(*Trevesia palmata*)、木奶果(*Baccaurea ramiflora*)、中平树(*Macaranga denticulata*)、鸡血藤(*Millettia extense*)、印度锥(*Castanopsis indica*)、斑果藤(*Stixis suaveolens*)和穿鞘花(*Amischotolype hispida*)等,物种丰富度低于热带雨林。冠层高度大约为 40 m,样地为西南坡,坡度约为 20° 。

橡胶林样地位于中国科学院西双版纳热带植物园人工群落试验区,是以 30 年生橡胶树(*Hevea brasiliensis*)为主的单优种人工群落,采用宽窄行密株的种植方式。橡胶林经常有人类活动,如割胶、施肥、喷洒除草剂等,次生林人为干扰较少。此处地势平

缓,无混作,利于实验的开展。

1.2 实验设计

在次生林和橡胶林分别选取 12 块 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的样方,6 块进行人工模拟降雨处理,相应 6 块作为对照。实验开始前 24 h 在 12 块样方内嵌入 12 个外径为 100 mm,高 100 mm 的 PVC 管作为呼吸箱,选择距离树主根约 1 m 处将 PVC 管底端插入土壤的深度为 3 ~ 4 cm。在样地内以 PVC 管为中心的 $100\text{ cm}\times 100\text{ cm}$ 范围内,使用人工模拟降雨设备(有均匀小孔的洒水壶)模拟降雨($20\text{ mm}\cdot\text{m}^{-2}$),使模拟降水单位时间的降水强度保持一致,水滴均匀落在指定范围内,并保证地表不形成径流。人工模拟降雨前测定次生林和橡胶林土壤呼吸的初始值。2011 年 3 月 10 日和 11 日 8:30 分别对次生林和橡胶林中的 6 块小样方依次进行人工模拟降雨处理,9:00 开始进行土壤呼吸的测定,并测定相应的土壤温度和水分,测定频率为 $1\text{ 次}\cdot 2\text{ h}^{-1}$;3 月 12 日、13 日和 19 日 9:00—12:30 测定次生林和橡胶林内所有样方的土壤呼吸及土壤温度和水分。

1.3 测定方法

土壤呼吸用 Li-6400-09 土壤呼吸叶室(Li-Cor, USA)在野外原位测定。在距离呼吸箱约 5 ~ 10 cm 处用 Soil Moisture Meter (HH2 Display Type, UK)测定土壤(0 ~ 5 cm)容积含水量和土壤温度,在每个呼吸箱周围测 4 个点取其均值。

1.4 数据处理

实验数据使用 SPSS 17.0 软件进行独立样本 t 检验和相关性分析,用 SigmaPlot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 单次人工降雨对土壤含水量、土壤温度的影响

人工模拟降雨前,次生林(3 月 8 日)和橡胶林(3 月 9 日)土壤含水量、土壤温度初始值的测定结果表明,处理样方与对照样方差异不显著(图 1、图 2)($P>0.05$)。人工模拟降雨当天的 5 次测量数据表明处理样方土壤含水量显著高于对照样方($P<0.05$),随后 2 日,处理样方土壤含水量亦显著高于对照样方($P<0.05$),表明人工模拟降雨显著改变了土壤水分(图 1)。人工模拟降雨后处理样方的土壤温度略低于对照样方,但差异不显著($P>0.05$),说明人工模拟降雨对土壤温度在短期内并没有显著影响(图 2)。

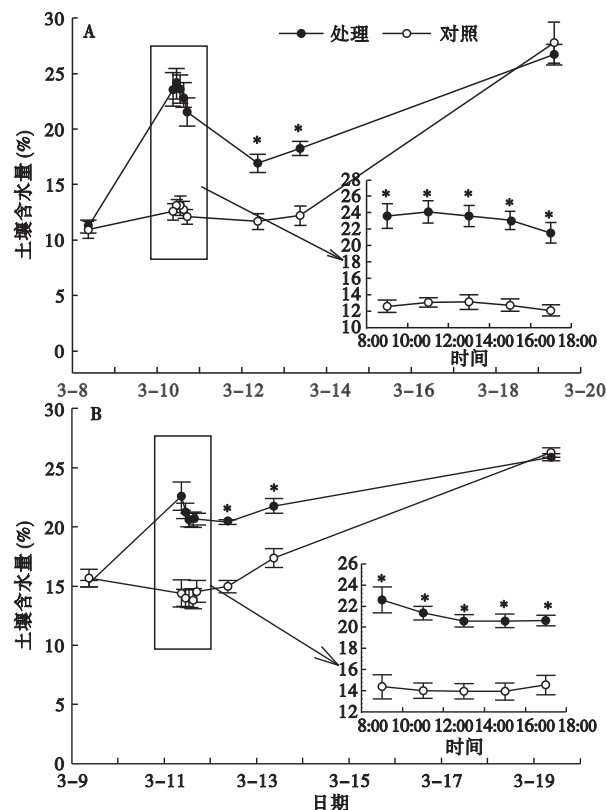


图 1 人工降雨后热带次生林(A)和橡胶林土壤含水量(B)的变化

Fig. 1 Changes of soil water content after artificial rainfall in tropical secondary forest (A) and rubber plantation (B)

2.2 单次人工降雨对土壤呼吸的影响

人工模拟降雨前,次生林(3 月 8 日)和橡胶林(3 月 9 日)的土壤呼吸初始值测定结果表明,处理样方与对照样方显著不差异(图 3)($P>0.05$)。人工模拟降雨当天的 5 次测量数据表明次生林处理样方土壤呼吸速率显著高于对照样方($P<0.05$),施水 8 h 后,处理与对照间差异不显著($P>0.05$),随后几日处理样方土壤呼吸与对照之间差异不显著(图 3)($P>0.05$)。橡胶林的土壤呼吸变化趋势与次生林相似,而橡胶林施水 6 h 后处理与对照间差异不显著(图 3)($P>0.05$)。

气象资料显示,3 月 7—11 日没有降雨事件发生,12 日与 13 日有少量降雨,随后降雨增多,2011 年 3 月的降雨量明显高于往年同期。本研究的人工模拟降雨事件发生在长时间没有降水的旱季情况下,所以此时的人工降雨激发了土壤呼吸,使次生林的土壤呼吸最大达到 $11.15\text{ }\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,是对照的近 7 倍;而橡胶林的土壤呼吸最大达到了 $15.88\text{ }\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,是对照的近 11 倍(表 3)。

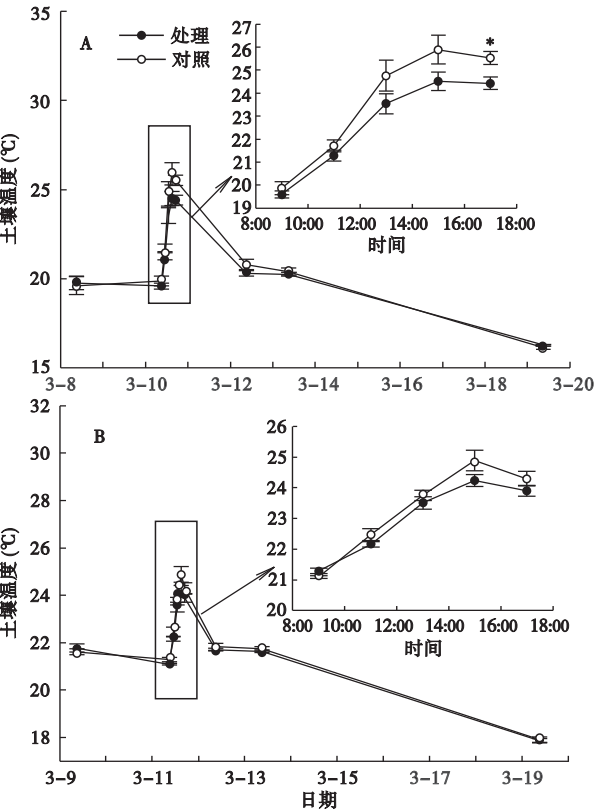


图2 人工降雨后热带次生林(A)和橡胶林(B)土壤温度的变化
Fig.2 Changes of soil temperature after artificial rainfall in tropical secondary forest (A) and rubber plantation (B)
* 差异显著。

2.3 土壤呼吸及其影响因子相关性

次生林处理样方的土壤呼吸与土壤水分呈正相关,与土壤温度呈负相关,与大气温度呈正相关,但相关性均不显著;对照样方的土壤呼吸与土壤水分呈正相关,与大气温度呈负相关,相关性均不显著,土壤呼吸与土壤温度呈显著的负相关关系 ($P < 0.05$)。橡胶林中处理样方的土壤呼吸与土壤水分呈正相关,与土壤温度呈负相关,与大气温度呈正相关,相关性均不显著;对照样方中的土壤呼吸与土壤水分呈负相关,与土壤温度呈正相关,与大气温度呈正相关,相关性均不显著(表1、表2)。

表1 热带次生林土壤呼吸与其影响因子相关性分析
Table 1 Correlation analysis between soil respiration and its affecting factors in tropical secondary forest

			W ₅	T ₅	Ta
处理	R _s	Pearson 相关性	0.102	-0.090	0.433
		显著性(双侧)	0.465	0.517	0.467
		n	54	54	5
对照	R _s	Pearson 相关性	0.081	-0.283 *	-0.722
		显著性(双侧)	0.561	0.038	0.169
		n	54	54	5

表2 橡胶林土壤呼吸与其影响因子相关性分析
Table 2 Correlation analysis between soil respiration and its affecting factors in rubber plantation (P value)

			W ₅	T ₅	Ta
处理	R _s	Pearson 相关性	0.162	-0.064	0.414
		显著性(双侧)	0.243	0.646	0.488
		n	54	54	5
对照	R _s	Pearson 相关性	-0.253	0.162	0.710
		显著性(双侧)	0.065	0.241	0.179
		n	54	54	5

* : $P < 0.05$, R_s 为土壤呼吸, T₅ 和 W₅ 分别为土壤 5 cm 处温度和水分, Ta 为大气温度。

表3 施水后热带次生林和橡胶林土壤呼吸速率的最大值、最小值和平均值 ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Table 3 Maxima, minima and mean ($\pm \text{SE}$) of soil respiration rate after artificial rainfall in tropical secondary forest and rubber plantation

土壤呼吸	次生林		橡胶林	
	处理	对照	处理	对照
最大值	11.15	1.76	15.88	1.51
最小值	2.36	1.38	1.68	1.25
平均值	4.38 \pm 1.70	1.55 \pm 0.07	4.86 \pm 2.76	1.38 \pm 0.05

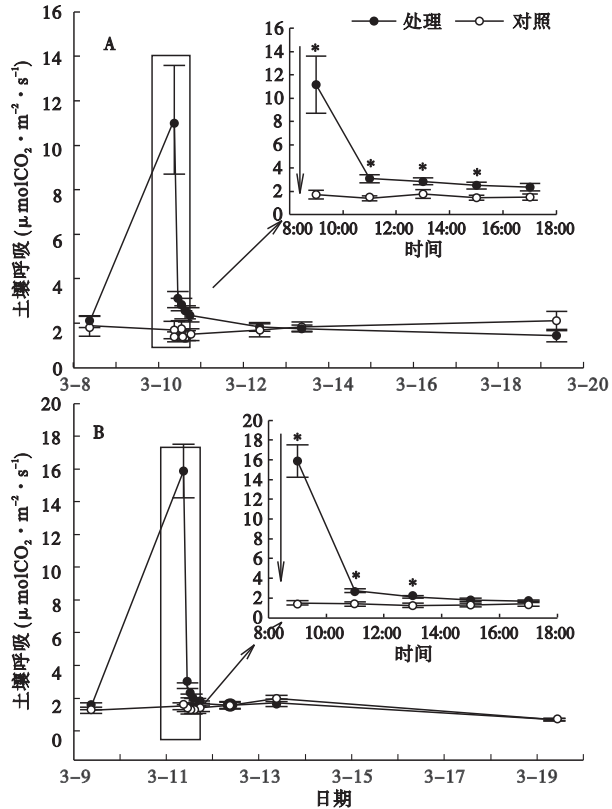


图3 热带次生林(A)和橡胶林(B)土壤呼吸速率对人工降雨的响应
Fig.3 Response of soil respiration to artificial rainfall in tropical secondary forest (A) and rubber plantation (B)
* 差异显著。

3 讨论

本研究表明,在降雨事件发生后的 6~8 h 内,处理样方的土壤呼吸速率最高值和递减阶段值均高于对照,这是土壤中微生物数量在雨后明显增加,造成雨后土壤 CO₂ 排放量增加的一个长时效应(1 d 以内)(Anderson, 1973; Orchard & Cook, 1983),微生物对降雨的响应大约需要 1 h (Xu *et al.*, 2004),此时的增加可能就是因为旱季的微生物得到水分补给后迅速利用底物进行新陈代谢的结果。而 3 月 12 日、3 月 13 日的观测结果表明,无论是橡胶林还是次生林处理与对照的土壤呼吸差异均不显著,有可能是因为在此时间段内人工降雨对土壤水分的激发效应已经消失。通过比较模拟降雨处理下不同群落的平均土壤呼吸速率,发现橡胶林的土壤呼吸速率(4.86 ± 2.76) $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ > 次生林的土壤呼吸速率(4.38 ± 1.70) $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 3),这可能是模拟降雨前橡胶林的土壤湿度比次生林要高的原因。可见,人工模拟降雨对土壤呼吸的影响还依赖于降雨前土壤的湿润状况,这与 Werner 等(2006)在西双版纳的研究结果一致。

土壤呼吸与土壤温度和土壤水分存在一定的相关关系。本实验发现,土壤温度与土壤呼吸呈负相关,这与以往的研究结果有所不同,可能是因为人工降雨使土壤温度有所降低,而土壤呼吸却由于土壤水分的升高而增强,所以土壤温度与土壤呼吸之间呈负相关。Maestre & Cortina (2003) 研究表明,土壤湿度和温度能解释西班牙半干旱草原土壤 CO₂ 释放小尺度上的空间变异; Conant 等(2000) 也发现,土壤湿度是控制亚利桑那州 3 种半干旱生态系统土壤呼吸速率最重要的因素。然而, Casals 等(2000) 和 Frank 等(2002) 认为,相对于土壤湿度,土壤温度更能解释干旱土壤 CO₂ 释放的变化。在人工模拟降雨前几日并无降水,土壤处于比较干燥的状态下,得到的结果是土壤温度与土壤呼吸呈负相关,土壤水分与土壤呼吸呈正相关,其相关性差异均不显著(表 1、表 2)。总体而言,旱季时期降雨后土壤湿度在一定程度上促进土壤呼吸。因此,在不同生态系统中,由于植被类型与覆盖状况、降雨前土壤本身的水分状况等不同,土壤湿度、温度对土壤呼吸的影响结果并不一致。

Werner 等(2006)对西双版纳热带雨林、次生林和橡胶林开展的人工模拟降雨实验表明,3 种森林

类型的土壤呼吸均与土壤水分呈正相关,在整个观测期内,人工降雨增加了土壤呼吸总量,而他们认为这主要是因为增加了根呼吸的结果。Cable 和 Huxman (2004) 在 Sonoran 荒漠研究得出,在小的降水脉冲作用下微生物结皮对土壤表面 CO₂ 释放的贡献达到 80%,而大的降水事件后,根系和土壤微生物呼吸占土壤表面 CO₂ 释放的近 100%。小降雨事件使水分在土壤中的下渗力弱,主要增加了微生物呼吸,而能下渗到土壤足够深处的大暴雨才会引起植物气体交换力增加(Huxman *et al.*, 2004)。Reynolds 等(2004) 认为,植物对降雨产生响应的降水量下限是 5 mm。西双版纳热带地区的植物根系较浅,对降雨的响应较深根系更快(BassiriRad *et al.*, 1999)。本研究区旱季单次降水量以大于 20 mm 居多。因此,本实验中模拟 20 mm 降雨事件可能已激发了研究区植物根系呼吸,但降雨对根呼吸的影响可能需要几天到几周的时间才能表现出来(Liu *et al.*, 2002)。

土壤呼吸对降雨的响应机制是相当复杂的生物地球化学过程。本研究发现,单次降雨事件使热带土壤向大气中释放更多的 CO₂。西双版纳地区有明显的干雨季,在未来关注并估算干季时期降雨对大气中 CO₂ 的贡献率对全球变暖有重要意义。

参考文献

- 邓琦, 周国逸, 刘菊秀, 等. 2009. CO₂ 浓度倍增、高氮沉降和高降雨对南亚热带人工模拟森林生态系统土壤呼吸的影响. 植物生态学报, **33**(6): 1023–1033.
- 刘绍辉, 方精云. 1997. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. 生态学报, **17**(5): 469–476.
- 王义东, 王辉民, 马泽清, 等. 2010. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展. 植物生态学报, **34**(5): 601–610.
- Anderson JM. 1973. Carbon dioxide evolution from two temperate deciduous woodland soils. *Journal of Applied Ecology*, **10**: 361–378.
- BassiriRad H, Tremmel DC, Virginia RA, *et al.* 1999. Short-term patterns in water and nitrogen acquisition by two desert shrubs following a simulated summer rain. *Plant Ecology*, **145**: 27–36.
- Birch HF. 1958. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and Soil*, **10**: 9–31.
- Cable JM, Huxman TE. 2004. Precipitation pulse size effects on Sonoran Desert soil microbial crusts. *Oecologia*, **141**: 317–324.
- Casals P, Romanyà J, Cortina J, *et al.* 2000. CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness. *Biogeochemistry*, **48**: 261–281.
- Conant RT, Klopatek JM, Klopatek CC. 2000. Environmental

- factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, **64**: 383–390.
- Frank AB, Liebig M, Hanson JD. 2002. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology & Biochemistry*, **34**: 1235–1241.
- Grant RF, Rochette P. 1994. Soil microbial respiration at different water potentials and temperatures: Theory and mathematical modeling. *Soil Science Society of America Journal*, **58**: 1681–1690.
- Huxman TE, Snyder KA, Tissue D, *et al.* 2004. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, **141**: 254–268.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The Scientific Basis Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kirschbaum MUF. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology & Biochemistry*, **27**: 753–760.
- Kucera CL, Kirkham DR. 1971. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology*, **52**: 912–915.
- Liu XZ, Wan SQ, Su B, *et al.* 2002. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. *Plant and Soil*, **240**: 213–223.
- Luo Y, Zhou X. 2006. Soil Respiration and the Environment. London: Elsevier.
- Maestre FT, Cortina J. 2003. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, **23**: 199–209.
- Medina E, Zelwer M. 1972. Soil respiration in tropical plant communities// Golley PM, Golley FB, eds. Proceedings of the Second International Symposium of Tropical Ecoogy. Athens, Georgia: University of Geogia Press: 245–269.
- Miller AE, Schimel JP, Meixner T, *et al.* 2005. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils. *Soil Biology & Biochemistry*, **37**: 2195–2204.
- Orchard VA, Cook FJ. 1983. Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology & Biochemistry*, **15**: 447–453.
- Reynolds JF, Kemp PR, Ogle K, *et al.* 2004. Modifying the ‘pulse-reserve’ paradigm for deserts of North America: Precipitation pulses, soil water, and plant responses. *Oecologia*, **141**: 194–210.
- van Gestel M, Merckx R, Vlassak K. 1993. Microbial biomass responses to soil drying and rewetting: The fate of fast- and slow-growing microorganisms in soils from different climates. *Soil Biology & Biochemistry*, **25**: 109–123.
- Weltzin JF, Loik ME, Schwinning S, *et al.* 2003. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *Bioscience*, **53**: 941–952.
- Werner C, Zheng XH, Tang JW, *et al.* 2006. N₂O, CH₄ and CO₂ emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China. *Plant and Soil*, **289**: 335–353.
- Wildung RE, Garland TR, Buschbom RL. 1975. Interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biology & Biochemistry*, **7**: 373–378.
- Xu LK, Baldocchi DD, Tang JW. 2004. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature. *Global Biogeochemical Cycles*, **18**: GB4002, doi: 10.1029/2004GB002281

作者简介 董丽媛,女,1984年10月生,硕士,主要从事环境生态学的研究。E-mail: dongliyuan666@126.com
责任编辑 王 伟
