

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

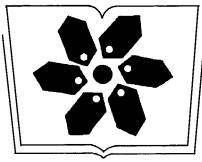
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第6期 Vol.33 No.6 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 6 期

2013 年 3 月 (半月刊)

目 次

专论与综述

- 基于遥感技术的森林健康研究综述..... 高广磊,信忠保,丁国栋,等 (1675)
Agent 农业土地变化模型研究进展..... 余强毅,吴文斌,杨 鹏,等 (1690)

个体与基础生态

- 辽东湾北部近海沙蜃的动态分布..... 王 彬,秦宇博,董 婧,等 (1701)
口虾蛄 proPO 基因全长 cDNA 的克隆与组织表达..... 刘海映,刘连为,姜玉声,等 (1713)
中缅树鼯头骨及下臼齿几何形态与环境的关系..... 朱万龙,贾 婷,黄春梅,等 (1721)
亚热带 3 种树种凋落叶厚度对其分解速率及酶活性的影响..... 季晓燕,江 洪,洪江华,等 (1731)
浙北地区常见绿化树种光合固碳特征..... 张 娇,施拥军,朱月清,等 (1740)
两种高质牧草不同生育期光合生理日变化及光响应特征..... 郭春燕,李晋川,岳建英,等 (1751)
基于 WOFOST 作物生长模型的冬小麦干旱影响评估技术..... 张建平,赵艳霞,王春乙,等 (1762)
基于线粒体 DNA 控制区的斑翅草螽不同地理种群遗传分化研究..... 周志军,尚 娜,刘 静,等 (1770)
圈养尖吻蝾螈雌体大小、窝卵数和卵大小之间的关系..... 胡明行,谭群英,杨道德 (1778)
应用寄生蜂和不育雄虫防控田间橘小实蝇..... 郑思宁,黄居昌,叶光禄,等 (1784)
青蒿素对外生菌根真菌化感效应..... 李 倩,袁 玲,王明霞,等 (1791)

种群、群落和生态系统

- 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用..... 李纯厚,林 琳,徐姗姗,等 (1798)
上升流和水团对浙江中部近海浮游动物生态类群分布的影响..... 孙鲁峰,柯 昶,徐兆礼,等 (1811)
半干旱区生态恢复关键生态系统识别——以内蒙古自治区和林县为例.....
..... 彭 羽,高 英,冯金朝,等 (1822)
太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应..... 金冠一,赵秀海,康峰峰,等 (1832)
重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应..... 王轶浩,王彦辉,于澎湃,等 (1842)

景观、区域和全球生态

- 城市典型水域景观的热环境效应..... 岳文泽,徐丽华 (1852)
外来树种桉树引种的景观生态安全格局..... 赵筱青,和春兰 (1860)
基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究..... 施开放,刁承泰,孙秀峰,等 (1872)
大气 CO₂ 浓度升高对稻田根际土壤甲烷氧化细菌丰度的影响..... 严 陈,许 静,钟文辉,等 (1881)

资源与产业生态

- 基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价..... 柯丽娜,王权明,孙新国,等 (1889)
亚热带养殖海湾皱瘤海鞘生物沉积的现场研究..... 闫家国,齐占会,田梓杨,等 (1900)
黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征..... 张丽娜,李 军,范 鹏,等 (1907)

旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应..... 张丁辰,蔡典雄,代 快,等 (1916)

商洛低山丘陵区农林复合生态系统中大豆与丹参的光合生理特性..... 彭晓邦,张硕新 (1926)

外源油菜素内酯对镉胁迫下菊芋幼苗光合作用及镉富集的调控效应..... 高会玲,刘金隆,郑青松,等 (1935)

基于侧柏液流的测定对 Granier 原始公式系数进行校正 刘庆新,孟 平,张劲松,等 (1944)

研究简报

湿地自然保护区保护价值评价方法..... 孙 锐,崔国发,雷 霆,等 (1952)

干热河谷印楝和大叶相思人工林根系生物量及其分布特征..... 高成杰,唐国勇,李 昆,等 (1964)

海滨沙滩单叶蔓荆对沙埋的生理响应特征..... 周瑞莲,王 进,杨淑琴,等 (1973)

宁夏贺兰山、六盘山典型森林类型土壤主要肥力特征 姜 林,耿增超,张 雯,等 (1982)

学术争鸣

小兴安岭十种典型森林群落凋落物生物量及其动态变化..... 侯玲玲,毛子军,孙 涛,等 (1994)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2002)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说: 亭亭玉立的白桦树——白桦为落叶乔木,可高达 25m,胸径 50cm。其树冠呈卵圆形,树皮白色,纸状分层剥离;叶三角状、卵形或菱状卵形;花单性,雌雄同株。白桦树喜光,耐严寒,对土壤适应性强,喜酸性土,沼泽地、干燥阳坡及湿润阴坡都能生长。常与红松、落叶松、山杨、蒙古栎混生。白桦的天然更新好,生长较快,萌芽强,在人为的采伐迹地或火灾、风灾等自然损毁的迹地里,往往由白桦首先进入,为先锋树种,而形成白桦次生林。白桦分布甚广,我国大、小兴安岭及长白山均有成片纯林,在华北平原和黄土高原山区、西南山地亦为阔叶落叶林及针叶阔叶混交林中的常见树种。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112211944

金冠一, 赵秀海, 康峰峰, 汪金松. 太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应. 生态学报, 2013, 33(6): 1832-1841.

Jin G Y, Zhao X H, Kang F F, Wang J S. The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1832-1841.

太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应

金冠一, 赵秀海*, 康峰峰, 汪金松

(北京林业大学森林资源与生态系统过程北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要:在全球气候变化背景下,关于森林生态系统土壤呼吸变化的研究越来越受到关注,然而目前由于测定技术限制,对于强降雨影响森林土壤呼吸的国内相关研究还不够深入。选取山西省太岳山油松人工林土壤作为研究对象,应用 LI-8150 土壤 CO₂ 通量全自动连续测量系统,对降雨前后的土壤呼吸速率和环境因子在原位置进行全天候连续监测,分析了 3 次强降雨前后的土壤呼吸速率变化。结果表明,(1)5 月的旱季降雨改善了土壤水分状况,促进了土壤呼吸,降雨结束后土壤呼吸速率的平均水平是降雨发生前的 2 倍;7 月的雨季开端期降雨对土壤呼吸先促进后抑制,土壤容积含水量和土壤呼吸速率的二次关系曲线存在拐点,但总体上降雨是促进了土壤呼吸;8 月的雨季降雨整体上抑制土壤呼吸,土壤呼吸速率和土壤容积含水量的变化曲线走势呈明显的镜像,雨中及雨后土壤呼吸速率分别下降了约 45% 和 28%。(2)每一次降雨结束后,土壤温度都有一定程度的下降。雨后,较低的土壤温度在土壤呼吸得到降雨促进时,可加速土壤呼吸速率的恢复;在土壤呼吸受到降雨抑制时,能阻碍土壤呼吸速率的恢复。(3)降雨的不同时期,影响半湿润地区油松人工林土壤呼吸的关键因子也是不同的。降雨前如果土壤容积含水量处于明显变化的状态,水分是影响土壤呼吸的关键因子;如果土壤容积含水量比较稳定,则土壤温度是关键因子。降雨过程中由土壤温湿共同影响土壤呼吸,降雨结束后水分是影响土壤呼吸的关键因子。

关键词:油松人工林; 土壤呼吸; 强降雨

The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain

JIN Guanyi, ZHAO Xiuhai*, KANG Fengfeng, WANG Jinsong

The Key Laboratory for Forestry Resources and Ecosystem Processes of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: In the context of global climate change, the research on soil respiration of the forest ecosystem has attracted more and more attention. However, there is not enough further discussion on forestry soil respiration which is affected by the heavy rainfall in domestic research reports. It is limited by the measurement technology at present. This study selected *Pinus tabulaeformis* plantation as the object in the Taiyue Mountain area, using the Li-8150 automated soil CO₂ flux system to monitor the soil CO₂ flux. The soil respiration rate was monitored continuously for about 14 days (before, during and after) each of the three rainfalls respectively in situ, and the environmental factors were also measured simultaneously. The changes of soil respiration rate before, during and after each rainfall were analyzed then. The results showed that, (1) In May, the rainfall during the dry season improved the soil humidity and promoted the soil respiration. The soil respiration rate increased almost two times relative to the values before and after the rain; In July, the rainfall during the wet season beginning promoted the soil respiration first and inhibited it after. There was an inflection point in the quadratic curve between the soil volume water content and the soil respiration rate, but as a whole, that rainfall promoted the soil respiration; In August, the rainfall during the wet season inhibited the soil respiration. There was a mirrorimage relationship

基金项目:国家林业公益性行业科研专项项目(201104009); 国家“十二五”科技支撑项目(2012BAC01B03); 北京市共建项目专项(2011)

收稿日期:2011-12-21; **修订日期:**2012-07-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoxh@bjfu.edu.cn

between the soil respiration rate curve and the soil volume water content curve. During and after the rain, the soil respiration rate decreased about 45% and 28% respectively. (2) The soil temperature dropped to some extent after each rainfall. The lower temperature could both promote and inhibit the recovery process of soil respiration rate after rainfall. (3) The key factors that influenced the soil respiration were different during the different periods of rainfall in the semi-humid *P. tabulaeformis* plantation. If the soil volume water content was changing constantly before the rainfall, the soil humidity would be the most influential factor; if it was in a stable state, the soil temperature would be. The soil humidity and temperature influenced the soil respiration together during the process of all the three rainfalls, and the soil humidity was always the most influential factor after all the three rainfalls.

Key Words: *Pinus tabulaeformis* plantation; soil respiration; great rainfall

土壤呼吸作为全球碳循环的重要组成部分,占整个陆地生态系统呼吸的 60%—90%,是调控全球碳循环和气候变化的关键^[1-3],也是当前全球变化背景下生态学研究的重要领域。森林土壤碳是全球碳库的重要组成部分,占全球土壤碳的 73%,在全球碳循环方面发挥重要作用,所以对森林生态系统土壤呼吸变化的研究一直受到关注。降雨作为重要的扰动因子,对准确估算地区土壤呼吸具有重要影响,尤其在半湿润和半干旱地区更为明显^[4-5]。

尽管关于土壤呼吸对降雨响应过程与规律的研究已取得了一些进展,但大多仍局限于实验室模拟条件下的研究^[6-9]。在自然条件下由于技术限制,原位、全天候、高频率地监测降雨对土壤呼吸速率的影响的研究很少^[10]。张红星等人^[11]在降雨过程中以及降雨前后对黄土高原小麦田的土壤呼吸速率进行连续全天候监测,对于揭示农田生态系统的土壤呼吸对强降雨的响应有着重要的意义。但是,森林生态系统的土壤呼吸速率对强降雨全过程的响应研究在国内仍鲜有报道^[12]。本研究利用山西太岳山地区油松人工林 5 月、7 月、8 月的 3 次典型强降雨过程,分别对每次降雨前、降雨中和降雨后约 14d 的林地土壤呼吸速率进行了连续全天候监测,以期探索半湿润地区油松人工林生态系统的土壤呼吸对强降雨的响应特征及机制,为更深入地理解油松人工林土壤碳库和更系统地评价其碳循环过程提供科学支撑。

1 研究区自然概况

本研究地位于“油松之乡”山西太岳山灵空山自然保护区,地处北纬 36°18′—37°05′,东经 111°45′—112°33′,林区平均海拔 1582 m。该区气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,1 月份平均气温为 -10.4℃,7 月份平均气温为 17.4℃,年均气温 8.6℃。年均日照 2500—2700 h,年平均无霜期 179 d。四季分明,春季多风,7—9 月为雨季,年平均降雨量 662 mm,相对湿度 60%—65%。地貌属大起伏喀斯特侵蚀高中山,地形西部陡峭,东部平缓。基岩以花岗岩和石灰岩为主。地带性土壤为黑炉土,高山顶部有草甸、草原土。油松(*Pinus tabulaeformis*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)是本区最有代表性的树种,也是主要森林植被。

2 研究方法

2.1 试验样地特征及设置

2009 年 10 月在自然保护区灵空山林场所辖林班内选取未被破坏的油松人工林建立 1 块 30 m×30 m 的固定样地,通过高压电塔由林场通到固定样地 220 V 交流电。样地海拔 1450 m,土壤厚度 30—50 cm,枯枝落叶层厚度 4—6 cm,土壤表层(0—20 cm)有机质含量(9±1)%,pH 值 6.8—7.2。林分密度为 2213 株/hm²,林龄为 40 a。

2010 年 5 月在固定样地内同一坡位选取 4 个 1 m×1 m 的小样方,在每个小样方内布置 1 个内径为 20 cm,高 10 cm 的 PVC 土壤环,土壤环的一端削尖,压入土中 2—3cm,利用 LI-COR8150-104 气室全天候连续自动监测土壤呼吸,在连续观测过程中,土壤环和 104 气室都保持位置不变。2011 年 5 月实验开展前,在小样方附近放置自动雨量计。

2.2 土壤呼吸速率及温湿度的测定

自 2010 年 5 月起,LI-8150 土壤 CO_2 通量全自动连续测量系统开始监测土壤呼吸速率,每个土壤环测量时间设定为 2 min,每小时 4 个土壤环依次测量一遍,全天 24 h 不间断测量。每个土壤环每小时会被气室罩住约 3 min,其他时间都处于开放状态,因为被隔绝时间比较短,降雨过程中被排除在土壤环外的水分比较少,可以忽略由此造成的误差。在测定土壤呼吸速率的同时,利用 104 气室配套的土壤温湿度传感器测定土壤 5 cm 处的温度和湿度,至 2010 年 10 月底停止测量。整理 2010 年 5—10 月的基础数据,比较 4 个重复土壤环间的差异性,为本研究合理地保留实验重复。本研究的 3 次数据来源于 2011 年 5—10 月的测量,时间分别是 5 月 13 日—5 月 26 日,6 月 26 日—7 月 10 日,8 月 13 日—8 月 25 日。为方便表述,3 次降雨依次简述为第 1 次、第 2 次、第 3 次降雨。

2.3 典型强降雨相关测定

本实验使用自动雨量计记录降雨时间和降雨量(林内穿透雨量),雨后即时收回雨水采用电位法测量雨水 pH 值。分别选取 5、7、8 月各一次典型强降雨(表 1),3 次强降雨情况如下:第 1 次降雨发生在 5 月 18 日 16:00,降雨时间约为 12 h,降雨 19.25 mm,雨强为 1.6 mm/h,这是该地区干湿交替时期的第 1 场降雨;第 2 次降雨发生在 7 月 2—3 日,降雨时间约为 35 h,降雨 50.00 mm,雨强为 1.43 mm/h,此次降雨处于该地区的雨季前期,此前 6 月 24 日降雨 16.24 mm,此后 7 月 10 日再降雨 24.18 mm,属于典型雨季前期降雨事件;第 3 次降雨发生在 8 月 17—19 日,降雨时间约为 60 h,总降雨量为 132.08 mm,雨强为 2.2 mm/h,此次降雨正值该地区雨季,属于连阴雨天的典型降雨事件。

表 1 3 次强降雨的基本情况

Table 1 The basic information of three great rainfalls in 2011

降雨事件 Rain event	研究时间范围 Time range	开始时间 Start	持续时间/h Duration	降雨量/mm Rainfall	pH
第 1 次 First	5 月 13 日—5 月 26 日	5 月 18 日 16:00	12	19.25	4.89
第 2 次 Second	6 月 26 日—7 月 10 日	7 月 2 日 3:00	35	50.00	4.98
第 3 次 Third	8 月 13 日—8 月 25 日	8 月 17 日 2:00	60	132.08	5.54

2.4 数据处理

2.4.1 数据预处理

整理 2010 年 5—10 月的每个土壤环的平均呼吸速率,分别为 1.55, 1.52, 1.56, 1.65 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。为了降低重复之间的差异性,2011 年本实验弃用均值为 1.65 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的土壤环,只保留 3 个重复,使得重复之间的方差最小。将 2011 年的 3 次典型强降雨前后,每小时 3 个环的土壤呼吸速率均值和同步的 5 cm 土壤温湿度均值进行整理。

2.4.2 数据统计分析

采用 Sigma Plot 10.0 软件描述降雨过程及前后的土壤呼吸速率变化和环境因子变化;拟合降雨前、中、后 3 个时期的土壤呼吸速率 soil respiration rate (R_s) 分别与 5 cm 土壤温度 soil temperature (T) 和 5 cm 土壤容积含水量 soil volume water content (W) 之间的单变量土壤呼吸模型。

采用 R 2.11.0 软件分析土壤呼吸和土壤温湿的复合关系,采用 $R_s = ae^{bT}W^c$ 非线性模型,拟合 R_s 与 T 和 W 的双变量关系^[13-14]。

3 结果与分析

3.1 3 次强降雨过程及前后的土壤呼吸速率和环境因子的变化

3.1.1 第 1 次降雨事件

图 1 是 5 月 13 日—5 月 26 日降雨前后 14 d 的土壤呼吸速率和 5 cm 土壤温湿度的变化情况。降雨发生前持续干旱,降雨过程开始于 5 月 18 日 16:00,结束于 5 月 19 日 4:00。在降雨发生前的约 6 d 时间内,土壤

容积含水量平均值为 $0.105 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 降雨结束后, 增长到 $0.243 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 然后逐渐下降, 雨后 8 d 内的平均土壤容积含水量为 $0.153 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 雨后第 8 天下降到约 $0.116 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 降雨改善了土壤水分状况。

由图 1 可以看出, 土壤呼吸和土壤容积含水量的变化曲线走势非常相似, 表明干旱时期水分是促进土壤呼吸的重要因素。降雨结束后的土壤呼吸速率明显比降雨前高, 降雨前约 6 d 内, 土壤呼吸速率平均为 $0.746 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 降雨过程中平均值为 $3.297 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。降雨后约 8 d 内平均值为 $1.473 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 比降雨前增加了约 2 倍。降雨开始的 1—2 h 左右, 土壤容积含水量和土壤呼吸速率都达到了高峰, 说明降雨前期过程非常迅猛, 并且迅速激发了土壤呼吸。降雨结束后的 3—4 d 时间里, 土壤呼吸迅速恢复, 每天峰值有明显的减小趋势, 逐渐恢复到日变化波动的正常水平。土壤温度日均值在雨前不断升高, 降雨过程中其增长趋势未受影响, 但降雨结束后的 3 d 内出现了一定程度的降温, 可能是由于土壤水分的蒸发带走了一定的热量。

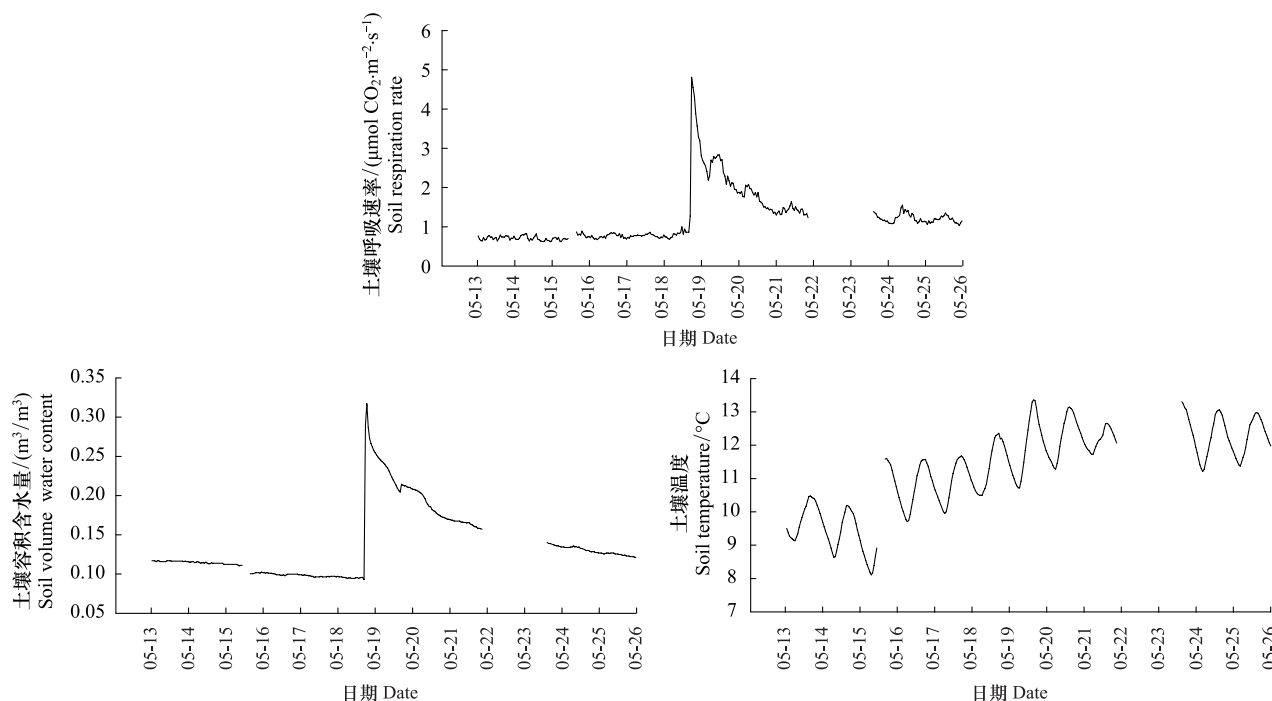


图1 第1次强降雨前后, 土壤呼吸速率、5 cm 土壤容积含水量和 5 cm 土壤温度的变化

Fig. 1 Soil respiration, soil volume water content at 5 cm depth and soil temperature at 5 cm depth changed with time around the first great rainfall in 2011

3.1.2 第2次降雨事件

图 2 是 6 月 26 日—7 月 10 日降雨前后 15 d 的土壤呼吸速率和 5 cm 土壤温湿度的变化情况。降雨过程开始于 7 月 2 日 3:00, 结束于 7 月 3 日 14:00, 本次降雨的特点是发生在该地区的雨季前期, 此前 6 月 24 日降雨 16.24 mm, 此后 7 月 10 日再降雨 24.18 mm。本次降雨前 1 d 土壤容积含水量平均值为 $0.172 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 降雨前 7 d 平均值为 $0.232 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 说明在本次降雨开始时仍处于前一次降雨的雨后恢复过程。本次降雨后最大土壤容积含水量达到 $0.365 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 雨后第 7 天 (7 月 10 日) 上午恢复到 $0.213 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 下午又开始新一场的降雨。显然, 雨后的土壤容积含水量并未降低到雨前水平, 雨季的每一次强降雨都累计增加了土壤的湿度。

由图 2 可以看出, 土壤呼吸速率和土壤容积含水量的变化曲线走势也非常相似。降雨前 1 d 的土壤呼吸速率平均值为 $1.865 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 降雨过程中平均值为 $2.907 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 说明在雨季的开端, 强降雨仍然可以促进土壤呼吸。呼吸速率的最高峰 $3.99 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 出现在降雨开始的 1—2 h 后, 说明降雨前期的迅速激发效果仍然显著。降雨结束后第 3 天土壤呼吸速率基本恢复到降雨前水平。土壤温度日均值在降雨后 2—3 d 内出现一定程度降低, 然后逐渐回升, 第 5 天恢复到降温前水平, 并有持续上升趋势。

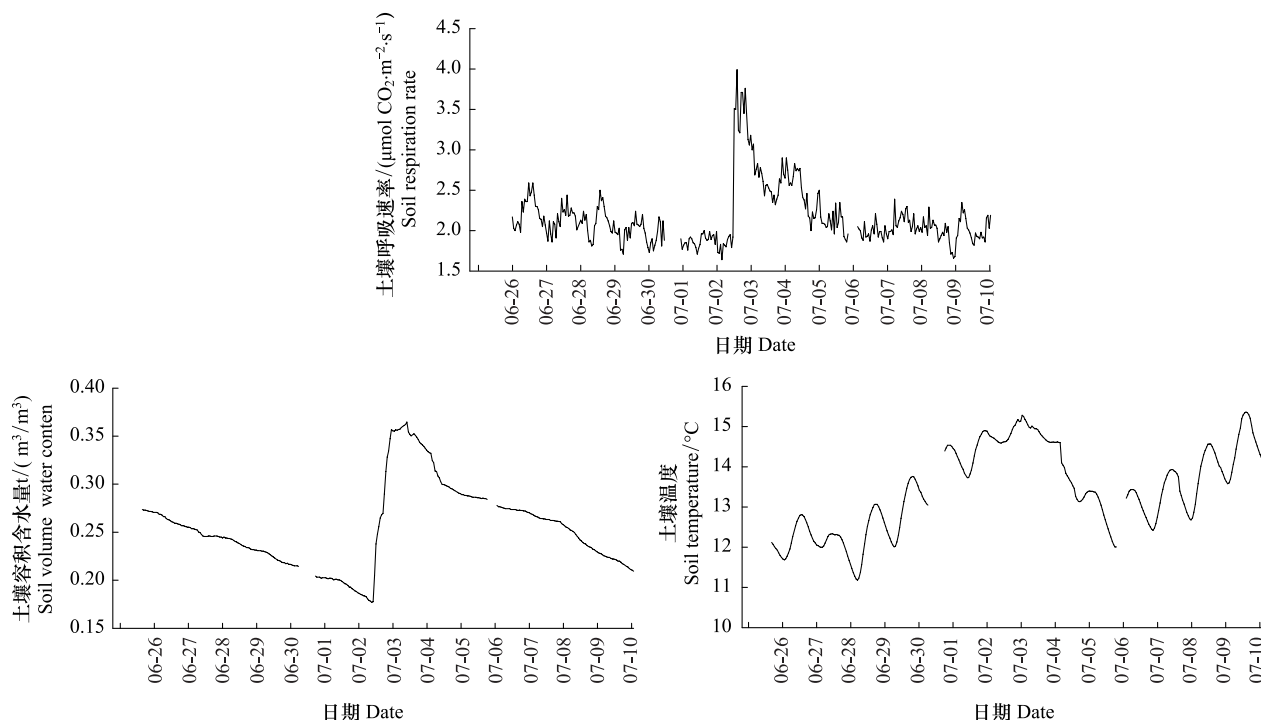


图2 第2次强降雨前后,土壤呼吸速率、5 cm 土壤容积含水量和5 cm 土壤温度的变化

Fig. 2 Soil respiration, soil volume water content at 5 cm depth and soil temperature at 5 cm depth changed with time around the second great rainfall in 2011

3.1.3 第3次降雨事件

图3是8月13日—8月25日连阴强降雨前后13d的土壤呼吸速率和5 cm 土壤温湿度的变化情况。降雨过程开始于8月17日2:00,结束于8月19日14:00。本次降雨正值雨季,8月13日前小规模降雨数天,频繁的降雨使得土壤容积含水量不断累积。本次降雨前土壤容积含水量平均值为 $0.305 \text{ m}^3/\text{m}^3$,降雨过程中平均值为 $0.352 \text{ m}^3/\text{m}^3$,雨后平均值为 $0.325 \text{ m}^3/\text{m}^3$,雨后第6天(8月25日)上午土壤容积含水量 $0.315 \text{ m}^3/\text{m}^3$,下午又开始新的一场降雨。本次连阴强降雨持续了约3 d,每天的降雨都集中在2:00—5:00,土壤容积含水量随之出现峰值,降雨结束后持续了5 d的多云天气。

由图3可以看出,土壤呼吸速率和土壤容积含水量的变化曲线走势呈明显的镜像,表明雨季时期水分是抑制土壤呼吸的重要因素。降雨前,土壤呼吸速率平均值为 $3.127 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,降雨过程中平均值为 $1.695 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,降低了约45%。降雨后平均值为 $2.227 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,相对于雨前降低了约28%。可见,本次降雨整体上抑制了土壤呼吸,尤其在降雨发生过程中更为明显,比如本次降雨过程中土壤容积含水量3次出现波峰,土壤呼吸速率也相应地出现3次明显的波谷,而且一次比一次低。降雨结束后的第6天,土壤呼吸速率为 $2.387 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 尚未恢复到降雨前水平。降雨过程中土壤温度日均值降低了 2.8°C ,降雨结束后土壤温度昼夜变化规律恢复为波动变化,但其峰值连续5 d无升高趋势。

3.2 3次降雨过程及前后的土壤呼吸速率和5 cm 土壤温度之间的关系

表2反映了3次降雨的前、中、后3个时期,土壤呼吸速率对5 cm 土壤温度的响应特征,二者之间的关系可以用指数曲线来描述。从整体上说,旱季到雨季的这3次降雨事件,土壤温度对土壤呼吸速率的解释力一次比一次弱。从每一次降雨来看,雨中土壤温度对土壤呼吸速率的解释力最高,并且雨前明显高于雨后(第2次除外),表现为指数方程的复决定系数 R^2 :雨中>雨前>雨后。

第1次降雨后,由于雨后数天内的土壤增温不足(图1),土壤呼吸速率在恢复状态,而土壤温度近乎稳定,使得二者无法拟合。第2次降雨前数天内,土壤呼吸速率正处于由高到低的恢复状态,而期间的温度是逐

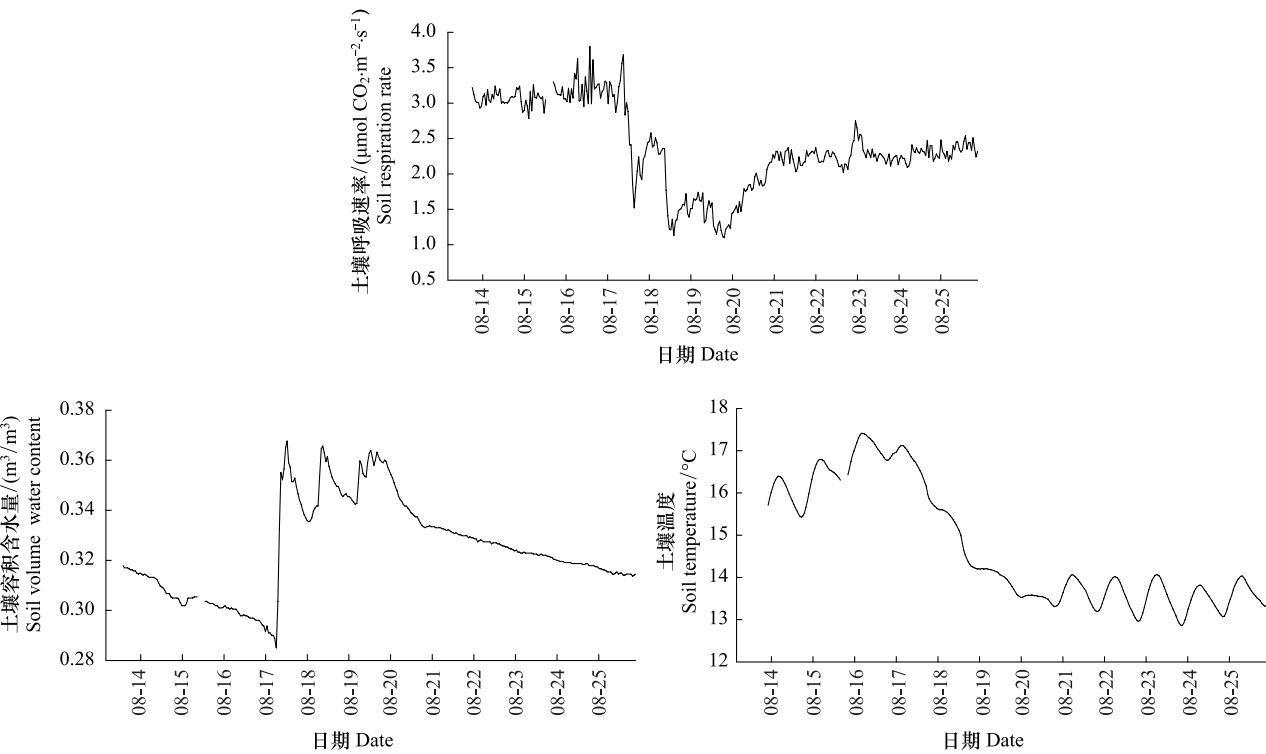


图3 第3次强降雨前后,土壤呼吸速率、5 cm 土壤容积含水量和5 cm 土壤温度的变化

Fig.3 Soil respiration, soil volume water content at 5 cm depth and soil temperature at 5 cm depth changed with time around the third great rainfall in 2011

日递增的,因此呈现负相关关系。第3次降雨后,土壤温度和土壤呼吸速率也无法拟合,原因可能与第1次降雨后情况相似。

表2 3次降雨的前、中、后3个时期,土壤呼吸速率(R_s)与5 cm 土壤温度(T)的指数关系模型($R_s = a e^{bT}$)

Table 2 The exponential relationship between soil respiration rate (R_s) and soil temperature (T) at 5 cm depth before, in and after each of the three rainfalls ($R_s = a e^{bT}$)

降雨事件 Rain event	降雨过程 Process	参数 Parameters			
		a	b	R^2	P
第1次 First time	雨前	0.40	0.06	0.53	<0.001
	雨中	0.02	0.47	0.91	<0.001
	雨后	—	—	—	—
第2次 Second time	雨前	4.29	-0.05	—	—
	雨中	0.02	0.32	0.78	<0.001
	雨后	0.22	0.15	0.47	<0.001
第3次 Third time	雨前	0.37	0.12	0.50	<0.001
	雨中	0.03	0.27	0.71	<0.001
	雨后	—	—	—	—

3.3 3次降雨过程及前后的土壤呼吸速率和5 cm 土壤容积含水量之间的关系

表3反映了3次降雨的前、中、后3个时期,土壤呼吸速率对5 cm 土壤容积含水量的响应特征,二者之间的关系可以用二次多项式曲线来描述。从每一次降雨来看,土壤容积含水量对土壤呼吸速率的解释力为雨中>雨后>雨前。3次降雨前,土壤容积含水量对土壤呼吸速率的解释力为第2次>第1次>第3次,雨中和雨后皆为第1次>第2次>第3次。可知旱季到雨季的这3次降雨事件,土壤容积含水量对土壤呼吸速率的解释力

一次比一次弱。第 1 次降雨前处于旱季,水分是土壤呼吸的主要限制因子。第 2 次降雨前,土壤容积含水量因前一次的降雨(6 月 24 日)而得到改善,但经过 8 d 的蒸发和下渗,土壤水分再次处于相对亏缺状态,所以在旱季和水分相对亏缺的条件下,二次曲线能够很好的反应土壤呼吸速率与土壤容积含水量之间的关系。但在土壤水分充足的条件下,土壤呼吸速率与水分之间的二次曲线关系相对减弱,比如第 3 次降雨发生的前、中、后 3 个时期,土壤呼吸速率与土壤容积含水量之间的相关性都明显比第 1 次和第 2 次降雨弱。

表 3 3 次降雨的前、中、后 3 个时期,土壤呼吸速率(R_s)与 5 cm 土壤容积含水量(W)的二次多项式关系模型($R_s = aW^2 + bW + c$)

Table 3 The quadratic polynomial relationship between soil respiration rate (R_s) and soil volume water content (W) at 5 cm depth before, in and after each of the three rainfalls ($R_s = aW^2 + bW + c$)

降雨事件 Rain event	降雨过程 Process	参数 Parameters				
		a	b	c	R^2	P
第 1 次 First time	雨前	334.4	-74.9	4.9	0.32	<0.001
	雨中	-495.2	308.6	-43.5	0.93	<0.001
	雨后	120.7	-29.0	2.9	0.85	<0.001
第 2 次 Second time	雨前	18.9	-3.8	1.89	0.45	<0.001
	雨中	-46.7	19.3	1.62	0.81	<0.001
	雨后	168.9	-88.7	13.5	0.69	<0.001
第 3 次 Third time	雨前	-74.2	39.2	-1.95	0.07	<0.001
	雨中	1231.0	-904.6	167.4	0.73	<0.001
	雨后	-628.1	396.0	-60.1	0.54	<0.001

4 讨论

4.1 强降雨对土壤呼吸的影响

本研究选在半湿润地区的大岳山油松人工林,对发生在不同时期,降雨前土壤水分条件不同的 3 次典型降雨前后的土壤呼吸速率进行了全天候测定。结果显示,第 1 次和第 2 次降雨使得森林土壤呼吸速率明显增强,这与很多国外的研究结果^[15-18]一致。早在 1958 年, Birch 就观察到即使少量的降雨也会促进土壤呼吸的现象,因此称之为“Birch 效应”^[19]。然而,“Birch 效应”并非成立于所有土壤条件中,对于潮湿的土壤,降雨反而会抑制土壤呼吸^[16,20],比如本实验的第 3 次降雨处于湿润的雨季,土壤呼吸就明显的受到了抑制。本实验在森林生态系统的研究结果,与张红星等人在农田生态系统的研究结果大体一致,即降雨不一定促进或抑制土壤呼吸,降雨对土壤呼吸的影响与土壤自身的水分状况密切相关,通常降雨可以促进干燥土壤的呼吸,抑制潮湿土壤的呼吸。

(1) 迅速激发作用 本实验的前两次降雨开始 1—2 h,土壤呼吸速率迅速增强,这与 Lee 的研究结果^[7]相似,可能因为强降雨带来的置换效应,雨水迅速填充了土壤孔隙,使 CO_2 迅猛地从土壤中排出,但实际上这种置换是此前累积 CO_2 的喷发^[12]。土壤呼吸的迅速增加还可能与底物供应改变机制有关:其一,降雨迅速改变了地表凋落物的水分状况,湿润的环境使其分解速率加快。研究表明,与温度相比,地表凋落物分解更依赖于水分的供给^[7,21]。其二,虽然根呼吸组分依赖于地上部的光合作用,对降雨的响应非常慢,但是根与根系共生菌的呼吸作用使根际周围土壤溶液聚集了高浓度的 HCO_3^- ,与 Ca^{2+} 结合形成碳酸盐短期储存碳,当降雨为酸雨(表 1)时就会迅速转化为 CO_2 ,从而短时间内激发 CO_2 的大量释放。近年来,除了已被普遍接受的底物供应改变机制,微生物胁迫机制也取得了一些进展,Stephan 利用碳同位素标记发现,随着土壤水势迅速增加,土壤微生物通过渗透调节作用将大量的含碳化合物从细胞体内排出,这些物质的快速矿化引起了 CO_2 释放量的迅速增加^[22]。

(2) 持续时间 对于干旱或水分相对亏缺的土壤,降雨能够迅速激发土壤呼吸,通常这种激发效应可以持续 2—6 d^[23-24],本实验前两次降雨的结果与之相符合,土壤呼吸速率用了 3—4 d 恢复到降雨前水平。一方面,可能与地表凋落物分解速率的变化有关,从雨后到凋落物变干的数天内,凋落物分解将主导着土壤呼吸,

随着凋落物含水率的下降,其分解对土壤呼吸的贡献也逐渐降低^[21];另一方面,可能与土壤有机质分解速率的变化有关,随着雨后温度升高,土壤水分再次相对亏缺,土壤有机质大部分被土壤团聚体包裹而结合愈加紧密,使其更难被微生物分解,致使其分解对土壤呼吸的贡献也逐渐降低^[25]。但究竟是哪方面起着主要的影响作用,还是另有未知的影响因素,有待于今后通过区分土壤呼吸各组分,进一步去探索其内在响应机制。

但是,当雨季土壤水分比较充足时,第3次降雨在6 d后土壤呼吸速率仍然没有恢复到降雨前水平。从土壤容积含水量考虑,第3次降雨量最大,且雨后的蒸发速度最慢,土壤容积含水量持高不下,水分占据了绝大部分的土壤孔隙,土壤的通透性变差,所以土壤呼吸可能更长的时间处于被抑制的状态。从土壤温度的角度分析,每一次降雨结束后土壤温度都有一定程度下降,较低的温度更利于土壤呼吸速率由高向低的恢复,所以前两次雨后的土壤呼吸速率恢复比较快。但第3次降雨后,受到抑制的土壤呼吸速率是由低向高恢复,且由于降雨长达60 h,降雨过程中土壤温度日均值已经下降了2.8℃,研究显示土壤温度在雨后数天无升高趋势,这在一定程度上会阻碍土壤呼吸速率的恢复进程,所以雨季的强降雨对土壤呼吸的影响持续时间更长。

(3)水分临界点 第2次降雨的35 h过程中,土壤呼吸在前15 h内得到促进,而后来近20 h的降雨过程中受到了抑制,但整体上第2次降雨仍然是促进了土壤呼吸。由此可知,7月时土壤容积含水量与土壤呼吸速率的二次曲线出现了拐点,此拐点对应的容积含水量可以作为判定促进或抑制作用的临界点^[11-12]。第2次的降雨过程中,当土壤容积含水量小于临界容积含水量时,降雨的发生促进土壤呼吸;当超过临界点时,土壤呼吸就会开始减弱,降雨对土壤呼吸体现出抑制作用。如果降雨发生前土壤容积含水量就介于临界容积含水量以上,那么降雨过程就会一直抑制土壤呼吸,正如第3次降雨的整个过程所表现的:由于阴雨不断,土壤容积含水量不断增加,使得土壤呼吸不断的受到抑制,3 d的连阴强降雨,每一天的土壤呼吸速率的谷底值都在降低,因此第3次降雨土壤容积含水量与土壤呼吸速率的二次曲线不存在拐点。

4.2 降雨前后影响土壤呼吸的关键因子

拟合土壤呼吸速率与5 cm土壤温度、5 cm土壤容积含水量的双变量非线性模型(表4),以期阐释发生在不同时期的每次强降雨前后影响土壤呼吸的关键因子。从整体上看,旱季到雨季的这3次降雨事件,土壤温湿度两因子对土壤呼吸速率的共同解释力一次比一次弱,这与两个因子单独解释土壤呼吸速率变化的规律一致。

表4 3次降雨的前、中、后3个时期,土壤呼吸速率(R_s)与5 cm土壤温度(T)、5 cm土壤容积含水量(W)的双变量非线性模型($R_s = a e^{bT} W^c$)

Table 4 The Non-linear relationship between soil respiration rate (R_s) and soil temperature (T) at 5 cm depth as well soil volume water content (W) at 5 cm depth before, in and after each of the three rainfalls($R_s = a e^{bT} W^c$)

降雨事件 Rain event	降雨过程 Process	参数 Parameters				
		a	b	c	R^2	P
第1次 First time	雨前	0.28	0.04	-0.24	0.40	<0.001
	雨中	0.37	0.32	1.14	0.98	<0.001
	雨后	7.63	0.05	1.19	0.74	<0.001
第2次 Second time	雨前	4.38	0.01	0.64	0.43	<0.001
	雨中	0.02	0.28	-0.87	0.87	<0.001
	雨后	1.71	0.10	0.98	0.68	<0.001
第3次 Third time	雨前	1.34	1.873×10^{-5}	-0.71	0.14	<0.001
	雨中	5.86×10^{-4}	0.19	-4.80	0.81	<0.001
	雨后	0.11	0.01	-2.57	0.49	<0.001

为找出3次降雨的不同阶段影响土壤呼吸的关键因子,对每次降雨的不同阶段,单因子的解释力和双因子的共同解释力进行比对分析。结果如下:第1次降雨的雨前、雨中、雨后3个阶段,影响土壤呼吸的关键因子分别是土壤温度、土壤温湿综合作用、土壤容积含水量,分别解释了土壤呼吸速率变化的53%、98%、85%;第2次降雨的雨前、雨中、雨后3个阶段,影响土壤呼吸的关键因子分别是土壤容积含水量、土壤温湿综合作

用、土壤容积含水量,分别解释了土壤呼吸速率变化的 45%、87%、69%;第 3 次降雨的雨前、雨中、雨后 3 个阶段,影响土壤呼吸的关键因子分别是土壤温度、土壤温湿综合作用、土壤容积含水量,分别解释了土壤呼吸速率变化的 50%、81%、54%。

可见,在土壤容积含水量一直较低的旱季或是一直较高的多云雨季,降雨前后过程中影响土壤呼吸的关键因子是一致的:雨前土壤温度是关键因子,雨后土壤容积含水量是关键因子。但是当土壤容积含水量在短期处于动态变化时,比如 7 月份的第 2 次降雨前数天晴朗无云,此期间正处于前一次降雨的雨后恢复阶段,所以土壤呼吸速率不断降低,显然不断升高的土壤温度无法解释土壤呼吸速率的变化,而期间土壤容积含水量是不断降低的,所以土壤容积含水量成为第 2 次降雨前影响土壤呼吸的关键因子。综上所述:降雨前,如果土壤容积含水量处于明显变化的状态,水分是影响土壤呼吸的关键因子;如果土壤容积含水量比较稳定,则土壤温度是关键因子。降雨过程中由土壤温湿共同影响土壤呼吸,降雨结束后水分是影响土壤呼吸的关键因子。

References:

- [1] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 1991, 351 (6324): 304-306.
- [2] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 23-36.
- [3] Davidson E A, Savage K, Verchot L V, Navarro R. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 21-37.
- [4] Ehleringer J R, Schwinning S, Gebauer R. Water use in arid land ecosystems // Press M C, Scholes J D, Barker M G, eds. *Plant Physiological Ecology*. Blackwell, Edinburgh; Oxford, 1999: 347-365.
- [5] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, Joshua Leffler A, Ogle K, Pockman W T, Sandquist D R, Potts D L, Schwinning S. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 254-268.
- [6] Zhang L H, Chen Y N, Zhao R F, Li W H. Significance of temperature and soil water content on soil respiration in three desert ecosystems in Northwest China. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(10): 1200-1211.
- [7] Lee X H, Wu H J, Sigler J, Oishi C, Siccama T. Rapid and transient response of soil respiration to rain. *Global Change Biology*, 2004, 10(6): 1017-1026.
- [8] Wu H J, Lee X H. Short-term effects of rain on soil respiration in two New England forests. *Plant and Soil*, 2011, 338(1/2): 329-342.
- [9] Liu Y Y, Jiang H, Li Y H, Yuan H Y. A short-term effect of simulated acid rain on the soil respiration of the compound system of Chinese fir seedling-soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(8): 2010-2017.
- [10] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, Mo W H, Koizumi H. Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest. *Ecological Research*, 2002, 17(3): 401-409.
- [11] Zhang H X, Wang X K, Feng Z W, Song Z W, Liu W Z, Li S J, Pang J Z, Ouyang Z Y. The great rainfall effect on soil respiration of wheat field in semi-arid region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6189-6196.
- [12] Wang Y D, Wang H M, Ma Z Q, Li Q K, Shi L L, Xu F. Review of response mechanism of soil respiration to rainfall. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 601-610.
- [13] Li H J, Yan J X, Yue X F, Wang M B. Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2008, 148(3): 490-503.
- [14] Yan J X, Qin Z D, Zhang Y H, Li H J. Effect of soil temperature and moisture on soil CO₂ efflux in a *Pinus tabulaeformis* forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (12): 6366-6376.
- [15] 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. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [16] Davidson E A, Verchot L V, Catt  nio J H, Ackerman I L, Carvalho J E M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 53-69.
- [17] Inghima I, Alberti G, Bertolini T, Vaccari F P, Gioli B, Miglietta F, Cotrufo M F, Peressotti A. Precipitation pulses enhance respiration of Mediterranean ecosystems: the balance between organic and inorganic components of increased soil CO₂ efflux. *Global Change Biology*, 2009, 15 (5): 1289-1301.
- [18] Shi W Y, Tateno R, Zhang J G, Wang Y L, Yamanaka N, Du S. Response of soil respiration to precipitation during the dry season in two typical

- forest stands in the forest-grassland transition zone of the Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 854-863.
- [19] Birch H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and Soil*, 1958, 10(1): 9-31.
- [20] Cavelier J, Penzuela M C. Soil respiration in the cloud forest and dry deciduous forest of Serrania de Macuira, Colombia. *Biotropica*, 1990, 22(4): 346-352.
- [21] Cisneros-Dozal L M, Trumbore S, Hanson P J. Partitioning sources of soil-respired CO₂ and their seasonal variation using a unique radiocarbon tracer. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 194-204.
- [22] Unger S, Máguas C, Pereira J S, David T S, Werner C. The influence of precipitation pulses on soil respiration-Assessing the "Birch effect" by stable carbon isotopes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1800-1810.
- [23] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 426-436.
- [24] Norton U, Mosier A R, Morgan J A, Derner J D, Ingram L J, Stahl P D. Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(6): 1421-1431.
- [25] Xiang S R, Doyle A, Holden P A, Schimel J P. Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2281-2289.

参考文献:

- [9] 刘源月, 江洪, 李雅红, 原焕英. 模拟酸雨对杉木幼苗-土壤复合体系土壤呼吸的短期效应. *生态学报*, 2010, 30(8): 2010-2017.
- [11] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 宋文质, 刘文兆, 李双江, 庞军柱, 欧阳志云. 黄土高原小麦田土壤呼吸对强降雨的响应. *生态学报*, 2008, 28(12): 6189-6196.
- [12] 王义东, 王辉民, 马泽清, 李庆康, 施蕾蕾, 徐飞. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 601-610.
- [14] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 李洪建. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2009, 29(12): 6366-6376.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 6 March, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Review and Monograph

- Forest health studies based on remote sensing: a review GAO Guanglei, XIN Zhongbao, DING Guodong, et al (1675)
- Progress of agent-based agricultural land change modeling: a review YU Qiangyi, WU Wenbin, YANG Peng, et al (1690)

Autecology & Fundamentals

- Dynamic distribution of *Nemopilema nomurai* in inshore waters of the northern Liaodong Bay, Bohai Sea WANG Bin, QIN Yubo, DONG Jing, et al (1701)
- Full length cDNA cloning and tissue expression of prophenoloxidase from *Oratosquilla oratoria* LIU Haiying, LIU Lianwei, JIANG Yusheng, et al (1713)
- Morphometrics investigation of the skulls, mandibles and molar in *Tupaia belangeri* from Yunnan, Guizhou, Guangxi ZHU Wanlong, JIA Ting, HUANG Chunmei, et al (1721)
- Effects of litter thickness on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests JI Xiaoyan, JIANG Hong, HONG Jianghua, et al (1731)
- The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species in northern Zhejiang ZHANG Jiao, SHI Yongjun, ZHU Yueqing, et al (1740)
- Diurnal changes in the photosynthetic characteristics of two high yield and high quality grasses during different stages of growth and their response to changes in light intensity GUO Chunyan, LI Jinchuan, YUE Jianying, et al (1751)
- Evaluation technology on drought disaster to yields of winter wheat based on WOFOST crop growth model ZHANG Jianping, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi, et al (1762)
- Genetic diversity of *Conocephalus maculatus* of different geographic populations based on mitochondrial DNA control region analysis ZHOU Zhijun, SHANG Na, LIU Jing, et al (1770)
- Relationships among female body size, clutch size, and egg size in captive *Deinagkistrodon acutus* HU Minghang, TAN Qunying, YANG Daode (1778)
- The field control of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) with parasitoid and sterile male ZHENG Sining, HUANG Juchang, YE Guanglu, et al (1784)
- Allelopathic effects of artemisinin on ectomycorrhizal fungi LI Qian, YUAN Ling, WANG Mingxia, et al (1791)

Population, Community and Ecosystem

- Establishment of integrated methodology for bay ecosystem health assessment and its application in Daya Bay LI Chunhou, LIN Lin, XU Shannan, et al (1798)
- The influence of upwelling and water mass on the ecological group distribution of zooplankton in Zhejiang coastal waters SUN Lufeng, KE Chang, XU Zhaoli, et al (1811)
- Identification of key ecosystem for ecological restoration in semi-arid areas: a case study in Helin County, Inner Mongolia PENG Yu, GAO Ying, FENG Jinzhao, et al (1822)
- The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain JIN Guanyi, ZHAO Xiuhai, KANG Fengfeng, et al (1832)
- The litter-fall characteristics and their response to drought stress in the Masson pins forests damaged by acid rain at Chongqing, China WANG Yihao, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1842)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Thermal environment effect of urban water landscape YUE Wenzhe, XU Lihua (1852)
- Landscape ecological security pattern associated with the introduction of exotic tree species *Eucalyptus* ZHAO Xiaoqing, HE Chunlan (1860)
- Ecological balance between supply and demand in Chongqing City based on cultivated land ecological footprint method SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1872)
- Effect of elevated CO₂ on methanotrophs in the rhizosphere of rice plant YAN Chen, XU Jing, ZHONG Wenhui, et al (1881)

Resource and Industrial Ecology

- The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model KE Lina, WANG Quanming, SUN Xinguo, et al (1889)
- An *in situ* study on biodeposition of ascidian (*Styela plicata*) in a subtropical aquaculture bay, southern China YAN Jiaguo, QI Zhanhui, TIAN Ziyang, et al (1900)
- Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical apple orchards on the Loess Plateau ZHANG Lina, LI Jun, FAN Peng, et al (1907)
- Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields ZHANG Dingchen, CAI Dianxiong, DAI Kuai, et al (1916)
- Photosynthetic characteristics of soybean and salvia in an agroforestry system in the Hilly Region, Shangluo, China PENG Xiaobang, ZHANG Shuoxin (1926)
- Regulation of exogenous brassinosteroid on growth and photosynthesis of *Helianthus tuberosus* seedlings and cadmium biological enrichment under cadmium stress GAO Huiling, LIU Jinlong, ZHENG Qingsong, et al (1935)
- Calibration coefficients of Granier original formula based on sap flow of *Platycladus orientalis* LIU Qingxin, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (1944)

Research Notes

- An evaluation index system classifying the conservation value of wetland nature reserves based on AHP SUN Rui, CUI Guofa, LEI Ting, et al (1952)
- Root biomass and its distribution of *Azadirachta indica* and *Acacia auriculiformis* plantations in the Dry-hot Valley GAO Chengjie, TANG Guoyong, LI Kun, et al (1964)
- Physiological response of *Vitex trifolia* to sand burial in the sand coast ... ZHOU Ruilian, WANG Jin, YANG Shuqin, et al (1973)
- Soil fertility under different forest types in the Helan and Liupan Mountain ranges of Ningxia Province JIANG Lin, GENG Zengchao, ZHANG Wen, et al (1982)

Opinions

- Dynamic of litterfall in ten typical community types of Xiaoxing'an Mountain, China HOU Lingling, MAO Zijun, SUN Tao, et al (1994)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 6 期 (2013 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 6 (March, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元