

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

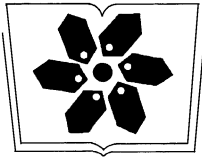
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 24 期 Vol.32 No.24 **2012**

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 32 卷 第 24 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

从文献计量角度分析中国生物多样性研究现状.....	刘爱原,郭玉清,李世颖,等 (7635)
CO ₂ 浓度升高和模拟氮沉降对青川箭竹叶营养质量的影响.....	周先容,汪建华,张 红,等 (7644)
陕西中部黄土高原地区空气花粉组成及其与气候因子的关系——以洛川县下黑木沟村为例.....	吕素青,李月从,许清海,等 (7654)
长三角地区 1995—2007 年生态资产时空变化.....	徐昔保,陈 爽,杨桂山 (7667)
基于智能体模型的青岛市林地生态格局评价与优化.....	傅 强,毛 锋,王天青,等 (7676)
青藏高原高寒草地生态系统服务功能的互作机制.....	刘兴元,龙瑞军,尚占环 (7688)
北京城市绿地的蒸腾降温功能及其经济价值评估.....	张 彪,高吉喜,谢高地,等 (7698)
武汉市造纸行业资源代谢分析.....	施晓清,李笑诺,赵吝加,等 (7706)
丽江市家庭能耗碳排放特征及影响因素.....	王丹寅,唐明方,任 引,等 (7716)
基于分布式水文模型和福利成本法的生态补偿空间选择研究.....	宋晓谕,刘玉卿,邓晓红,等 (7722)
设施塑料大棚风洞试验及风压分布规律.....	杨再强,张 波,薛晓萍,等 (7730)
湖南珍稀濒危植物——珙桐种群数量动态.....	刘海洋,金晓玲,沈守云,等 (7738)
云南岩陀及其近缘种质资源群体表型多样性.....	李萍萍,孟衡玲,陈军文,等 (7747)
沙埋和种子大小对柠条锦鸡儿种子萌发、出苗和幼苗生长的影响.....	杨慧玲,梁振雷,朱选伟,等 (7757)
栗山天牛天敌花绒寄甲在栎林中的种群保持机制.....	杨忠岐,唐艳龙,姜 静,等 (7764)
基于相邻木排列关系的混交度研究.....	娄明华,汤孟平,仇建习,等 (7774)
三种回归分析方法在 Hyperion 影像 LAI 反演中的比较.....	孙 华,鞠洪波,张怀清,等 (7781)
红松和蒙古栎种子萌发及幼苗生长对升温与降水综合作用的响应.....	赵 娟,宋 媛,孙 涛,等 (7791)
新疆杨边材贮存水分对单株液流通量的影响.....	党宏忠,李 卫,张友焱,等 (7801)
火干扰对小兴安岭毛赤杨沼泽温室气体排放动态影响及其影响因素.....	顾 韩,牟长城,张博文 (7808)
不同潮汐和盐度下红树植物幼苗秋茄的化学计量特征.....	刘滨尔,廖宝文,方展强 (7818)
腾格里沙漠东南缘沙质草地灌丛化对地表径流及氮流失的影响.....	李小军,高永平 (7828)
西双版纳人工雨林群落结构及其林下降雨侵蚀力特征.....	邓 云,唐炎林,曹 敏,等 (7836)
西南高山地区净生态系统生产力时空动态.....	庞 瑞,顾峰雪,张远东,等 (7844)
南北样带温带区栎属树种种子化学组成与气候因子的关系.....	李东胜,史作民,刘世荣,等 (7857)
模拟酸雨对龙眼叶片 PS II 反应中心和自由基代谢的影响.....	李永裕,潘腾飞,余 东,等 (7866)
沈阳市城郊表层土壤有机污染评价.....	崔 健,都基众,马宏伟,等 (7874)
降雨对旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响.....	高 翔,郝卫平,顾峰雪,等 (7883)
冬季作物种植对双季稻根系酶活性及形态指标的影响.....	于天一,逢焕成,任天志,等 (7894)
施氮量对小麦/玉米带田土壤水分及硝态氮的影响.....	杨蕊菊,柴守玺,马忠明 (7905)
微山湖鸟类多样性特征及其影响因素.....	杨月伟,李久恩 (7913)
新疆北部棉区作物景观多样性对棉铃虫种群的影响.....	吕昭智,潘卫林,张 鑫,等 (7925)
杭州西湖北里湖沉积物氮磷内源静态释放的季节变化及通量估算.....	刘静静,董春颖,宋英琦,等 (7932)
基于实码遗传算法的湖泊水质模型参数优化.....	郭 静,陈求稳,张晓晴,等 (7940)
气候环境因子和捕捞压力对南海北部带鱼渔获量变动的影响.....	王跃中,孙典荣,陈作志,等 (7948)
象山港南沙岛不同养殖类型沉积物酸可挥发性硫化物的时空分布.....	颜婷茹,焦海峰,毛玉泽,等 (7958)
专论与综述	
提高植物抗寒性的机理研究进展.....	徐呈祥 (7966)
植被对多年冻土的影响研究进展.....	常晓丽,金会军,王永平,等 (7981)
凋落物分解主场效应及其土壤生物驱动.....	查同刚,张志强,孙 阁,等 (7991)
街尘与城市降雨径流污染的关系综述.....	赵洪涛,李叙勇,尹澄清 (8001)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 374 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 40 * 2012-12



封面图说: 永兴岛海滩植被——永兴岛是中国西沙群岛的主岛,也是西沙群岛及南海诸岛中最大的岛屿。国务院 2012 年 6 月批准设立的地级三沙市,管辖西沙群岛、中沙群岛、南沙群岛的岛礁及其海域,三沙市人民政府就驻西沙永兴岛。永兴岛岛上自然植被密布,野生植物有 148 种,占西沙野生植物总数的 89%,主要树种有草海桐(羊角树)、麻枫桐、野枇杷、海棠树和椰树等。其中草海桐也称为羊角树,是多年生常绿亚灌木植物,它们总是喜欢倚在珊瑚礁岸或是与其他滨海植物聚生于海岸沙滩,为典型的滨海植物。

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

DOI: 10.5846/stxb201202240248

高翔, 郝卫平, 顾峰雪, 郭瑞, 夏旭, 梅旭荣, 李洁. 降雨对旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响. 生态学报, 2012, 32(24): 7883-7893.

Gao X, Hao W P, Gu F X, Guo R, Xia X, Mei X R, Li J. The impact of rainfall on soil respiration in a rain-fed maize cropland. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(24): 7883-7893.

降雨对旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响

高翔, 郝卫平, 顾峰雪*, 郭瑞, 夏旭, 梅旭荣, 李洁

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部旱作节水农业重点实验室, 北京 100081)

摘要: 土壤呼吸是调控全球碳平衡和气候变化的关键过程之一, 降雨作为重要的扰动因子, 在不同区域和不同环境条件下, 对土壤呼吸具有复杂的影响。研究降雨对农田土壤呼吸及其分量的影响, 对准确预测未来气候变化下陆地生态系统碳平衡具有重要意义。对黄土高原东部典型春玉米农田生态系统生长季内 3 次降雨前后土壤呼吸及其分量进行了原位连续观测, 结果表明: 在土壤湿润的条件下, 降雨对春玉米农田土壤呼吸及其分量具有明显的抑制作用, 在土壤湿度大于 27% 后土壤呼吸及其分量随土壤湿度上升呈明显下降, 且对温度的敏感性降低。土壤呼吸及其分量在降雨前后的变化受土壤温度和土壤湿度的共同影响。降雨量、降雨历时和雨前土壤含水量决定了土壤呼吸及其分量对降雨响应的程度和时长。土壤呼吸及其分量对土壤温度的敏感性各不相同, 微生物呼吸对温度的敏感性最高, Q_{10} 为 5.14; 其次是土壤呼吸, Q_{10} 为 3.86; 根呼吸的温度敏感性相对最低, Q_{10} 为 3.24。由于土壤呼吸分量对温度和湿度的敏感性不同, 降雨后根呼吸的比例有所升高。

关键词: 降雨; 土壤呼吸; 抑制; 温度敏感性; 旱作农田

The impact of rainfall on soil respiration in a rain-fed maize cropland

GAO Xiang, HAO Weiping, GU Fengxue*, GUO Rui, XIA Xu, MEI Xurong, LI Jie

Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Dryland Agriculture, Ministry of Agriculture, P. R. China, Beijing 100081, China

Abstract: The research on the impact of rainfall on soil respiration is significant to predict accurately the carbon balance of terrestrial ecosystems under future climate change. It is consensus that a certain degree of drought would suppress soil respiration, as well as the processes of water, carbon and nitrogen would be excited after re-watering by precipitation or irrigation. However, some research showed the suppression of soil respiration by precipitation. As a disturbance factor, the effect of precipitation on soil respiration is complex because of different vegetation and soil type in different regions. It is necessary to reveal the impact of rainfall amount, intensity and duration on soil respiration under different soil water content, as well to make clear the turning point of suppression or excitation of soil respiration in different regions. In a maize cropland located at eastern Loess Plateau, soil respiration and its components was measured continuously around 3 rainfall incidents based on in situ observation technique, and the impact of rainfall on soil respiration and its components was analyzed.

The study was conducted in Shouyang county, Shanxi Province. It is a semi-humid area. The seasonal variation of precipitation is large, about 70% of annual amount occurs from June to September. In the field of maize cropland, soil respiration and its components were measured continuously by LI-8150 Soil CO₂ Flux System. Soil respiration was divided into microbial respiration and root respiration respectively based on root exclude method. Each treatment was repeated

基金项目: 国家自然科学基金项目(31070398); 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB833503); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(BSRF201105)

收稿日期: 2012-02-24; **修订日期:** 2012-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gufx@ieda.org.cn

twice, and there were 4 observation fields in total.

There were 3 rainfalls recorded during July and August, and we analyzed the variation of soil respiration and its components before and after the 3 rainfalls. The results showed that rainfall suppressed the soil CO₂ efflux obviously under high soil water content. When soil volumetric water content was higher than 21.2%, 20.7% and 21.8%, respectively, soil respiration, microbial respiration and root respiration decreased obviously with the increase of soil water content, and the sensitivity of soil respiration to soil temperature also decreased. The variation of soil respiration and its components were influenced by both soil temperature and moisture. The amount and duration of rainfall and soil water content before rainfall decided the intensity and duration of response to precipitation. The temperature sensitivity of soil respiration and its components were different with each other. The temperature sensitivity of microbial respiration was the highest, Q_{10} was 5.14, and the second highest was soil respiration with Q_{10} 3.86. The temperature sensitivity of root respiration was the lowest, and Q_{10} was 3.24. The ratio of root respiration to soil respiration increased after rainfall because the different sensitivity of respiration to temperature and moisture. Two factor model, including soil temperature and soil water content, was able to evaluate the response of soil respiration and microbial respiration to the variation of environmental factors in the maize ecosystem.

Key Words: rainfall; soil respiration; suppression; temperature sensitivity; rain-fed cropland

土壤呼吸是碳循环的重要组成部分,其微小变化就能够对大气中 CO₂ 浓度产生较大影响^[1],因此,土壤呼吸作为影响全球气候变化的关键生态过程,已成为全球碳循环研究的核心问题^[2],详细分析土壤呼吸的动态及其控制因素对于准确预测未来气候变化条件下碳循环的变化具有重要意义^[3]。研究表明土壤温度和土壤湿度是影响土壤呼吸的最重要的环境因子^[4-7],而且土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸的影响存在相互作用,并且土壤呼吸的温度、湿度敏感性受其自身约束^[8-11]。微生物呼吸和根呼吸约占到农田土壤呼吸的 95%^[12],不同生态系统的土壤呼吸中,微生物呼吸和根呼吸所占的比例也不同^[13-16],而它们对土壤温、湿度的变化也有不同的响应^[17-18]。在土壤温、湿度改变的情况下,微生物呼吸和根呼吸对温、湿度的不同敏感性会造成土壤呼吸不同的变化趋势。

未来气候变化条件下,降雨量和降雨格局将会发生较大变化,而干旱和极端降水的频率也会增加^[19]。降雨变化对生态系统的影响研究受到越来越多的重视。降雨对土壤温度和土壤湿度都会产生显著影响,并直接影响土壤呼吸的动态^[20]。Birch^[21]早在 1958 年就观测发现降雨会强烈激发土壤呼吸,因此也将这一现象称为“Birch 效应”,尽管其后有众多的研究发现了降雨对土壤呼吸的激发作用^[10,22-27],并且有研究表明雨前土壤水分含量越低,降雨的激发效应越强^[28],土地利用方式对激发效应也有影响^[27]。但是,同时也有研究发现,降雨明显抑制了土壤呼吸^[29-31]。降雨是土壤水分的主要来源,土壤水分适中时土壤呼吸速率最大,土壤水分过多或不足均会抑制土壤呼吸^[32-33],但是不同区域内,由于土壤类型和生态系统的差异,土壤呼吸速率最大的适中土壤水分含量存在较大差异。因此,需要对不同区域内不同类型的土壤和生态系统开展原位连续的观测研究,评价不同土壤湿度条件下,不同水平的降雨量、降雨强度和降雨历时等对土壤呼吸及其分量的影响,确定不同区域内,降雨激发或抑制土壤呼吸的土壤水分临界值,从而为准确评价未来气候变化对区域碳平衡的影响提供科学依据。在雨养农业区域,生长季作物的生长和产量均依赖于降水,土壤受降水的影响,频繁处于干旱和复水的过程中,对于农田土壤呼吸响应降雨变化的研究还相对较少,因此,本研究选择半湿润偏旱的黄土高原东部典型春玉米农田生态系统,采用原位连续监测技术,对生长季内 3 次降雨对土壤呼吸及其分量的影响进行了连续观测,从而探讨生长季降雨对土壤呼吸及其分量的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

试验在山西寿阳旱作农业野外科学观测试验站进行,该站位于黄土高原东部属晋东豫西典型旱作农业

区,海拔 1202m,东经 113°12',北纬 37°45'。本地区为半湿润偏旱地区,降雨年际变化大,年均降雨量为 481mm,且年内分布不均,主要集中在 6 月至 9 月,占全年降雨量的 70% 以上,有明显的湿润季节。年平均气温 7.4℃,无霜期为 140d 左右^[34]。当地种植模式为一年一熟。

1.2 样地特征

春玉米是该研究区域广泛种植的农作物,供试验玉米品种为京单 951,5 月初播种,10 月中旬收获,且整个生育期内没有施肥。试验土壤为褐土,轻壤,土层深厚,耕层土壤有机质含量为 9.00g/kg,碱解氮 85.30mg/kg,田间持水量为 36.2% (体积含水量)。

1.3 环境因子及土壤呼吸及其分量的观测

采用根排除法将土壤呼吸拆分为根呼吸和微生物呼吸,即根呼吸等于土壤呼吸与微生物呼吸之差^[6]。2011 年 4 月 29 日(土壤翻耕后,春玉米播种前)将自制 40cm×40cm×40cm 铁框完全砸入试验典型区域土壤内,在铁框的中央设置 PVC 测量环(内径 20.3cm,高 10cm),用来观测微生物呼吸,在其临近处另设置不做任何处理的 PVC 环,用来测定土壤呼吸,并各重复两次,共 4 个测量点。本研究采用 LI-8150 多通道土壤呼吸自动测量系统(LI-COR 公司,美国)对土壤呼吸进行连续观测,测量室为 8100-104 土壤呼吸长期监测室,每小时采样 1 次,采样期间测量室依次关闭 4min 用于测量,其它时间测量室处于打开状态。每个测量室都配有一个 T 型热电偶和 ECH₂O 传感器分别用来测量 10cm 处的土壤温度和土壤体积含水量,且微生物呼吸测量点的 T 型热电偶和 ECH₂O 传感器埋设在铁框内。降雨量采用 TE525 雨量筒(Texas Electronics 公司,美国)观测,每 30min 记录 1 次数据,数据采集系统为 CR3000(Campbell 公司,美国)。

1.4 数据处理

通过对 7 月 29 日降雨后 4 个测量点的土壤温度和土壤含水量的数据分析,结果表明铁框内外 10cm 处的土壤温度、土壤含水量差异不显著($n=20, P>0.05$)。因此为简化分析过程,土壤温度、土壤含水量数据均采用 4 个测量点的获得数据的平均值,土壤呼吸和微生物呼吸测量值采用同一处理内两个观测点的平均值。10cm 处土壤温度(T)和土壤含水量(W)对土壤呼吸及其分量的影响分别应用 $R = \alpha \exp(\beta T)$ 模型^[35]和 $R = a + bW + cW^2$ 模型模拟,然后应用 $\ln R = a + bT + cT^2 + dW + eW^2$ 模型^[36]对土壤呼吸及其分量与 10cm 处土壤温度、土壤含水量关系进行拟合。做图采用 Excel 软件,方程参数拟合使用 DPS11.5,数据的方差分析、回归分析和相关分析在 SPSS10.0 中进行。

2 结果与分析

2.1 降雨前后土壤呼吸及其分量与土壤温度、土壤含水量的变化

研究时段内 3 次降雨基本情况如下:第 1 次降雨发生在 2011 年 7 月 29 日 11:30 至 23:30,降雨量为 70.1mm,春玉米生育期为抽雄期;第 2 次降雨发生在 2011 年 8 月 12 日 14:30 至 15:00,属于阵性强降雨,降雨量为 27.4mm,春玉米生育期为吐丝期;第 3 次降雨发生在 2011 年 8 月 17 日 15:30 至 19 日 10:30,属于连阴雨天,降雨量为 77.2mm,春玉米生育期为灌浆期。第 1 次降雨前后土壤温度没有明显变化,日均值约为 21.4℃,土壤含水量由 18.6% 上升至 29.9%;第 2 次降雨前后土壤温度同样未出现明显变化,日均值约为 21.3℃,土壤含水量则由 18.7% 上升至 27.1%;第 3 次降雨前后土壤温度出现大幅下降,日均值从 22.1℃ 下降到 16.5℃,土壤含水量则由 23.8% 上升至 32.4%。

从图 1 可以看出,土壤呼吸及其分量在 3 次降雨后均是先明显降低,然后逐渐回升的过程。土壤呼吸及其分量 3 次明显降低分别对应 3 次土壤含水量上升,而且土壤含水量的峰值与土壤呼吸及其分量的谷值同时出现,即均出现在降雨结束时。3 次降雨前后土壤呼吸及其分量测量瞬时值的变化如表 1 所示。图 1 表明,第 1 次降雨对土壤呼吸及其分量的影响持续了两天;第 2 次降雨对土壤呼吸及其分量的影响仅表现为降雨的当天;第 3 次降雨对土壤呼吸及其分量的影响直至研究时段的最后一天(8 月 24 日)也没有结束。而且,土壤呼吸及其分量在雨后受抑制时段内的测量值波动幅度明显要比降雨前未受抑制时段内小。对比 3 次降雨要素和 3 次降雨前后土壤呼吸及其分量的变化情况可以看出,降雨量越大、降雨历时越长、雨前土壤含水量越

高,则土壤呼吸及其分量的降幅越大,对降雨的响应时间也越长。

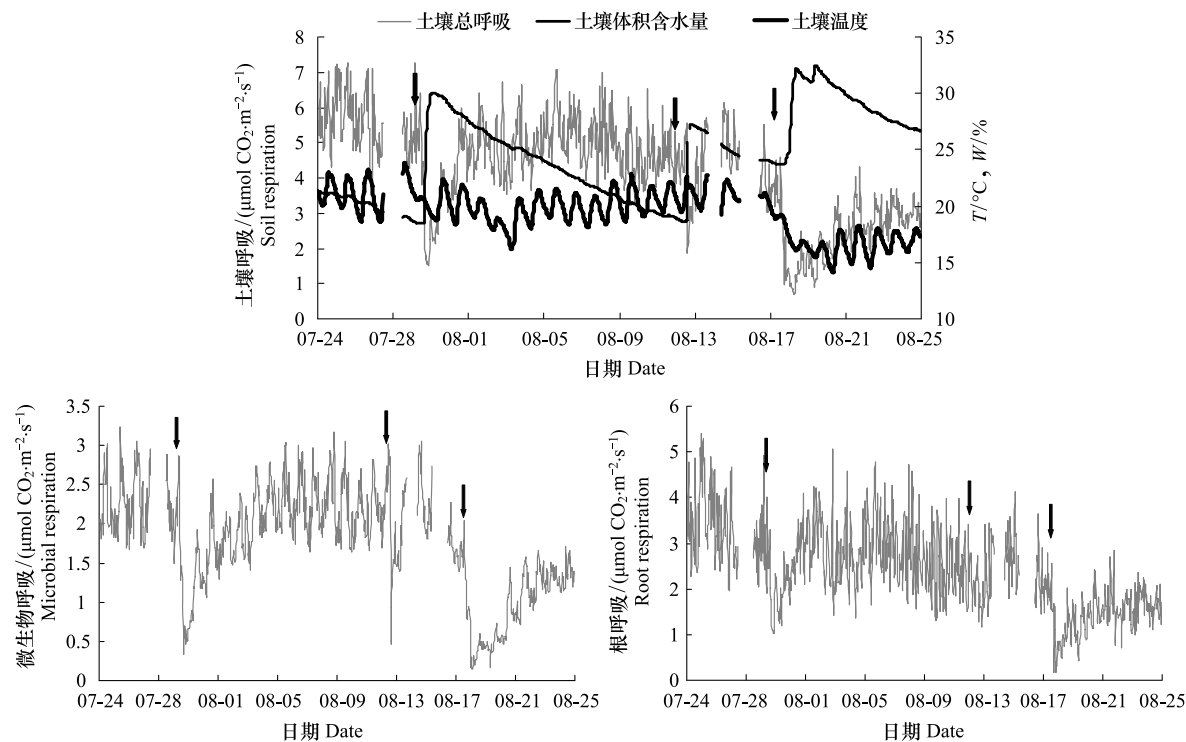


图1 降雨前后土壤呼吸及其分量、10cm 土壤温度、10cm 土壤体积分含水量的动态(图中箭头指示降雨开始处)

Fig. 1 Variations of soil respiration and its components, soil temperature and volumetric water content at depth of 10cm before and after rainfall (the black arrows indicate the beginning of rainfall)

表 1 土壤呼吸及其分量降雨前后瞬时测量值的变化

降雨序列 Rainfall sequence	土壤呼吸 Soil respiration			微生物呼吸 Microbial respiration			根呼吸 Root respiration		
	/($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		降幅 Decreasing range/%	/($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		降幅 Decreasing range/%	/($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		降幅 Decreasing range/%
	雨前 Before rainfall	雨后 After rainfall		雨前 Before rainfall	雨后 After rainfall		雨前 Before rainfall	雨后 After rainfall	
第 1 次 First time	6.39	1.52	76.21	2.86	0.34	88.11	3.53	1.18	66.57
第 2 次 Second time	5.52	1.92	65.22	3.01	0.51	83.06	2.51	1.41	43.82
第 3 次 Third time	4.58	0.69	84.93	2.02	0.15	92.57	2.56	0.54	78.91

图1表明,第1次和第2次降雨前后,土壤温度的变化很小,而土壤含水量则有显著升高,说明土壤呼吸及其分量的下降主要是由土壤含水量变化引起的。第3次降雨前后,土壤含水量显著升高而土壤温度显著下降,表明土壤呼吸及其分量的下降是由土壤温度和土壤含水量共同作用的结果,并且由于在降雨后土壤温度上升缓慢且土壤含水量一直处在大于27%的状态,土壤呼吸及其分量对第3次降雨的响应直到8月24日也没有恢复至降雨前的水平。7月24日到7月28日和8月4日到8月12日,土壤呼吸及其分量对土壤含水量(小于27%)降低的响应均不明显,日均值比较稳定,其中土壤呼吸约为 $4.96\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;微生物呼吸约为 $2.23\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;根呼吸约为 $2.72\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。但是,第3次降雨后,土壤温度日均值较稳定,约为 16.5°C ,而土壤呼吸和微生物呼吸都随土壤含水量的降低,日均值逐渐上升,其中土壤呼吸从 $1.63\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 上升到 $2.94\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;微生物呼吸从 $0.47\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 上升到

1. $34 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 根呼吸的日均值在此期间未明显上升, 约为 $1.57 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2 土壤呼吸及其分量与土壤温度、土壤含水量的关系

2.2.1 土壤呼吸及其分量与土壤温度单因子的关系

图2反应了研究时段内, 土壤呼吸及其分量与土壤温度的响应特征, 两者之间的关系均符合 $R = \alpha \exp(\beta T)$ 模型, Q_{10} 采用 $Q_{10} = e^{10\beta}$ 方程^[37]计算。

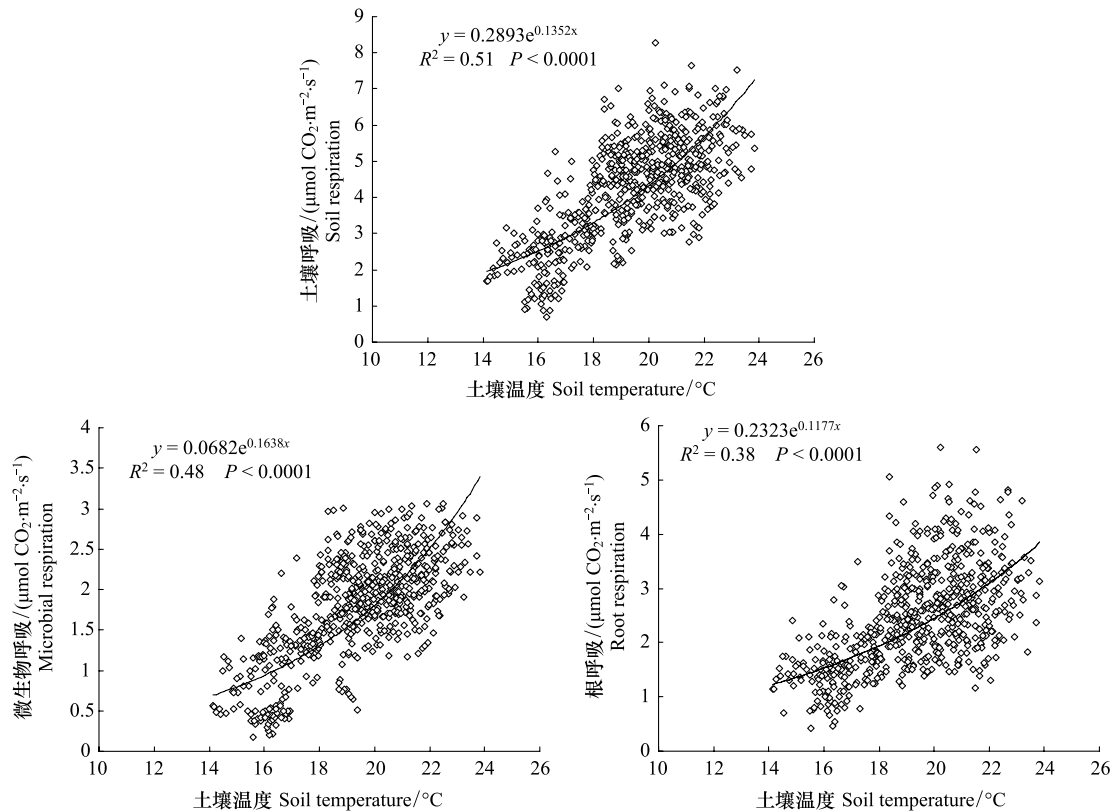


图2 土壤呼吸及其分量对10cm土壤温度变化的响应

Fig.2 Relationship between soil respiration and its components and soil temperature at a depth of 10cm

图2表明, 土壤温度对土壤呼吸和微生物呼吸的影响, 采用指数方程均取得较好的模拟效果, 决定系数分别为0.51和0.48, 根系呼吸的模拟效果相对较差, 决定系数只有0.38。在研究时段内对温度最为敏感的是微生物呼吸, Q_{10} 为5.14, 土壤呼吸和根系呼吸对温度的敏感性变得相对要弱, Q_{10} 分别为3.86和3.24。

2.2.2 土壤呼吸及其分量与土壤含水量单因子的关系

图3表明了研究时段内, 土壤呼吸及其分量与土壤含水量的响应特征, 两者之间的关系均符合 $R = a + bW + cW^2$ 模型。

土壤呼吸和微生物呼吸对土壤含水量的响应, 采用二次曲线模型取得的良好模拟效果, 决定系数分别为0.61和0.71, 根呼吸的模拟效果较差, 决定系数仅为0.35。在研究时段内, 土壤含水量对土壤呼吸和微生物呼吸解释度明显要比土壤温度高, 表明在土壤湿润条件下, 土壤含水量成为影响土壤呼吸和微生物呼吸的主要因子, 而土壤温度成为次要因子, 但对于根呼吸两者解释度都较差。由图3可以看出, 土壤含水量超过一定临界点后, 随着土壤含水量的升高, 土壤呼吸及其分量则出现降低, 但土壤含水量上升对土壤呼吸及其分量产生抑制的临界点不同: 土壤呼吸为21.2%; 微生物呼吸为20.7%; 根呼吸为21.8%。从图3可以看出, 当土壤含水量小于27%时数据较分散, 且随着土壤含水量的上升, 瞬时测量值也未出现明显下降, 表明土壤含水量在小于27%时的土壤呼吸及其分量瞬时测量值的变化主要由昼夜温差引起; 而当土壤含水量大于27%时, 随着土壤含水量的上升, 瞬时测量值出现明显下降, 且数据点变得越来越集中, 表明昼夜温差造成的呼吸测量

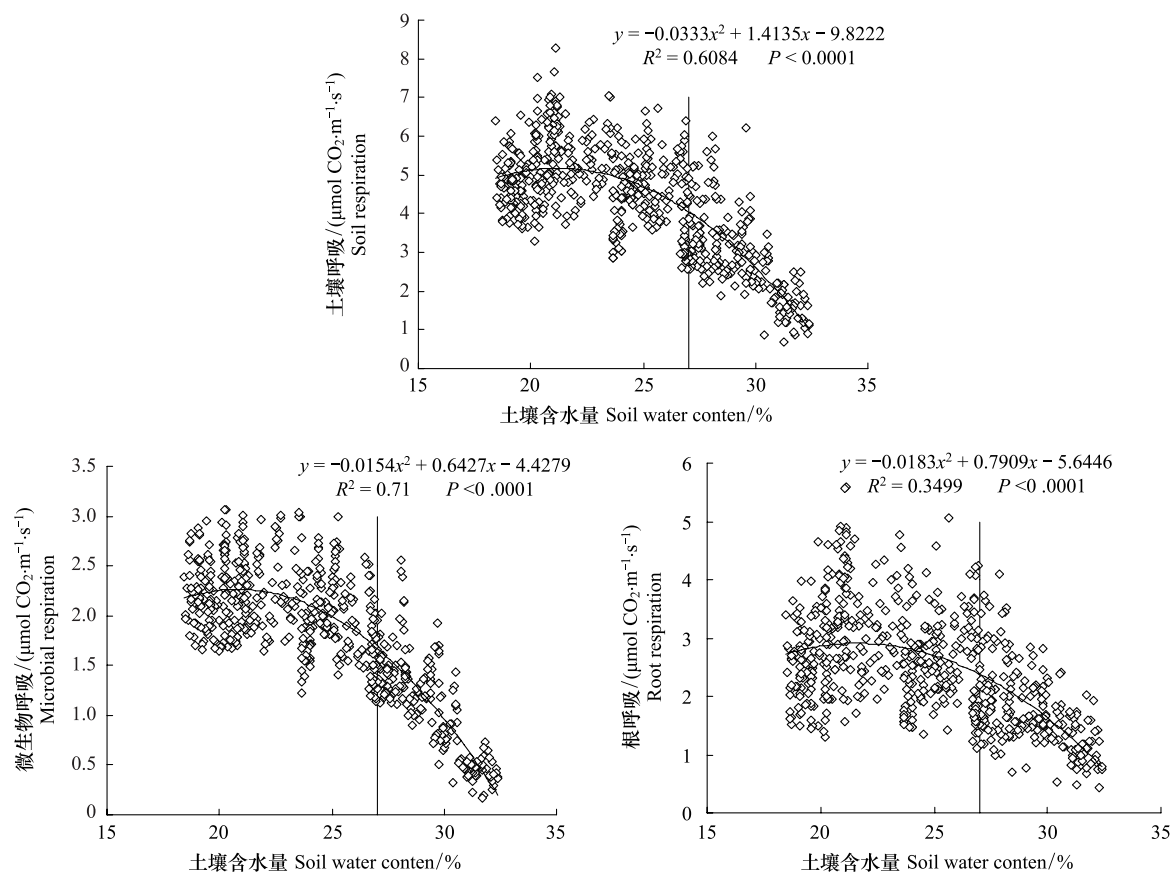


图3 土壤呼吸及其分量对10cm土壤含水量变化的响应(图中竖线指示土壤含水量27%的位置)

Fig. 3 Relationship between soil respiration and its components and soil water content at a depth of 10cm (The vertical line indicate soil water content 27%)

值的波动变得越来越小,即在土壤含水量较高的水平下,土壤呼吸及其分量对土壤温度的敏感性变弱。

2.2.3 土壤呼吸及其分量与土壤温度、土壤含水量双因子的关系

表2表明,土壤呼吸及其分量与土壤温度、土壤含水量之间的双因子关系均符合 $\ln R = a + bT + cT^2 + dW + eW^2$ 模型。

表2 土壤呼吸及其分量对土壤温度、土壤含水量响应的二次曲线拟合参数列表

呼吸类型 Respiration type	a	b	c	d	e	P	R ²
土壤呼吸 Soil respiration	-6.2665	0.2163	-0.0039	45.8911	-101.9735	<0.0001	0.77
微生物呼吸 Microbial respiration	-9.0118	0.2033	-0.0038	65.2582	-145.9203	<0.0001	0.83
根呼吸 Root respiration	-2.1186	0.5244	-0.0115	-3.1816	-2.1203	<0.0001	0.45

土壤呼吸和微生物呼吸采用土壤温度、土壤含水量双因子模型均取得非常好的模拟效果,决定系数分别达到0.78和0.83,而根呼吸的模拟效果相对较差些,决定系数也有0.45。土壤呼吸和微生物呼吸采用土壤温度、土壤含水量双因子模型取得的模拟效果明显要比土壤温度单因子模型好,比土壤含水量单因子模型也有一定程度的提高,表明采用土壤温度、土壤含水量双因子模型模拟该区域的土壤呼吸和微生物呼吸有一定可行性,而根呼吸采用3种模型均未取得理想的模拟结果。

3 讨论

土壤总呼吸中各分量所占的比例及其温度敏感性的差异直接影响土壤呼吸对降雨的响应程度。不同作

物和不同生育期,根呼吸占土壤总呼吸的比例差异较大^[38-40],并且受到 CO_2 浓度和施氮等条件的影响^[41]。蔡艳等^[42]通过静态箱法测得的玉米根呼吸比例在拔节期至收获为 30%—70%,李虎等^[38]也采用静态箱法揭示玉米根呼吸比例在 90%—93%。通过分析发现,在研究时段内该春玉米农田根呼吸占土壤呼吸的比例在 35.2% 和 85.1% 之间,平均值为 58.5%,基本在已有研究结果的范围内。

从图 4 中看出根呼吸占土壤呼吸比例在第 1、3 次降雨雨中和雨后有明显的上升,然后下降至雨前的水平(第 2 次降雨雨中和雨后数据缺失较多,这种变化不明显),由此表明在湿润条件下降雨对微生物呼吸抑制程度要比根呼吸强,与 Skopp 等^[43]研究结论一致。结合以上的分析表明,根呼吸受土壤温度和土壤含水量的影响,与众多研究结果相同^[6,22,44-45],但本研究中采用土壤温度单因子模型、土壤含水量单因子模型和土壤温度、土壤含水量双因子模型对根呼吸变化的解释度都不高。一些研究揭示,根呼吸受到生长^[46]、光合作用和物质分配等生理过程^[16]的影响。孙文娟等^[47]的研究表明,小麦根呼吸系数与其氮含量之间的关系可用一元线性模型描述;Pregitzer 等^[48]指出植物的细根呼吸速率要明显比粗根强;Wang 和 Curtis^[49]研究指出根呼吸与植被类型有关。因此,未来对根呼吸响应环境因子变化的研究时,应综合考虑这些影响因子,采用多因子模型对根呼吸进行模拟,从而探明影响根呼吸动态的关键因子。

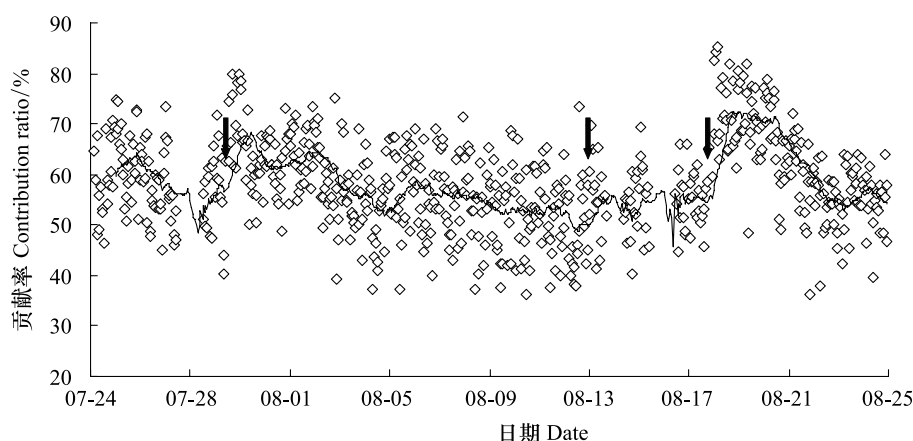


图 4 降雨前后根呼吸占土壤呼吸比例日均值的变化(图中箭头指示降雨开始处)

Fig. 4 Ratio of root respiration to soil respiration before and after rainfall (the black arrows indicate the beginning of rainfall)

研究结果表明土壤呼吸及其分量与土壤温度的关系和大多数研究结果一致^[4,35,37,44-45,50],即呈现指数关系上升,但 Shi 等^[6]对黄土高原某林地的研究结果为,伴随着土壤温度的升高,土壤呼吸表现为线性下降,造成这种现象的原因可能是土壤湿度太低。长久以来很多研究者都使用 Q_{10} 来表示土壤呼吸及其分量对温度的响应关系, Q_{10} 为温度每升高 10°C 呼吸速率增加的倍数,反应土壤呼吸及其分量对温度变化的敏感性。本研究得出土壤呼吸的 Q_{10} 为 3.86,而 Raich 和 Schlesinger^[51]综合大量文献发现 Q_{10} 值一般在 1.3—3.3 之间,可能是因为在试验阶段土壤含水量一直处在比较高的水平,而有报道指出随土壤湿度的增加, Q_{10} 值呈现出非线性增加的趋势^[52]。但本试验的结果还指出在土壤含水量过高的情况下,土壤呼吸及其分量对土壤温度的敏感性降低,Wang 等^[53]在中国东北森林生态系统的研究中也得到一致结果。微生物呼吸的 Q_{10} 为 5.14,比根呼吸的 Q_{10} 要大的多,与 Wang 和 Guo^[50]结论相同,与朱凡等^[54]在长沙马尾松林取得的结论相反,原因可能是立地条件的差异和植被不同造成的。

降雨引起土壤水分的变化对土壤呼吸及其分量的影响比较复杂,不同研究得出的结论差距较大。Norton 等^[24]对美国怀俄明州草原研究和 Chen 等^[23]对内蒙古多伦草原研究表明降雨能够明显的激发土壤呼吸,而 Ball 等^[55]对苏格兰农田研究和 Harper 等^[56]对美国 Konza 草原研究揭示降雨明显抑制了土壤呼吸。张红星等^[57]对黄土高原小麦田土壤的研究指出在土壤干旱时,降雨促进土壤呼吸;而在土壤湿润时,则抑制土壤呼吸。本研究野外原位观测的结果也表明在土壤湿润时,降雨明显抑制了土壤呼吸及其分量。McIntyre 等^[58]

采用室内模拟的方法同样指出,强降雨明显抑制了澳大利亚西北半干旱地区的土壤呼吸。王健林等^[59]研究表明对麦田过量灌溉会抑制土壤呼吸,而这种抑制作用会随着时间的推移而消退,本试验同样观测到雨后土壤呼吸及其分量在下降后又能够逐渐恢复到雨前的水平。本研究采用二次曲线模型对土壤呼吸和微生物呼吸与土壤含水量的关系进行的模拟表明,在曲线拐点之前,土壤含水量上升表现为改善土壤环境,促进微生物和根系的活动;在曲线拐点之后,土壤含水量上升表现为堵塞土壤孔隙,阻碍氧气向土壤中扩散和二氧化碳向空气溢出,抑制微生物和根系的活动^[60]。有研究指出在土壤湿度超过田间持水量的情况下,土壤 CO_2 释放量才会减少^[61],但是本研究中土壤呼吸及其分量模拟曲线拐点的土壤含水量明显未达到田间持水量的水平,原因可能是本研究中土壤有机质含量较低,相对较少水分就能对土壤呼吸的底物和产物与空气间产生较强的阻隔效果。

4 结论

明确特定区域内土壤呼吸及其分量对降雨的响应以及促进与抑制作用的临界点,对于准确评估和预测气候变化对区域土壤碳平衡的影响具有重要的科学意义。通过以上分析表明,采用二次曲线能够对自然状态下土壤呼吸及其分量与土壤含水量的关系进行客观的描述,在土壤湿润条件下降雨对土壤呼吸及其分量有明显的抑制作用。本文中降雨对土壤呼吸及其分量的抑制作用受土壤温度、土壤含水量共同影响,但土壤含水量是主要影响因子,并且微生物呼吸对降雨的响应要比根呼吸敏感。降雨量越大、降雨历时越长、雨前土壤含水量越大,则土壤呼吸及其分量的降幅越大,对降雨的响应时间也越长。

土壤呼吸及其分量对土壤温度敏感性各不相同,其中土壤呼吸 Q_{10} 为 3.86;根呼吸 Q_{10} 为 3.24;微生物呼吸 Q_{10} 为 5.14。土壤含水量上升对土壤呼吸及其分量抑制的临界点不同:土壤呼吸为 21.2%;微生物呼吸为 20.7%;根呼吸为 21.8%。土壤含水量在一定范围内(小于 27%)对土壤呼吸及其分量影响不明显,昼夜温差主导测量值的变异;在高湿度(大于 27%)条件下土壤呼吸及其分量随土壤含水量上升呈明显下降,且对土壤温度的敏感性变弱。由于土壤呼吸的各分量对温度和湿度的敏感性不同,降雨后根呼吸的比例有所升高。采用土壤温度、土壤含水量双因子模型能够更好的模拟该区域土壤呼吸和微生物呼吸对环境因子变化的响应。

致谢:中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所刘恩科副研究员和刘勤助理研究员对测定土壤化学性质和数据处理提供帮助。

References:

- [1] Liu R H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469-476.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [3] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Botany Review*, 1997, 43: 449-528.
- [4] Wang C H, Chen F Q, Wang Y, Li J Q. Soil heterotrophic respiration and its sensitivity to soil temperature and moisture in Liquidambar formosana and Pinus massoniana forests in hilly areas of southeast Hubei Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 600-606.
- [5] Yang Y S, Chen G S, Dong B, Wang X G, Xie J S, Li L, Lu H L. Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 953-958.
- [6] 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: 854-863.
- [7] Wang W, Chen W L, Wang S P. Forest soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components: Global patterns and responses to temperature and precipitation. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42: 1236-1244.
- [8] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biology*, 2003, 9: 911-918.
- [9] Lavigne M B, Foster R J, Goodine G. Seasonal and annual changes in soil respiration in relation to soil temperature, water potential and trenching. *Tree Physiology*, 2004, 24: 415-424.
- [10] Xu L, Baldocchi D D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123: 79-96.
- [11] Flanagan L B, Johnson B G. Interaction effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern

- temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130: 237-253.
- [12] Cui Y T, Han C R, Lu J D. Dynamics of organic material decomposition and soil respiration in intensive and high yield agroecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(1): 59-64.
- [13] Bowden R D. Contributions of above-ground litter, below-ground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23: 1402-1407.
- [14] Kelting D L, Burger J A, Edwards G S. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere and root-free soil respiration in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30: 961-968.
- [15] Epron D, Farque L, Lucot E, Badot P M. Soil CO₂ efflux in a beech forest: the contribution of root respiration. *Analysis of Forest Science*, 1999, 56: 289-295.
- [16] Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, Taylor A F S, Alfeklad, Höglberg M N, Nyberg G, Ottosson-Löfvenius M, Read D J. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, 2001, 411: 789-792.
- [17] Lavigne M B, Boutin R, Foster R J, Goodine G, Bernier P Y, Robitaille G. Soil respiration responses to temperature are controlled more by roots than by decomposition in balsam fir ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33: 1744-1753.
- [18] Gullledge J, Schimel J P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of Taiga Forest stands in Interior Alaska. *Ecosystems*, 2000, 3: 269-282.
- [19] IPCC, 2007: summary for policymakers. In: climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change//Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M and Miller H L, eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [20] 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.
- [21] Birch H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and Soil*, 1958, 10: 9-31.
- [22] Chen Q, Guo X W, Hu Y L, Mao Z Q. Effects of waterlogging on root respiration intensity and respiratory enzyme activities of sweet cherry. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1462-1466.
- [23] Chen S, Lin G, Huang J, Jenerette G D. Dependence of carbon sequestration on the differential responses of ecosystem photosynthesis and respiration to rain pulses in a semiarid steppe. *Global Change Biology*, 2009, 15: 2450-2461.
- [24] Norton U, Mosier A R, Morgan J A, Derner J D, Ingram L J, Stah 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: 1421-1431.
- [25] Deng Q, Zhou G Y, Liu J X, Liu S Z, Duan H L, Chen X M, Zhang D Q. Effects of CO₂ enrichment, high nitrogen deposition and high precipitation on a model forest ecosystem in southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(6): 1023-1033.
- [26] Li Y, Zhao X, Liu X P, Shang W, Feng J, Su N. Soil carbon sequestration in sand-fixation plantation of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* and response of soil respiration to drought and wet conditions. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(2): 282-287.
- [27] Su H, Li X Y, Ouyang Y. Responses of soil microbial biomass and soil respiration to rainfall. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(10): 1399-1402.
- [28] Liu X Z, Wan S Q, Su B, Hui D F, Luo Y Q. Responses of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. *Plant and Soil*, 2002, 240: 213-223.
- [29] Kursar T A. Evaluation of soil respiration and soil CO₂ concentration in a lowland moist forest in Panama. *Plant and Soil*, 1989, 113: 21-29.
- [30] Davidson E A, Verchot L V, Henrique Cattânio J, Ackerman L L, Carvalho J E M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 53-69.
- [31] Chang S C, Tseng K H, Hsia Y J, Wang C P, Wu J T. Soil respiration in a subtropical montane cloud forest in Taiwan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 788-798.
- [32] Reichstein M, Tenhunen J D, Rouspard O, Ourcival J M, Rambal S, dore S, Valentini R. Ecosystem respiration in two Mediterranean evergreen Holm oak forests: drought effects and decomposition dynamics. *Functional Ecology*, 2002, 16: 27-39.
- [33] Conant R T, Dalla-Betta P, Klopatek C C, Klopatek J M. Controls on soil respiration in semiarid soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36: 945-951.
- [34] Hu F, Chen S M. Experiment on water balance of different mulching measures in cornfield in Shouyang. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(4): 146-148.
- [35] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8: 315-323.
- [36] Rey A, Jarvis P G, Grace J. Effect of temperature and moisture on rates of carbon mineralization in a Mediterranean oak forest soil under controlled and field conditions. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56: 589-599.

- [37] Jiang Y, Wang B, Wang Y R, Yang Q P. Soil respiration in subtropical forests and model simulation of its relationships with soil temperature and moisture content. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1641-1648.
- [38] Li H, Qiu J J, Wang L G. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(4): 14-20.
- [39] Zhang X S, Shen S H, Xie Y S, Deng A J. Contribution of root respiration to total soil respiration in winter wheat Field in North China Plain. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(3): 289-296.
- [40] Yan J J, yang L F, Pang J. Effects of soybean and cotton growth on soil respiration. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(9): 1559-1567.
- [41] Kou T J, Xu X F, Zhu J G, Xie Z B, Guo D Y, Miao Y F. Contribution of wheat rhizosphere respiration to soil respiration under elevated atmospheric CO₂ and nitrogen application. *Chinese Journal of Applied Ecology*, Oct, 2011, 22(10): 2533-2538.
- [42] Cai Y, Ding W X, Cai Z C. Soil respiration in a maize-soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4273-4280.
- [43] Skopp J, Jawson M D, Doran D W. Steady-state aerobic microbial activity as function of soilwater content. *Soil Science Society of American Journal*, 1990, 54: 1619-1625.
- [44] Yan M F, Zhang X S, Zhou G S, Jiang Y. Seasonal dynamics of root respiration in poplar plantations at different developmental stages. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13): 3449-3456.
- [45] Pregitzer K S, King J S, Burton A J. Responses of tree fine roots to temperature. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 105-115.
- [46] Wiseman P E, Seiler J R. Soil CO₂ efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont. *Forest Ecology and Management*, 2004, 192: 297-311.
- [47] Sun W J, Huang Y, Chen S T, Yang Z F, Zheng X H. CO₂ emission from soil-crop system as influenced by crop growth and tissue N content. *Environmental Science*, 2004, 25(3): 1-6.
- [48] Pregitzer K S, Laskowski M J, Burton A J, et al. Variation in sugar maple root respiration with root diameter and soil depth. *Tree Physiology*, 1998, 18(10): 665-670.
- [49] Wang H, Curtis P. A meta-analytical test of elevated CO₂ effects on plant respiration. *Plant Ecology*, 2002, 161: 251-261.
- [50] Wang W, Guo J X. The contribution of root respiration to soil CO₂ efflux in *Puccinellia tenuiflora* dominated community in a semi-arid meadow steppe. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(6): 697-703.
- [51] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81-99.
- [52] Qi Y, Xu M, Wu J G. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprises. *Ecological Modelling*, 2002, 153(1): 131-142.
- [53] Wang C K, Yang J Y, Zhang Q Z. Soil respiration in six temperate forests in China. *Global Change Biology*, 2006, 12(11): 2103-2114.
- [54] Zhu F, Wang G J, Tian D L, Yan W D, Xiang W H, Liang X C. Seasonal variation of root respiration and the controlling factors in *pinus massoniana* plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(7): 36-41.
- [55] Ball B C, Albert S, Jone P P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil and Tillage Research*, 1999, 53: 29-39.
- [56] Harper C W, Blair J M, Fay P A, Knap A K, Carlisle J D. Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO₂ flux in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, 2005, 11: 322-334.
- [57] Zhang H X, Wang X K, Feng Z W, Song W Z, 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 46(12): 6189-6196.
- [58] McIntyre R E S, Adams M A, Ford D J, Grierson P F. Rewetting and litter addition influence mineralisation and microbial communities in soils from a semi-arid intermittent stream. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 92-101.
- [59] Wang J L, Zhao F H, OuYang Z. Effects of the Irrigation Quantity on Soil Respiration in Wheat Field in Filling Stage. *Acta Agriculturae Boreali-sinica*, 2010, 25(3): 186-189.
- [60] Pangle R E, Seiler J R. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO₂ efflux rates in a 2-years-old loblolly pine plantation on the Virginia Piedmont. *Environment Pollution*, 2002, 116: B85-B96.
- [61] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri. *Ecology*, 1971, 52: 912-915.

参考文献:

- [1] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, 17(5): 469-476.
- [4] 王传华, 陈芳清, 王愿, 李俊清. 鄂东南低丘马尾松林和枫香林土壤异养呼吸及温湿度敏感性. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 600-606.

- [5] 杨玉盛, 陈光水, 董彬, 王小国, 谢锦升, 李灵, 卢豪良. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应. 生态学报, 2004, 24(5): 953-958.
- [12] 崔玉亭, 韩纯儒, 卢进登. 集约高产农业生态系统有机物分解及土壤呼吸动态研究. 应用生态学报, 1997, 8(1): 59-64.
- [20] 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.
- [25] 邓琦, 周国逸, 刘菊秀, 刘世忠, 段洪浪, 陈小梅, 张德强. 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, 2009, 33(6): 1023-1033.
- [26] 李玉强, 赵学勇, 刘新平, 尚雯, 冯静, 苏娜. 樟子松固沙林土壤碳截存及土壤呼吸对干湿变化的响应. 中国沙漠, 2011, 31(2): 282-287.
- [27] 苏慧敏, 李叙勇, 欧阳扬. 土壤微生物量和土壤呼吸对降雨的响应. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1399-1402.
- [34] 胡芬, 陈尚模. 寿阳试验区玉米地农田水分平衡及其覆盖调控试验. 农业工程学报, 2000, 16(4): 146-148.
- [37] 姜艳, 王兵, 汪玉如, 杨清培. 亚热带林分土壤呼吸及其与土壤温湿度关系的模型模拟. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1641-1648.
- [39] 张雪松, 申双和, 谢铁嵩, 邓爱娟. 华北平原冬麦田根呼吸对土壤总呼吸的贡献. 中国农业气象, 2009, 30(3): 289-296.
- [40] 闫静静, 杨兰芳, 庞静. 大豆和棉花生长对土壤呼吸的影响. 作物学报, 2010, 36(9): 1559-1567.
- [41] 寇太记, 徐晓峰, 朱建国, 谢祖彬, 郭大勇, 苗艳芳. CO₂ 浓度升高和施氮条件下小麦根际呼吸对土壤呼吸的贡献. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2533-2538.
- [42] 蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献. 生态学报, 2006, 26(12): 4273-4280.
- [38] 李虎, 邱建军, 王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析. 农业工程学报, 2008, 24(4): 14-20.
- [44] 闫美芳, 张新时, 周广胜, 江源. 不同树龄杨树人工林的根系呼吸季节动态. 生态学报, 2010, 30(13): 3449-3456.
- [22] 陈强, 郭修武, 胡艳丽, 毛志泉. 淹水对甜樱桃根系呼吸强度和呼吸酶活性的影响. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1462-1466.
- [47] 孙文娟, 黄耀, 陈书涛, 杨兆芳, 郑循华. 作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO₂ 排放的影响. 环境科学, 2004, 25(3): 1-6.
- [54] 朱凡, 王光军, 田大伦, 闫文德, 项文化, 梁小翠. 马尾松人工林根呼吸的季节变化及影响因子. 林业科学, 2010, 46(7): 36-41.
- [57] 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.
- [59] 王建林, 赵风华, 欧阳竹. 灌溉量对灌浆期麦田土壤呼吸的影响. 华北农学报, 2010, 25(3): 186-189.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 24 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

A bibliometric study of biodiversity research in China	LIU Aiyuan, GUO Yuqing, LI Shiyong, et al (7635)
Effects of elevated CO ₂ and nitrogen deposition on leaf nutrient quality of <i>Fargesia rufa</i> Yi	 ZHOU Xianrong, WANG Jianhua, ZHANG Hong, et al (7644)
Airborne pollen assemblages and their relationships with climate factors in the central Shaanxi Province of the Loess Plateau: a case in Xiaheimugou, Luochuan County	LÜ Suqing, LI Yuecong, XU Qinghai, et al (7654)
Spatial and temporal change in ecological assets in the Yangtze River Delta of China 1995—2007	 XU Xibao, CHEN Shuang, YANG Guishan (7667)
Evaluation and optimization of woodland ecological patterns for Qingdao based on the agent-based model	 FU Qiang, MAO Feng, WANG Tianqing, et al (7676)
Interactive mechanism of service function of alpine rangeland ecosystems in Qinghai-Tibetan Plateau	 LIU Xingyuan, LONG Ruijun, SHANG Zhanhuan (7688)
Preliminary evaluation of air temperature reduction of urban green spaces in Beijing	 ZHANG Biao, GAO Jixi, XIE Gaodi, et al (7698)
Resources metabolism analysis for the pulp and paper industry in Wuhan, China	 SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, ZHAO Linjia, et al (7706)
The characteristics and influential factors of direct carbon emissions from residential energy consumption: a case study of Lijiang City, China	WANG Danyin, TANG Mingfang, REN Yin, et al (7716)
Spatial targeting of payments for ecosystem services Based on SWAT Model and cost-benefit analysis	 SONG Xiaoyu, LIU Yuqing, DENG Xiaohong, et al (7722)
The wind tunnel test of plastic greenhouse and its surface wind pressure patterns	 YANG Zaiqiang, ZHANG Bo, XUE Xiaoping, et al (7730)
Population quantitative characteristics and dynamics of rare and endangered plant <i>Davidia involucrata</i> in Hunan Province	 LIU Haiyang, JIN Xiaoling, SHEN Shouyun, et al (7738)
Phenotypic diversity in populations of germplasm resources of <i>Rodgersia sambucifolia</i> and related species	 LI Pingping, MENG Hengling, CHEN Junwen, et al (7747)
Effects of sand burial and seed size on seed germination, seedling emergence and growth of <i>Caragana korshinskii</i> Kom. (Fabaceae) ...	 YANG Huiling, LIANG Zhenlei, ZHU Xuanwei, et al (7757)
Population-keeping mechanism of the parasitoid <i>Dastarcus helophoroides</i> (Coleoptera: Bothrideridae) of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) in oak forest	YANG Zhongqi, TANG Yanlong, JIANG Jing, et al (7764)
Study of mingling based on neighborhood spatial permutation	LOU Minghua, TANG Mengping, QIU Jianxi, et al (7774)
Comparison of three regression analysis methods for application to LAI inversion using Hyperion data	 SUN Hua, JU Hongbo, ZHANG Huaiqing, et al (7781)
Response of seed germination and seedling growth of <i>Pinus koraiensis</i> and <i>Quercus mongolica</i> to comprehensive action of warming and precipitation	ZHAO Juan, SONG Yuan, SUN Tao, et al (7791)
Impacts of water stored in sapwood <i>Populus bolleana</i> on its sap flux	DANG Hongzhong, LI Wei, ZHANG Youyan, et al (7801)
Dynamics of greenhouse gases emission and its impact factors by fire disturbance from <i>Alnus sibirica</i> forested wetland in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China	GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen (7808)
Different tide status and salinity alter stoichiometry characteristics of mangrove <i>Kandelia candel</i> seedlings	 LIU Biner, LIAO Baowen, FANG Zhanqiang (7818)
Effects of shrub encroachment in desert grassland on runoff and the induced nitrogen loss in southeast fringe of Tengger Desert	 LI Xiaojun, GAO Yongping (7828)
Community structure and throughfall erosivity characters of artificial rainforest in Xishuangbanna	 DENG Yun, [TANG Yanlin], CAO Min, et al (7836)
Temporal-spatial variations of net ecosystem productivity in alpine area of southwestern China	 PANG Rui, GU Fengxue, ZHANG Yuandong, et al (7844)

Relationships between chemical compositions of <i>Quercus</i> species seeds and climatic factors in temperate zone of NSTEC	LI Dongsheng, SHI Zuomin, LIU Shirong, et al (7857)
Effects of simulated acid rain stress on the PS II reaction center and free radical metabolism in leaves of longan	LI Yongyu, PAN Tengfei, YU Dong, et al (7866)
Assessment of organic pollution for surface soil in Shenyang suburbs	CUI Jian, DU Jizhong, MA Hongwei, et al (7874)
The impact of rainfall on soil respiration in a rain-fed maize cropland	GAO Xiang, HAO Weiping, GU Fengxue, et al (7883)
Effects of winter crops on enzyme activity and morphological characteristics of root in subsequent rice crops	YU Tianyi, PANG Huancheng, REN Tianzhi, et al (7894)
Dynamic changes of soil moisture and nitrate nitrogen in wheat and maize intercropping field under different nitrogen supply	YANG Ruiju, CHAI Shouxi, MA Zhongming (7905)
Characteristics of the bird diversity and the impact factors in Weishan Lake	YANG Yuewei, LI Jiuen (7913)
The effect of cropping landscapes on the population dynamics of the cotton bollworm <i>Helicoverpa armigera</i> (Lepidoptera, Noctuidae) in the northern Xinjiang	LU Zhaozhi, PAN Weilin, ZHANG Xin, et al (7925)
The seasonal variations of nitrogen and phosphorus release and its fluxes from the sediments of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake	LIU Jingjing, DONG Chunying, SONG Yingqi, et al (7932)
Optimization of lake model salmo based on real-coded genetic algorithm	GUO Jing, CHEN Qiuwen, ZHANG Xiaoqing, et al (7940)
The influence of climatic environmental factors and fishing pressure on changes of hairtail catches in the northern South China Sea	WANG Yuezhong, SUN Dianrong, CHEN Zuozhi, et al (7948)
Seasonal and spatial distribution of acid volatile sulfide in sediment under different mariculture types in Nansha Bay, China	YAN Tingru, JIAO Haifeng, MAO Yuze, et al (7958)
Review and Monograph	
Research progress on the mechanism of improving plant cold hardiness	XU Chengxiang (7966)
Influences of vegetation on permafrost: a review	CHANG Xiaoli, JIN Huijun, WANG Yongping, et al (7981)
Home-field advantage of litter decomposition and its soil biological driving mechanism: a review	ZHA Tonggang, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (7991)
Research progress on the relationship of pollutants between road-deposited sediments and its washoff	ZHAO Hongtao, LI Xuyong, YIN Chengqing (8001)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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 32 卷 第 24 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 24 (December, 2012)

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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 70.00 元