

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 22 期 Vol.33 No.22 **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 22 期 2013 年 11 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 利用分布有/无数据预测物种空间分布的研究方法综述 刘芳, 李晟, 李迪强 (7047)
- 景观服务研究进展 刘文平, 宇振荣 (7058)
- 土壤呼吸组分分离技术研究进展 陈敏鹏, 夏旭, 李银坤, 等 (7067)

个体与基础生态

- 平茬高度对四合木生长及生理特性的影响 王震, 张利文, 虞毅, 等 (7078)
- 不同水分梯度下珍稀植物四数木的光合特性及对变化光强的响应 邓云, 陈辉, 杨小飞, 等 (7088)
- 水稻主茎节位分蘖及生产力补偿能力 隗溟, 李冬霞 (7098)
- 基于辐热积法模拟烤烟叶面积与烟叶干物质产量 张明达, 李蒙, 胡雪琼, 等 (7108)
- 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响 田慎重, 王瑜, 李娜, 等 (7116)
- 不同光照强度下兴安落叶松对舞毒蛾幼虫生长发育及防御酶的影响 鲁艺芳, 严俊鑫, 李霜雯, 等 (7125)
- 南方小花蝽在不同空间及笼罩条件下对西花蓟马的控制作用 莫利锋, 鄧军锐, 田甜 (7132)
- 浮游植物对溶解态 AI 的清除作用实验研究 王召伟, 任景玲, 闫丽, 等 (7140)
- 卧龙巴郎山川滇高山栎群落植物叶特性海拔梯度特征 刘兴良, 何飞, 樊华, 等 (7148)
- 春夏季闽江口和兴化湾虾类数量特征 徐兆礼, 孙岳 (7157)
- 啃食性端足类强壮藻钩虾对筲箕湖三种大型海藻的摄食选择性 郑新庆, 黄凌风, 李元超, 等 (7166)

种群、群落和生态系统

- 4 种农业措施对三化螟种群动态的控制作用 张振飞, 黄炳超, 肖汉祥, 等 (7173)
- 黄土高原沟壑区森林带不同植物群落土壤氮素含量及其转化 邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等 (7181)
- 基于诊断学的生态系统健康评价 蔡霞, 徐颂军, 陈善浩, 等 (7190)
- 稻田生态系统中植硅体的产生与积累——以嘉兴稻田为例 李自民, 宋照亮, 姜培坤 (7197)
- 自由搜索算法的投影寻踪模型在湿地芦苇调查中的应用 李新虎, 赵成义 (7204)
- 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性 刘秉儒, 张秀珍, 胡天华, 等 (7211)
- 内蒙古典型草原灌丛化对生物量和生物多样性的影响 彭海英, 李小雁, 童绍玉 (7221)
- 黄土丘陵沟壑区 80 种植物繁殖体形态特征及其物种分布 王东丽, 张小彦, 焦菊英, 等 (7230)
- 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价 刘振生, 高惠, 滕丽微, 等 (7243)
- 太湖湖岸带浮游植物初级生产力特征及影响因素 蔡琳琳, 朱广伟, 李向阳 (7250)

景观、区域和全球生态

- 艾比湖地区土壤呼吸对季节性冻土厚度变化的响应…………… 秦 璐,吕光辉,何学敏,等 (7259)
- 田间条件下黑垆土基础呼吸的季节和年际变化特征…………… 张彦军,郭胜利,刘庆芳,等 (7270)

资源与产业生态

- 光核桃遗传资源的经济价值评估与保护 …………… 张丽荣,孟 锐,路国彬 (7277)
- 棉花节水灌溉气象等级指标…………… 肖晶晶,霍治国,姚益平,等 (7288)

研究简报

- 云南红豆杉人工林萌枝特性…………… 苏 磊,苏建荣,刘万德,等 (7300)
- 赣中亚热带森林转换对土壤氮素矿化及有效性的影响…………… 宋庆妮,杨清培,余定坤,等 (7309)

学术信息与动态

- 2013 年 European Geosciences Union 国际会议述评 …………… 钟莉娜,赵文武 (7319)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2013-11



封面图说: 山坡岩羊图——岩羊属国家二级保护动物,因喜攀登岩峰而得名,又名石羊。贺兰山岩羊主要分布于海拔 1500—2300m 的山势陡峭地带,羊群多以 2—10 只小群为主。生境适宜区主要为贺兰山东坡(宁夏贺兰山国家级自然保护区)的西南部,而贺兰山西坡(内蒙古贺兰山国家级自然保护区)也有少量分布。贺兰山建立国家级自然保护区以来,随着保护区环境的不断改善,这里岩羊的数量也开始急剧增长,每平方公里的分布数量现居世界之首,岩羊的活动范围也相应扩大到低山 900 米处的河谷。贺兰山岩羊生境选择的主要影响因子为海拔、坡度及植被。

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/stxb201207231043

张彦军, 郭胜利, 刘庆芳, 南雅芳, 郭慧敏, 李俊超. 田间条件下黑垆土基础呼吸的季节和年际变化特征. 生态学报, 2013, 33(22): 7270-7276.

Zhang Y J, Guo S L, Liu Q F, Nan Y F, Guo H M, Li J C. Seasonal and annual variation characteristic in basal soil respiration of black loam under the condition of farmland field. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7270-7276.

田间条件下黑垆土基础呼吸的季节和年际变化特征

张彦军¹, 郭胜利^{1,2,3,*}, 刘庆芳³, 南雅芳³, 郭慧敏², 李俊超³

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学资源与环境学院, 杨凌 712100)

摘要:明确土壤基础呼吸的季节和年际变化及其影响因素, 对了解土壤有机碳的变化机理具有重要的意义。在长武农田生态系统国家野外科学观测研究站, 依托其长期(始于 1984 年)的裸地处理, 于 2009—2011 年, 利用 Li-8100 系统(Li-COR, Lincoln, NE, USA)监测了土壤呼吸、土壤水分和土壤温度, 研究田间条件下土壤基础呼吸的年际和季节间变化及其与环境变量之间的关系。裸地土壤呼吸具有显著地季节和年际变异特性。2009 年土壤呼吸速率波动于 $0.62\text{--}1.83\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均为 $1.16\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 2010 年土壤呼吸的变化范围为 $0.30\text{--}1.46\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 均值为 $0.92\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 2011 年则为 $0.06\text{--}1.68\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.88\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2009 到 2011 的 3a 期间裸地土壤呼吸的年累积量依次为 282、234 和 230 $\text{g C}/\text{m}^2$ 。裸地土壤呼吸与土壤温度呈显著指数关系, 而与土壤水分呈显著一元二次方程关系。土壤温度和土壤水分共同控制土壤呼吸的变化。试验期间, 土壤呼吸累积量与试验期间降水总量相反, 但与年均气温无关。在裸地处理上, 因土壤呼吸年流失有机碳达到 $2.5\text{Mg C}/\text{hm}^2$ 。

关键词:土壤呼吸; 土壤水分; 土壤温度; 裸地

Seasonal and annual variation characteristic in basal soil respiration of black loam under the condition of farmland field

ZHANG Yanjun¹, GUO Shengli^{1,2,3,*}, LIU Qingfang³, NAN Yafang³, GUO Huimin², LI Junchao³

1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China

3 College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: Basal soil respiration is an important factor to influence soil organic carbon dynamics in the terrestrial ecosystem. Soil respirations were measured with the automated CO_2 flux system (Li-8100,) in a long-term bare soil in the Changwu State Key Agro-Ecosystem Experimental Station ($35^\circ 12' \text{N}$, $107^\circ 40' \text{E}$), Shaanxi, China from March 2009 to November 2011. Soil temperature and soil moisture at the 5-cm depth was measured using a Li-COR thermocouple and oven drying method, respectively. Significant variations in seasonal and annual soil respiration were observed in the experimental period of three years. Soil respiration averaged at $1.16\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $0.92\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and $0.88\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ in 2009, 2010 and 2011, respectively. The cumulative soil respiration in 2009, 2010, and 2011 soil were 282 $\text{g C}/\text{m}^2$, 234 $\text{g CO}_2/\text{C m}^2$ and 230 $\text{g C}/\text{m}^2$, respectively. The soil respiration was significantly related with seasonal soil temperature or soil moisture. A bivariate model more accurately soil respiration in the bare soil ecosystem than a univariate model with only soil temperature or soil moisture as the driver. During the experimental period of three years, the accumulation of soil respiration in bare soil was negative correlation with annual precipitation, whereas there was no relationship between soil respiration

基金项目:2012 年公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201203039); 国家自然科学基金资助项目(41071338)

收稿日期:2012-07-23; **修订日期:**2013-03-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

and annual air temperature. In the bare soil, the annual loss of carbon was estimated at 2.5 Mg/hm² according to soil respiration.

Key Words: soil respiration; soil moisture; soil temperature; bare soil

土壤有机碳含量与土壤的各种物理、化学、生态性状和土壤肥力密切相关。陆地表面 1m 土层中有机碳储量(1500—2000 Pg C, 1 Pg = 10¹⁵ g),为大气 CO₂中 C 含量的 2 倍左右^[1]。因此,土壤有机碳储量的潜在变化不仅会影响土壤质量,而且也会导致大气 CO₂浓度的波动,但土壤到底是大气 CO₂的源或汇与土壤碳的输出变化密切相关。基础土壤呼吸是微生物作用下土壤有机碳矿化分解而释放 CO₂的过程^[2],直接影响土壤有机碳储量或土壤碳汇能力大小^[3],是碳输出的重要过程之一。因此,了解土壤基础呼吸的变化过程对深入理解土壤碳汇能力及其影响因素具有重要意义。

水分和温度是影响土壤呼吸的重要环境因素^[4-7],也是气候变化条件下土壤有机碳储量变化的重要驱动力,但水分和温度对有机碳分解的影响具有显著的变异性^[8]。目前国内外关于土壤呼吸与土壤水分和土壤温度关系的大量研究,均包括根系呼吸在内^[9-14]。而已有的基础土壤呼吸报道多基于室内培养,例如,从土壤氮素供应的角度来看,室内条件下开展了大量有机质矿化分解研究,但室内与田间的试验条件相差悬殊,室内结果很难应用到田间分析与模拟^[15]。从土壤二氧化碳排放角度来看,田间条件下进行了大量土壤呼吸的定位观测与研究,但获得的试验结果常常包含作物根系呼吸^[16-19]。裸地土壤及其环境条件在土壤水分、温度、底物供应等多方面均与有植被生长的土壤不同。裸地条件下,由于缺乏植被,源于根系和凋落物的有机物输入得到了限制,根系呼吸不复存在。因此,裸地土壤呼吸主要反映了土壤原有有机碳的矿化分解(即基础土壤呼吸),进而探讨其与水分、温度等环境条件的关系。在田间条件下,开展裸地土壤呼吸的研究有助于深入了解土壤有机碳的变化机理。鉴于此,本研究以裸地处理为研究对象,通过 3a(2009—2011 年)连续监测土壤呼吸、土壤水分和土壤温度的变化,研究田间条件下土壤基础呼吸的年际和季节间变化及其与环境变量之间的关系。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于陕西省长武县(东经 107°40',北纬 35°12'),长武农田生态系统国家野外科学观测研究站(简称长武站)。属于典型的黄土旱塬区,海拔 1200 m,半干旱湿润性季风气候。1984—2011 年间年均降水量为 586 mm,其中最高年份为 954 mm,最低年份为 296 mm,7—9 月降水量占年总量的 57%左右。年平均气温 9.4℃,大于 10℃积温为 3029℃,年日照时数为 2230 h,日照率为 51%,年辐射总量为 484 kJ/cm²,无霜期 171d。2009、2010、2011 年的总降水量分别为 481.20、588.10、644.20 mm,7—9 月的降水总量依次占全年降水总量的 62%、74%、60%,其对应的平均大气温度则依次为 10.06、10.27、9.43℃。与多年平均降水量以及大气温度相比较而言,无论是降水量还是大气温度都呈增加趋势,特别 7—9 月降水量明显增加。地带性土壤为粘壤质黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,土层深厚,土质疏松。耕层土壤(0—20 cm)有机碳 6.50 g/kg,全氮 0.62 g/kg,碱解氮 37.0 mg/kg,速效磷 3.0 g/kg,速效钾 129.3 mg/kg, CaCO₃ 10.5%, pH 8.4, 试验地 N、P 含量较低,钾素丰富,呈微碱性反应。

1.2 试验设计

试验所用裸地为长武站长期试验处理之一。该长期试验于 1984 年设立,主要用于研究不同作物和肥料管理措施对土壤生产力、土壤养分和水分的影响^[20]。小区面积 10.3 m×6.5 m,小区间距 0.5 m,区组间距和周边宽各 1.0 m。裸地处理自 1984 年 6 月小麦收获后至今一直处于休闲状态,杂草等及时人工清除。土壤耕翻与小麦连坐处理同步,一年翻耕两次,7—9 月间进行,耕翻深度大约 20 cm。

1.3 土壤呼吸、水分和温度的测定

每个重复(小区)内安装 2 个气室基座(PVC 管,直径 20 cm,高度 12 cm),基座离地面高 2 cm。避免了

由于安置气室基座对土壤扰动而造成的短期呼吸速率波动,在气室基座安置 24 h 后再进行测定。测定前去除气室基座内的一切活体。土壤呼吸速率测定采用便携式土壤碳通量测量系统 LI-8100 (LI-COR, Lincoln, NE, USA)。土壤温度测定利用 LI-8100 自带的土壤温度计,土壤水分的测量利用烘干法

2009 年 3 月—2011 年 11 月(除寒冷冬季的 12、1、2 月份),选择晴好天气在 9:00—11:00 进行土壤呼吸速率、土壤温度、土壤水分的测定。大约每 10d 测定 1 次,其中高温多雨季节(7—9 月)每周测定 1 次。3a 试验期间土壤呼吸速率、温度以及水分各测量 73 次,其中 2009 年测量 25 次;2010 年测量 26 次;2011 年测量 22 次。

1.4 数据处理与统计分析

利用线性内插法推算不同年际间的累积土壤呼吸量(g C/m^2)^[21],利用 Sigmpilot 软件制作相关的基础图件。

在半干旱的黄土旱塬区,受大陆季风气候的影响,土壤水分低且干湿多变,初步数据分析发现,除温度外,水分变化也是影响土壤呼吸的重要因素。鉴于此,本研究利用指数关系模型模拟土壤呼吸与土壤温度的关系,用一元二次方程模型模拟土壤呼吸与土壤水分的关系。考虑到土壤温度和水分对土壤呼吸的协同作用,用双变量模型研究土壤温度和水分与土壤呼吸之间的关系^[22]:

$$F = \beta_0 e^{\beta_1 T} f(\theta) \quad (1)$$

式中, F ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)为土壤呼吸速率; T ($^{\circ}\text{C}$)为土壤 0—5 cm 土层温度; θ (%)为土壤 0—5 cm 土层水分; β_0 和 β_1 为模型参数。

试验数据预处理结果表明,当土壤含水量<18%时,土壤呼吸随土壤含水量的增加而增加;土壤含水量>18%时,土壤呼吸随土壤含水量的增加而降低。因此,上述双变量模型可具体为:

$$F = \beta_0 e^{\beta_1 T} e^{\beta_2 \theta + \beta_3 \theta^2} \quad (2)$$

式中, β_0 、 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 为模型参数。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸速率的季节和年际变化。

3a 的观测期间都可看到裸地土壤呼吸随季节变化而波动。雨季前(3—6 月),土壤温度在逐渐回升但土壤干旱制约使得土壤呼吸相对稳定在一个较低水平:2009 年为 $0.97 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,2010 年为 $1.12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,2011 年为 $1.15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;7 月当地进入高温多雨季节,月初土壤由于变湿,土壤呼吸出现显著升高现象(图 1)。雨季(7—9 月),土壤呼吸随降水变化而波动,2009 年的土壤呼吸平均为 $1.22 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 高于雨季前,但 2010 年 7—9 月雨季土壤呼吸为 $0.85 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,2011 年为 $0.77 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 都低于雨季前其相应土壤呼吸速率;雨季结束(10 月后),随着秋季来临土壤温度降低,土壤呼吸快速降低。雨季后,2009 年土壤呼吸平均为 $1.14 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,2010 年为 $0.64 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,2011 年为 $0.54 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

除显著的季节变化特征外,土壤呼吸在年际间也存在变异。2009 年土壤呼吸速率的最小值为 $0.62 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,最大值为 $1.83 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,均值为 $1.16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;2010 年和 2011 年土壤呼吸范围和均值都低于 2009 年。2010 年土壤呼吸的变化范围为 $0.30—1.46 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,均值为 $0.92 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;2011 年则为 $0.06—1.68 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.88 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1)。

2.2 土壤呼吸速率与土壤温度、水分的关系

3a 观测期间(2009—2011 年),土壤呼吸速率与土壤温度呈显著指数关系($P < 0.0001$)(表 1),土壤温度变化可以解释土壤呼吸 57%—67% 的变异性;而土壤呼吸速率与土壤水分含量呈显著负相关关系($P < 0.003—0.0001$)(表 1),土壤水分可以解释土壤呼吸 52%—79% 的变异性。由此表明,土壤呼吸由土壤温度和土壤水分共同控制,并符合以下土壤呼吸与温度、水分的双变量方程 $F = \beta_0 e^{\beta_1 T} e^{\beta_2 \theta + \beta_3 \theta^2}$ ($P < 0.0001$),该关系式可以解释土壤呼吸 73%—86% 的变异性(表 1)。

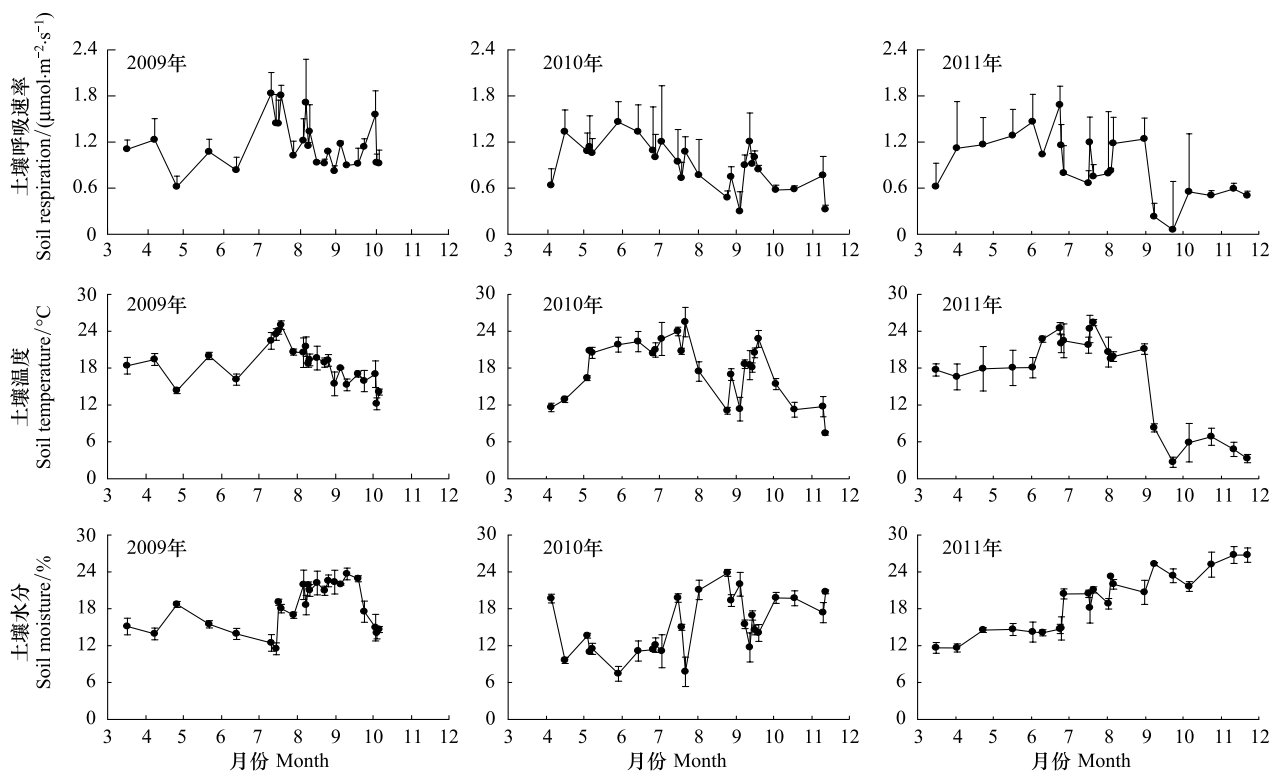


图1 试验期间土壤呼吸、温度和水分含量变化

Fig.1 Changes in soil respiration, soil temperature, and soil moisture between 2009 and 2011

表1 土壤呼吸与温度、水分的关系方程

Table 1 Equations between soil respiration, soil temperature and soil moisture

年份 Year	土壤呼吸与温度、水分的关系方程 Equations between soil respiration, soil temperature and soil moisture	<i>P</i>	<i>R</i> ²	<i>Q</i> ₁₀
土壤呼吸与土壤温度的单变量方程 Single-variable equations between soil respiration and soil temperature				
2009	$F = 0.3050e^{0.0694 T}$	<0.0001	0.67	2.00
2010	$F = 0.3253e^{0.0542 T}$	<0.0001	0.57	1.72
2011	$F = 0.2137e^{0.0718 T}$	<0.0001	0.61	2.05
土壤呼吸与土壤水分的单变量方程 Single-variable equations between soil respiration and soil moisture				
2009	$F = -0.0027\theta^2 + 0.0346\theta + 1.5893$	0.0003	0.52	
2010	$F = -0.0004\theta^2 - 0.0444\theta + 1.6908$	<0.0001	0.79	
2011	$F = -0.0077\theta^2 + 0.2222\theta - 0.4445$	0.0001	0.62	
土壤呼吸与土壤温度、水分的双变量方程 bivariate-variable equations between soil respiration and soil temperature and soil moisture				
2009	$F = 0.3512e^{0.04571T}e^{0.06698\theta - 0.00253\theta^2}$	<0.0001	0.73	
2010	$F = 0.4996e^{0.03445T}e^{0.03829\theta - 0.00272\theta^2}$	<0.0001	0.79	
2011	$F = 1.9073e^{0.11757T}e^{-0.32201\theta + 0.00777\theta^2}$	<0.0001	0.86	

*R*²: 决定系数 Coefficient of determination; *Q*₁₀: 土壤呼吸温度敏感性 temperature sensitivity of soil respiration

2.3 土壤呼吸累积量的年际变化及其与年际气温和降水的关系

2009 年为 282 g C/m², 2010 年为 234 g C/m², 而 2011 年为 230 g C/m² (图 2)。测定日期内 (3 月 15 日—11 月 20 日), 试验期间年均气温差异不大 (2009 年、2010 年和 2011 年依次为 15.41、15.07、14.63℃), 但总降水量具有显著差异, 2009 年、2010 年和 2011 年依次为 448.60、561.70、597.80 mm (图 2)。除总量 3a 间存在显

著差异外,与 2009 年相比,2010 和 2011 年 >5mm 降水次数和频率显著高于 2009 年。观测期间,雨季前土壤呼吸年际差异并不大(2009—2011 波动于 $0.97\text{—}1.15\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),但其余季节年际间变异较大。雨季期间($0.77\text{—}1.22\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)和雨季后($0.54\text{—}1.14\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。这一结果表明,土壤呼吸累积量的年际变化与降水量年际变化有关。2010 年和 2011 年雨季和雨季后土壤湿度维持较高水平可能是导致这两年土壤呼吸降低的原因。

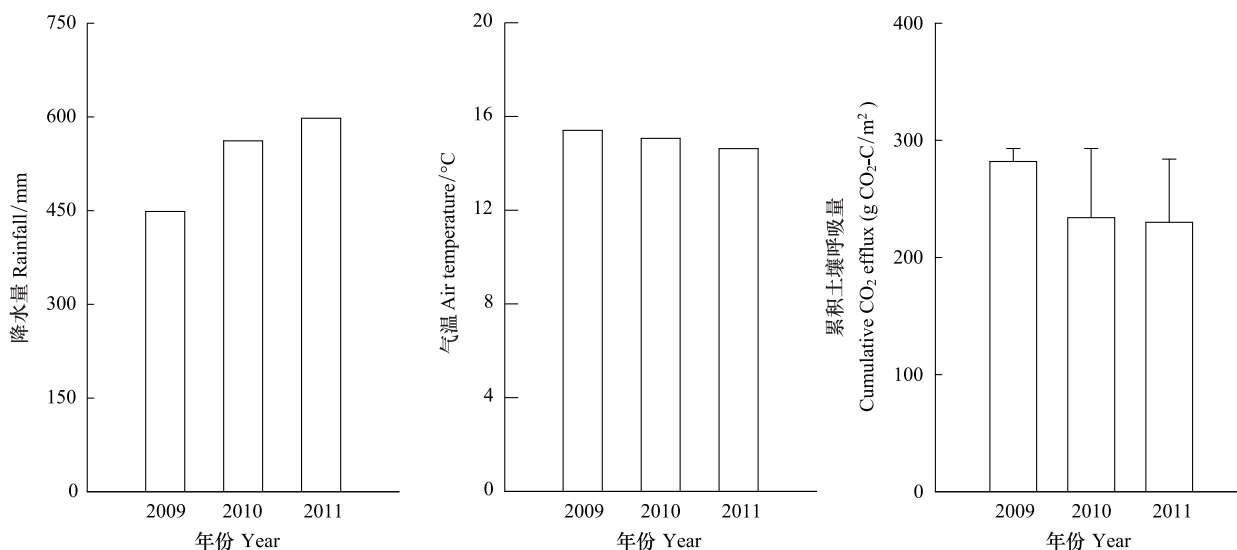


图 2 3a 试验期间降水总量,平均气温和累积土壤呼吸量的变化

Fig.2 Variations in total rainfall, mean air temperature and cumulative soil respiration between 2009 and 2011

3 讨论

3.1 裸地土壤有机碳的流失与水分、温度变化的关系

试验期间的不同年度均可看到土壤水分和温度的剧烈波动,土壤水分和温度影响土壤微生物呼吸的主要环境因素,且两者季节变化均与土壤呼吸的季节变化显著相关(图 1,表 1),在不同生态系统都有类似报道^[4-5,23-25]。同样地,尽管年气温和降水变化也会影响年际土壤呼吸变异,但在气温不是植被生长的限制性因素的地区或一些寒冷地区(年均气温 $4\text{—}10^{\circ}\text{C}$),年均气温与年土壤呼吸就无相关关系^[7,26]。在降水变异显著的地区,年降水显著影响年呼吸变化^[7]。本研究地处干旱半干旱地区,降水在季节和年际间剧烈波动,而年气温相对稳定。因此,土壤呼吸年际变化主要与年降水总量有关,而与年均气温无关(图 2)。

土壤温度常常被作为影响土壤呼吸的重要环境因素。在不考虑土壤水分变化或其不是限制因子时,可依据呼吸与温度的指数关系方程获得土壤呼吸的温度敏感系数(Q_{10})。在干旱半干旱地区,尤其本研究所在的黄土旱塬区,土壤含水量低(图 1)且干湿变化剧烈,在季节尺度上水分和温度变化都会显著影响土壤呼吸及其对温度的敏感性(图 3,表 1)。从图 3 可直观地看出,土壤水分含量高或低时,土壤呼吸因温度变化显著不同;相应地,土壤温度高或低时,呼吸随温度变化也不同。

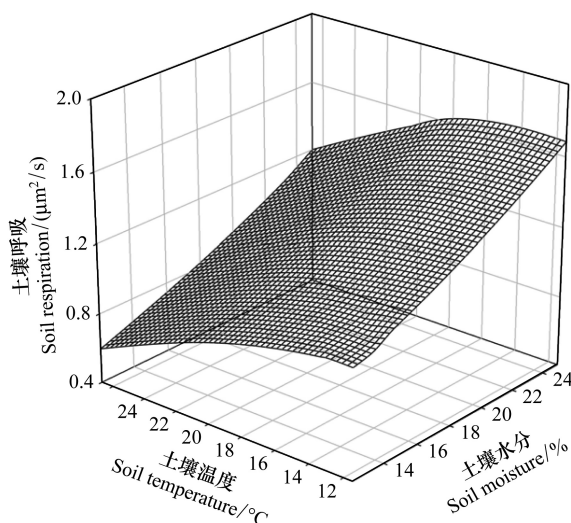


图 3 土壤呼吸对土壤水分、土壤温度的响应曲面

Fig.3 Response surface of soil respiration as a function of soil moisture and soil temperature according to the equation fitted to the soil respiration data in 2009

依据 2009 年土壤呼吸、温度和水分数据拟合双变量方程而作

已有报道发现 Q_{10} 变化与土壤水分或土壤温度变化密切相关^[23,27-28]。因此,在黄土区,土壤呼吸的模拟应充分考虑水分和温度环境因素的影响。

3.2 裸地土壤有机碳变化影响因素

裸地条件下,土壤呼吸主要来源微生物呼吸,与作物根系及其凋落物无关。因此,本研究裸地土壤呼吸速率显著低于同期相邻有小麦生长处理的土壤呼吸^[29]。长期休闲条件下没有新鲜有机物输入,土壤呼吸反映了土壤微生物对原有土壤有机碳分解和流失的影响^[2,30]。

从上述研究结果可以看出,观测期内(3a 平均),裸地处理土壤有机碳流失量大约在 249 g C/m^2 。本试验中裸地处理自 1984 年休闲以来 SOC 储量逐渐降低,SOC 浓度由试验开始的 6.5 g/kg 降低到目前 5.5 g/kg ,降幅达 15% (2.5 Mg C/hm^2 ,年流失量为 0.1 Mg C/hm^2)。包含休闲的轮作处理的 SOC 含量低于作物连作处理,休闲频率高的轮作体系中土壤有机碳含量低于休闲频率低的轮作体系^[31-32]。但令人惊讶的是,在本研究中依据三年基础呼吸的平均值(249 g C/m^2)估算,裸地处理每年 SOC 流失量为 2.5 Mg C/hm^2 左右,为实际每年碳流失量(0.1 Mg C/hm^2)的 25 倍。究其原因可能与以下因素有关:1)裸地处理尽管没有作物生长而降低了根系等凋落物的输入,但通过天然降尘输入的有机碳部分抵消了土壤有机碳的流失:在黄土高原地区,年降尘量大于 2.5 Mg ha^{-1} ^[33],试验附近地区(彬县和西峰)的降尘中有机质含量为 33.3%—42.9%^[34]。因此,随降尘进入土壤的有机碳大约为 $0.5\text{—}0.6 \text{ Mg C/hm}^2$;2)尽管没有新鲜有机物的输入,但土壤微生物固碳可占到 SOC 的 0.12%—0.59%^[35];3)碳通量监测的土壤碳流失一部分来自于土壤深层;4)裸地处理在理想条件下没有任何杂草生长,但在管理过程中采取定期人为清除裸地土壤上的杂草,少量残留杂草根系的分解有可能使得裸地土壤呼吸观测值偏高。但以上真实原因及其贡献需要我们进一步用试验研究确认。

黄土旱塬区是典型雨养农业区,夏季作物收获后农田往往采用休闲以调节土壤水分和养分。从上述研究结果可以看出,7—9 月高温多雨季节,有机碳流失量大约为 85 g C/m^2 ,雨季裸地土壤有机碳的流失量约占观测期内裸地土壤有机碳的流失量的 34%。在干旱半干旱地区,在保证蓄集天然降水条件下,种植填闲作物,缩短或减少休闲期有助于促进有机物输入,降低原有土壤有机碳分解,保持土壤肥力。

4 结论

基础土壤呼吸的平均速率为 $0.99 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$,因基础呼吸年流失的有机碳为 2.5 Mg C/hm^2 。但大气降尘等对裸地土壤有机碳的输入也不容忽视。裸地上,土壤呼吸具有显著季节和年际变化,其季节间变化由土壤水分和温度共同控制,可由温度、水分的双变量方程描述($F = \beta_0 e^{\beta_1 T} e^{\beta_2 \theta + \beta_3 \theta^2}$),土壤呼吸的年际变化主要由年降水总量控制,而与年均气温无关。因此,在气候变化的条件下,土壤有机碳流失与环境因素内在的生态联系因时间尺度存在差异。

References:

- [1] Eswaran H, Vandenberg E, Reich P. Organic-Carbon in Soils of the World. *Soil Sci Soc Am J*, 1993,57: 192-194.
- [2] Kuzyakov Y. Sources of CO_2 efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biol Biochem*, 2006,38(3): 425-448.
- [3] Grace J. Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology*, 2004,92(2): 189-202.
- [4] 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 Biol*, 1998, 4(2): 217-227.
- [5] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in Picea abies stands. *Soil Biol Biochem*, 2000,32(11/12): 1625-1635.
- [6] Davidson E A, Verchot LV, Cattaneo 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.
- [7] Reichstein M, Rey A, Freibauer A, Tenhunen J, Valentini R, Banza J, Casals P, Cheng Y F, Grunzweig J M, Irvine J, Joffre R, Law B E, Loustau D, Miglietta F, Oechel W, Ourcival J M, Pereira J S, Peressotti A, Ponti F, Qi Y, Rambal S, Rayment M, Romanya J, Rossi F, Tedeschi V, Tirone G, Xu M, Yakir D. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochem Cy*, 2003, 17(4): 1-15.
- [8] Holland E A, Neff J C, Townsend A R, McKeown B. Uncertainties in the temperature sensitivity of decomposition in tropical and subtropical ecosystems: Implications for models. *Global Biogeochem Cy*, 2000,14(4): 1137-1151.
- [9] Alberto M C R, Hirano T, Miyata A, Wassmann R, Kumar A, Padre A, Amante M. Influence of climate variability on seasonal and interannual variations of ecosystem CO_2 exchange in flooded and non-flooded rice fields in the Philippines. *Field Crops Research*, 2012,134:80-94.

- [10] Lei H M, Yang D W. Seasonal and interannual variations in carbon dioxide exchange over a cropland in the North China Plain. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 2944-2957.
- [11] 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.
- [12] Shi W Y, Zhang J G, Yan M J, Yamanaka N, Du S. Seasonal and diurnal dynamics of soil respiration fluxes in two typical forests on the semiarid Loess Plateau of China: Temperature sensitivities of autotrophs and heterotrophs and analyses of integrated driving factors. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 52: 99-107.
- [13] Forrester J A, Mladenoff D J, Gower S T, Stoffel J L. Interactions of temperature and moisture with respiration from coarse woody debris in experimental forest canopy gaps. *Forest Ecology and Management*, 2012, 265: 124-132.
- [14] Wang Y D, Li Q K, Wang H M, Wen X F, Yang F T, Ma, Z Q, Liu Y F, Sun X M, Yu G R. Precipitation frequency controls interannual variation of soil respiration by affecting soil moisture in a subtropical forest plantation Canadian. *Journal of Forest Research-Revues Canadienne De Recherche Forestiere*, 2011, 41(9): 1897-1906.
- [15] Chen X, Tang J, Jiang L, Li B, Chen J, Fang C. Evaluating the impacts of incubation procedures on estimated Q_{10} values of soil respiration. *Soil Biol Biochem*, 2010, 42(12): 2282-2288.
- [16] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396(6711): 570-572.
- [17] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, Koizumi H. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant Soil*, 2003, 255(1): 311-318.
- [18] Pavelka M, Acosta M, Marek M V, Kutsch W, Janous D. Dependence of the Q_{10} values on the depth of the soil temperature measuring point. *Plant Soil*, 2007, 292(1/2): 171-179.
- [19] Peng S, Piao S, Wang T, Sun J, Shen Z. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41(5): 1008-1014.
- [20] Guo S L, Wu J S, Dang T H. Effects of Crop Rotation and Fertilization on Aboveground Biomass and Soil Organic C in Semi-arid Region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(3): 744-751.
- [21] Wilson H M, Al-Kaisi M M. Crop rotation and nitrogen fertilization effect on Soil CO₂ emissions in central Iowa. *Appl Soil Ecol*, 2008, 39(3): 264-270.
- [22] Tang J, Qi Y, Xu M, Misson L, Goldstein A H. Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada. *Tree Physiol*, 2005, 25(1): 57-66.
- [23] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochem Cy*, 2001, 15(3): 687-696.
- [24] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, De Parri I, Jarvis P G, Valentini R. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biol*, 2002, 8(9): 851-866.
- [25] Xu L, Baldocchi D D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123(1/2): 79-96.
- [26] Janssens I, Lankreier H, Matteucci G, Kowalski A, Buchmann N, Epron D, Pilegaard K, Kutsch W, Longdoz B, Grünwald T. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biol*, 2001, 7(3): 269-278.
- [27] Lloyd J, Taylor J. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315-323.
- [28] Reichstein M, Tenhunen J, 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(1): 27-39.
- [29] Zhang F, Guo S L, Zou J L, Li Z, Zhang Y J. Effects of Nitrogen Fertilization, Soil Moisture and Soil Temperature on Soil Respiration During Summer Fallow Season. *Environment Science*, 2011, 32(11): 3175-3180.
- [30] Fontaine S, Barot S, Barre P, Bdioui N, Mary B, Rumpel C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 2007, 450(7167): 277-280.
- [31] Janzen H. Soil organic matter characteristics after long-term cropping to various spring wheat rotations. *Can J Soil Sci*, 1987, 67(4): 845-856.
- [32] Campbell CA, Biederbeck V O, McConkey B G, Curtin D, Zentner R P. Soil quality - Effect of tillage and fallow frequency. Soil organic matter quality as influenced by tillage and fallow frequency in a silt loam in southwestern Saskatchewan. *Soil Biol Biochem*, 1999, 31(1): 1-7.
- [33] Li J C, Dong Z B, Wang S M. Amount of Spring Dustfall and Its Environmental Significance in East Part of Northern China. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(2): 195-201.
- [34] Sun D H, Su R X, Chen F H, Yuan B Y. Composition, Susceptibility and Input Flux of Present Aeolian Dust Over Loess Plateau of China. *Acta Geo Graphica Sinica*, 2001, 56(2): 171-180.
- [35] Yuan H Z, Ge T D, Chen C Y, O'Donnell A G, Wu J S. Significant role for Microbial Autotrophy in the Sequestration of Soil Carbon. *Appl Environ Microb*, 2012, 78(7): 2328-2336.

参考文献:

- [20] 郭胜利, 吴金水, 党廷辉. 轮作和施肥对半干旱区作物地上部生物量与土壤有机碳的影响. *中国农业科学*, 2008, 41(3): 744-751.
- [29] 张芳, 郭胜利, 邹俊亮, 李泽, 张彦军. 长期施氮和水热条件对夏闲期土壤呼吸的影响. *环境科学*, 2011, 32(11): 3175-3180.
- [33] 李晋昌, 董治宝, 王训明. 中国北方东部地区春季降尘量及其环境意义. *中国沙漠*, 2008, 28(2): 195-201.
- [34] 孙东怀, 苏瑞侠, 陈发虎, 袁宝印. 黄土高原现代天然降尘的组成, 通量和磁化率. *地理学报*, 2001, 56(2): 171-180.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.22 Nov., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The review of methods for mapping species spatial distribution using presence/absence data LIU Fang, LI Sheng, LI Diqiang (7047)
- A research review of landscape service LIU Wenping, YU Zhenrong (7058)
- Progress on techniques for partitioning soil respiration components and their application in cropland ecosystem CHEN Minpeng, XIA Xu, LI Yinkun, MEI Xurong (7067)

Autecology & Fundamentals

- Effect of different stubble height treatments on the annual growth index and physiological characteristics of *Tetraena mongolica* in two growing seasons WANG Zhen, ZHANG Liwen, YU Yi, et al (7078)
- Photosynthetic characteristics of an endangered species *Tetrameles nudiflora* under different light and water conditions DENG Yun, CHEN Hui, YANG Xiaofei, et al (7088)
- The compensation capacity of tillering and production of main stem nodes in rice WEI Ming, LI Dongxia (7098)
- Simulation of leaf area and dry matter production of tobacco leaves based on product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation ZHANG Mingda, LI Meng, HU Xueqiong, et al (7108)
- Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain TIAN Shenzhong, WANG Yu, LI Na, et al (7116)
- Effects of the *Larix gmelinii* grown under different light intensities on the development and defensive enzyme activities of *Lymantria dispar* larvae LU Yifang, YAN Junxin, LI Shuangwen, et al (7125)
- Biological control efficiency of *Orius similis* Zheng (Hemiptera: Anthocoridae) on *Frankliniella occidentalis* (Pergande) under different spatial and caged conditions MO Lifeng, ZHI Junrui, TIAN Tian (7132)
- Preliminary study on scavenging mechanism of dissolved aluminum by phytoplankton WANG Zhaowei, REN Jingling, YAN Li, et al (7140)
- Leaf-form characteristics of plants in *Quercus aquifolioides* community along an elevational gradient on the Balang Mountain in Wolong Nature Reserve, Sichuan, China LIU Xingliang, HE Fei, FAN Hua, et al (7148)
- Comparison of shrimp density between the Minjiang estuary and Xinhua bay during spring and summer XU Zhaoli, SUN Yue (7157)
- The feeding selectivity of an herbivorous amphipod *Ampithoe valida* on three dominant macroalgal species of Yundang Lagoon ZHENG Xinqing, HUANG Lingfeng, LI Yuanchao, et al (7166)

Population, Community and Ecosystem

- Effects of four different agricultural prevention and control measures on rice yellow stem borer *Tryporyza incertulas* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) ZHANG Zhenfei, HUANG Bingchao, XIAO Hanxiang, et al (7173)
- Soil nitrogen concentrations and transformations under different vegetation types in forested zones of the Loess Gully Region XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (7181)
- Ecosystem health assessment based on diagnosis CAI Xia, XU Songjun, CHEN Shanhao, et al (7190)
- The production and accumulation of phytoliths in rice ecosystems: a case study to Jiaxing Paddy Field LI Zimin, SONG Zhaoliang, JIANG Peikun (7197)
- Application of a free search-based projection pursuit model in investigating reed in wetlands LI Xinhua, ZHAO Chengyi (7204)

- Soil microbial diversity under typical vegetation zones along an elevation gradient in Helan Mountains
..... LIU Bingru, ZHANG Xiuzhen, HU Tianhua, et al (7211)
- Effects of shrub encroachment on biomass and biodiversity in the typical steppe of Inner Mongolia
..... PENG Haiying, LI Xiaoyan, TONG Shaoyu (7221)
- Research on diaspore morphology and species distribution of 80 plants in the hill-gully Loess Plateau
..... WANG Dongli, ZHANG Xiaoyan, JIAO Juying, et al (7230)
- Habitat suitability assessment of blue sheep in Helan Mountain based on MAXENT modeling
..... LIU Zhensheng, GAO Hui, TENG Liwei, et al (7243)
- Characteristic of phytoplankton primary productivity and influencing factors in littoral zone of Lake Taihu
..... CAI Linlin, ZHU Guangwei, LI Xiangyang (7250)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Responses of soil respiration to changes in depth of seasonal frozen soil in Ebinur Lake area, arid area of Northwest China
..... QIN Lu, LV Guanghui, HE Xuemin, et al (7259)
- Seasonal and annual variation characteristic in basal soil respiration of black loam under the condition of farmland field
..... ZHANG Yanjun, GUO Shengli, LIU Qingfang, et al (7270)
- Resource and Industrial Ecology**
- Economic evaluation and protection of *Amygdalus mira* genetic resource ZHANG Lirong, MENG Rui, LU Guobin (7277)
- Meteorological grading indexes of water-saving irrigation for cotton XIAO Jingjing, HUO Zhiguo, YAO Yiping, et al (7288)
- Research Notes**
- Sprouts characteristic structure of *Taxus yunnanensis* plantation SU Lei, SU Jianrong, LIU Wande, et al (7300)
- The effects of forest conversion on soil N mineralization and its availability in central jiangxi subtropical region
..... SONG Qingni, YANG Qingpei, YU Dingkun, et al (7309)

《生态学报》2014 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,探索生态学奥秘,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,280 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

本期责任副主编 杨志峰

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 22 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 22 (November, 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