

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

米槠天然林和人工林土壤呼吸的比较研究

吴君君^{1,2}, 杨智杰^{1,2*}, 翁发进³, 刘小飞^{1,2}, 陈朝琪^{1,2}, 林伟盛^{1,2}, 王小红^{1,2}, 陈坦^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 3. 福建三明市梅列区林业局, 三明 365000)

摘要: 采用 Li-8100 开路式土壤碳通量系统, 对福建省三明市格氏栲自然保护区米槠天然林和人工林土壤呼吸进行 1 a 的定位观测, 分析了土壤水热因子及凋落物对土壤呼吸的影响。结果表明, 米槠天然林和人工林土壤呼吸速率月变化均呈单峰型曲线, 峰值分别出现在 6 月上旬 [$7.03 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 和 7 月下旬 [$5.12 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]; 天然林和人工林土壤呼吸速率的年均值分别为 $3.74 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $3.05 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 两者之间有显著差异 ($P < 0.05$); 土壤温度是影响土壤呼吸的主要因素, 分别可以解释天然林和人工林土壤呼吸速率月动态变化的 80.1% 和 81.0%; 天然林土壤含水量与土壤呼吸速率呈显著正相关, 但人工林两者不具有相关关系; 天然林和人工林土壤呼吸速率与当月凋落物量和前一个月凋落物量呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$); 指数方程计算的天然林和人工林土壤呼吸的 Q_{10} 值分别为 1.86 和 2.01, 天然林和人工林土壤呼吸年通量值分别为 $14.34 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $11.18 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 天然林转换为人工林后, 土壤呼吸年通量下降了 22.03%。

关键词: 米槠天然林; 人工林; 土壤呼吸; 土壤温度; 凋落物量

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2426-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.052

Comparison of Soil Respiration in Natural *Castanopsis carlesii* Forest and Plantation Forest

WU Jun-jun^{1,2}, YANG Zhi-jie^{1,2}, WENG Fa-jin³, LIU Xiao-fei^{1,2}, CHEN Chao-qi^{1,2}, LIN Wei-sheng^{1,2}, WANG Xiao-hong^{1,2}, CHEN Tan^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. Meilie District Forestry Bureau of Sanming, Sanming 365000, China)

Abstract: By using the Li-8100 open soil carbon flux system, the dynamic change of soil respiration rate in natural *Castanopsis carlesii* and plantation of *Castanopsis carlesii* forests in Geshikao Nature Reserve in Fujian Province of China were measured from January 2011 to December 2011, with the relationship between the dynamic changes and the relation affecting factors analyzed. The monthly variation of soil respiration in the two types of forests were both single-peaked, with the peaks appeared in early June [$7.03 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] and late July [$5.12 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], respectively. The average annual soil respiration rates of the two forests were $3.74 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ and $3.05 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, respectively, showing significant difference. Soil temperature was the main factor affecting soil respiration, explaining 80.1% and 81.0% of the monthly variation of soil respiration. There was a significant positive correlation between the soil respiration rate and soil moisture content in natural *Castanopsis carlesii* forest, but lower correlation in plantation of *Castanopsis carlesii* forest. The soil respiration had extremely significant correlation with the litterfall mass of the current month and the month before. The Q_{10} values of soil respiration in natural *Castanopsis carlesii* and plantation of *Castanopsis carlesii* forests were 1.86 and 2.01, and the annual CO_2 fluxes were $14.34 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ and $11.18 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, respectively. The soil respiration declined by 22.03% after natural forest was changed to plantation forest.

Key words: natural forest of *Castanopsis carlesii*; plantation forest; soil respiration; soil temperature; litterfall mass

森林生态系统存储了陆地生态系统超过 50% 的碳, 其中 60% ~ 70% 的碳存储在森林土壤中^[1,2], 森林土壤作为一个巨大的碳库, 在全球碳循环中起着十分重要的作用^[3,4]. 全球范围内土壤呼吸每年向大气释放约 80 ~ 100 Pg 的碳^[3,5], 是化石燃料燃烧碳排放量的 10 多倍^[6], 而森林土壤碳排放量占全球土壤碳排放量的 60% ~ 70%^[7]. 所以, 森林土壤呼吸即使发生微小的变化, 对全球碳循环, 特别是对大气 CO_2 浓度的变化将产生重大影响。

我国中亚热带地区存在的常绿阔叶林是全球同纬度特有的重要森林类型, 具有极高的生物量和生产力, 对全球陆地生态系统 C 贮存发挥着重要贡献。长期以来, 天然林转换为人工林是中亚热带山区普遍的土地利用变化形式, 大面积天然林通过皆

收稿日期: 2013-10-14; 修订日期: 2013-11-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(31130013)

作者简介: 吴君君(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为森林土壤碳循环, E-mail: byyoursidejun@163.com

* 通讯联系人, E-mail: daoyang9@163.com

伐、炼山和整地等传统营林措施而改为群落结构简单树种单一人工林^[8],Pan 等^[9]的研究表明,2000 ~ 2007 年间全球土地利用方式的改变每年向大气释放约(1.1 ± 0.7)Pg 的碳,也有研究表明近 150 年来全球因土地利用变化而向大气排放的 CO₂ 量的 87% 来源于森林转换^[10].

Werner 等^[11]在我国云南的研究表明,季雨林经过皆伐,火烧形成橡胶人工林后,土壤呼吸减少 49%,Payeur-Poirier 等^[12]在加拿大魁北克的研究发现,黑云杉天然更新林经过皆伐形成云杉人工林后土壤呼吸下降 15.7%;而褚金翔等^[13]在四川的研究表明,冷杉天然林转变为云杉人工林后,土壤呼吸增加了 29%,Liu 等^[14]在浙江的研究发现,常绿阔叶林转变为毛竹林后,土壤呼吸也有增加趋势.由此可见,森林转换引起土壤碳排放机制还有不确定性.

本研究对米楮(*Castanopsis carlesii*)天然林和人工林土壤呼吸速率,土壤温度,含水量以及凋落物进行了为期 1 a 的观测和收集,分析天然林和人工林土壤呼吸的月动态和年通量,以及与温度、含水量和凋落物量之间的关系,通过揭示天然林转换为人工林后土壤 CO₂ 释放规律及其影响因子,以期为生态系统土壤碳排放机制提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验样地概况

米楮天然林和人工林地位于三明格氏栲自然保

护区(26°11'N,117°28'E)内.属于中亚热带季风气候,试验地附近的三明市年均气温 20.1℃,年降水量 1 670 mm,降水多集中于 3 ~ 8 月.天然林约 200 a 未受人为干扰.样地海拔为 315 m,坡向 NE 25°,坡度 20°.建群树种为米楮,主要树种有木荷(*Schima superba*)、格氏栲(*Castanopsis kawakaomii*)、桂北木姜子(*Litsea subcoriace*)、杜英(*Elaeocarpus decipiens*)等.林分密度为 1 955 株·hm⁻²,郁闭度 0.89,平均胸径 20.0 cm,平均树高 11.9 m.群落分层明显,可划分为乔木层、灌木层和草本层 3 个层次.林下地被层较厚,并且散布有枯立木、倒木和死树枝杆等,枯枝落叶厚度 5 ~ 8 cm.

米楮人工林前身为米楮天然林,20 世纪 60 年代经过皆伐、火烧、挖穴造林和幼林抚育形成米楮人工林,林分密度为 2 042 株·hm⁻²,平均胸径 16.6 cm,平均树高 14.2 m.样地海拔 305 m,坡度为 15°.林下植被主要以毛冬青(*Ilex pubescens*)、乌饭树(*Vaccinium bracteatum*)、薄叶山矾(*Symplocos anomala*)、桂北木姜子、山姜等为主,草本以芒萁(*Dicranopteris dichotama*)为主.样地主要特征和 0 ~ 20 cm 土壤理化性质见表 1.

1.2 样地布设与土壤呼吸测定

2010 年 8 月别于天然林、米楮人工林上、中、下坡,随机布设 3 块 20 m × 20 m 的标准样地,在每块标准样地内随机布设 15 个 PVC 环(20 cm 内径

表 1 试验地组要特征和表层(0~20 cm)土壤性质

Table 1 Main characteristics of the sites and top soil(0-20 cm)properties							
试验地	土层 /cm	有机碳 /g·kg ⁻¹	全 N /g·kg ⁻¹	全 P /g·kg ⁻¹	容重 /g·cm ⁻³	细根生物量 /kg·m ⁻³	年凋落物量 /t·hm ⁻²
米楮天然林	0 ~ 10	44.93	2.34	0.48	1.09	191.05	7.63
	10 ~ 20	23.05	1.48	0.43	1.15	63.30	
米楮人工林	0 ~ 10	21.08	1.97	0.48	1.12	82.62	5.91
	10 ~ 20	11.81	1.36	0.52	1.24	32.63	

× 10 cm 高).PVC 环底部用车床削尖,然后用铁锤敲击插入土壤 3 ~ 5 cm 深.

从 2011 年 1 月 ~ 2011 年 12 月,于每月上旬(10 号左右)和下旬(25 号左右)各选择一天对土壤呼吸进行测量.土壤呼吸采用 2 台 LI-8100 土壤碳通量测量系统连接短期测量室进行测量.测定时间均选择在 09:00 ~ 11:00 进行;在观测土壤呼吸的同时,使用手持长杆电子温度探针测定土壤 5 cm 深度土温,并且使用时域反射仪(TDR)测定每个 PVC 环附近土壤的体积含水量.

1.3 凋落物收集

布置土壤呼吸圈的同时,在样地内按随机加布局控制的原则(分别位于上、中、下坡并分布均匀)布设 15 个 0.7 m × 0.7 m 的凋落物收集框.凋落物收集框用 1 mm 孔径的尼龙网制成,离地面高 20 ~ 25 cm 水平放置.于每月月底收集每个框内的地上凋落物,然后在 80℃ 下烘干至恒定质量后称重,计算样品干重和单位面积凋落物量.

1.4 数据处理

所有数据统计分析基于 SPSS 17.0 软件进行.

采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和多重比较检验土壤呼吸速率季节变化的显著性; 采用独立样本 T 检验来检验米楮天然林和人工林土壤呼吸速率和土壤呼吸年通量差异的显著性。

为分析土壤温度、土壤含水量和凋落物量与土壤呼吸速率的关系, 采用如下模型:

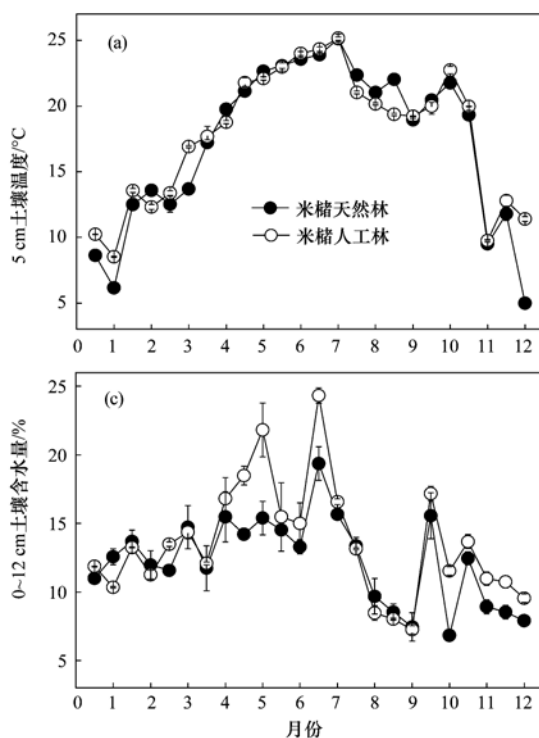
$R_s = ae^{bt}$; $R_s = aW + b$; $R_s = ae^{bt}W^c$; $R_s = ae^{bt}L^c$ 式中, R_s 表示土壤呼吸速率, t 表示土壤 5 cm 深处温度, W 表示 0~12 cm 范围内土壤含水量, L 表示月凋落物量, a 、 b 、 c 为待定参数。

采用指数模型 $Q_{10} = e^{10b}$ 计算 Q_{10} 值。显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

以每半个月测定的土壤呼吸速率均值代表该半月平均土壤呼吸速率, 通过将每半个月土壤呼吸通量累加, 计算求得土壤呼吸年通量。

2 结果与分析

2.1 两种林分土壤温度和含水量的月变化



观测期间, 两种林分土壤 5 cm 深度温度均呈现出明显的月变化 [图 1(a)], 土壤温度最高值都出现在 7 月上旬, 最低值天然林出现在 12 月下旬, 人工林出现在 1 月下旬。米楮人工林和天然林土壤的平均温度分别为 17.32°C 和 17.84°C, 两者之间没有显著性差异。地表 0~12 cm 深土壤含水量的月波动较频繁 [图 1(c)], 在冬季和春季变化趋于平稳, 在夏秋季节变化较剧烈, 两种林分都在 7 月上旬出现最大值, 在 9 月下旬出现最小值, 平均含水量分别为 12.26% 和 13.57%, 两者之间没有显著性差异。

2.2 两种林分凋落物量的月变化

米楮天然林和人工林凋落物的月变化呈明显的双峰型曲线 [图 1(b)], 天然林在 4 月和 7 月出现较大值, 而人工林在 4 月和 6 月出现较大值; 两种林分月凋落物量的最小值都出现在 11 月, 月凋落物量的均值分别为 $64.22 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $54.91 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 天然林较人工林高 14.48%, 两者之间没有显著差异。

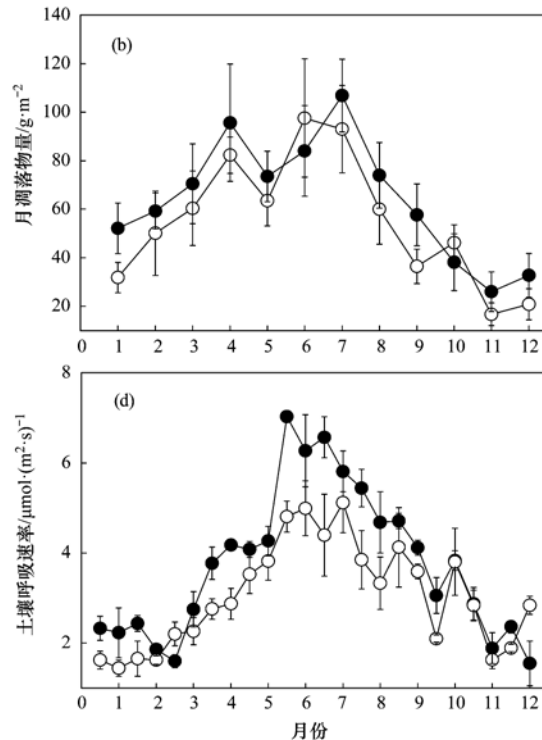


图 1 米楮天然林和人工林土壤温度、土壤含水量、凋落物量和土壤呼吸速率的月动态

Fig. 1 Monthly dynamics of soil temperature, moisture, litterfall and soil respiration in natural forest of *Castanopsis carlesii* and plantation forest

2.3 两种林分土壤呼吸速率的月变化

米楮天然林和人工林土壤呼吸速率的月变化呈现明显的单峰型曲线 [图 1(d)]. 在观测期间, 天然林土壤呼吸速率的变化范围为 $1.55 \sim 7.03 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 平均值为 $3.74 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 最

大值和最小值分别出现在 6 月上旬和 12 月下旬; 人工林土壤呼吸速率的变化范围为 $1.44 \sim 5.12 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 平均值为 $3.05 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 最大值和最小值分别出现在 1 月下旬和 7 月下旬。研究期间, 米楮天然林和人工林土壤呼吸速率分别表

现出明显的季节差异(表2),两种林分各季节土壤呼吸速率均值同样为夏季>春季>秋季>冬季,天然林各季节均值都大于人工林,在夏季表现出显著差异,其它季节均无显著差异.

表2 不同季节米楮天然林和人工林土壤呼吸速率¹⁾

Table 2 Soil respiration in natural forest of <i>Castanopsis carlesii</i> and plantation forest				
试验地	春季	夏季	秋季	冬季
米楮天然林	3.72 ± 0.63aA	5.70 ± 0.68bA	3.49 ± 1.02aA	2.24 ± 0.36cA
米楮人工林	2.91 ± 0.67aA	4.34 ± 0.62bB	2.72 ± 0.77aA	1.85 ± 0.51cA

1) 同行不同小写字母表示相同林分不同季节土壤呼吸速率差异显著; 同列不同大写字母表示不同林分土壤呼吸速率差异显著 ($P < 0.05$)

米楮天然林和人工林土壤呼吸的年通量分别为 $14.34 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $11.18 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 且天然林比人工林多 22.03%.

2.4 土壤呼吸对土壤温度、含水量以及凋落物量变化的响应

土壤呼吸速率与土壤 5 cm 处温度呈极显著正相关关系,采用单因素模型 ($R_s = ae^{bt}$) 模拟发现,土壤温度可以解释米楮天然林和人工林呼吸变化的 80.1% 和 81.0% (表3). 根据 5 cm 处土壤温度计算的天然林和人工林土壤呼吸 Q_{10} 值分别为 1.86 和 2.01,不同林地土壤呼吸的温度敏感性有显著差异. 米楮天然林和人工林土壤呼吸速率与含水量的关系表现的不尽一致,天然林土壤呼吸速率与含水量呈显著的相关关系,而人工

林二者之间不具有相关关系. 采用双因素关系模型 ($R_s = ae^{bt}W^c$),土壤温度和含水量可共同解释天然林和人工林土壤呼吸季节变化的 81.3% 和 85.6% ($P < 0.001$). 通过将土壤呼吸速率和温度、含水量构建双因素模型能更好解释土壤呼吸的变化.

米楮天然林和人工林土壤呼吸速率与各自凋落物量呈现显著地正相关关系,凋落物量分别解释了土壤呼吸速率变化的 55.3% 和 54.9%. 采用双因素模型 ($R_s = ae^{bt}L^c$),土壤温度和凋落物量可以分别共同解释天然林和人工林土壤呼吸季节变化的 94.0% 和 91.8% ($P < 0.001$). 通过将土壤呼吸速率和温度、凋落物量双因素模型也能更好解释土壤呼吸的变化.

表3 土壤呼吸速率(R_s)与土壤温度(t)、土壤含水量(W)及凋落物量(L)的回归方程系数

Table 3 Coefficients of regression models between monthly soil respiration(R_s), soil temperature(t), moisture(W) and monthly litterfall mass(L)							
试验地	模型	参数			R^2	P	n
		a	b	c			
米楮天然林	$R_s = aW + b$	0.994	0.224	0	0.189 *	0.034	24
	$R_s = ae^{bt}$	1.053	0.068	0	0.801 * *	<0.001	24
	$R_s = ae^{bt}W^c$	0.674	0.077	0.111	0.813 * *	<0.001	24
	$R_s = ae^{bt}L^c$	0.478	0.058	0.245	0.940 * *	<0.001	12
米楮人工林	$R_s = aW + b$	1.761	0.095	0	0.116	0.103	24
	$R_s = ae^{bt}$	0.792	0.071	0	0.810 * *	<0.001	24
	$R_s = ae^{bt}W^c$	1.113	0.084	-0.223	0.856 * *	<0.001	24
	$R_s = ae^{bt}L^c$	0.629	0.071	0.055	0.918 * *	<0.001	12

1) * 表示 $P < 0.05$; * * 表示 $P < 0.01$

3 讨论

3.1 温度和含水量对土壤呼吸的影响

土壤呼吸和温度之间具有显著的相关性^[15]. 本研究中,通过建立土壤呼吸与温度的指数模型表明,土壤温度可分别解释米楮天然林和米楮人工林土壤呼吸变化的 80.1% 和 81.0%. 土壤含水量与土壤呼吸之间的相关关系并不明确^[16]. 土壤温度对土壤呼吸的影响是几个复杂生态过程共同作用的结果^[17]. 当这种复合关系存在时,不可能单独分离出土壤呼吸作用的温度或者含水量效应^[18]. 土壤呼吸速率与土

壤温度和含水量的双因素模型表明,土壤温度和土壤含水量共同解释了米楮天然林和人工林土壤呼吸季节变化的 81.3% 和 85.6%. 由于本研究样地具有典型的季风气候特征,一年中雨热同季且分配不均,若采用土壤温度和含水量双因素模型来研究土壤呼吸速率的季节变化结果可能更可靠.

土壤呼吸的温度敏感性一般采用 Q_{10} 表示. 本研究中米楮天然林和人工林土壤全年 Q_{10} 分别为 1.86 和 2.01,在中国森林土壤呼吸 Q_{10} 范围(1.33 ~ 5.33)之内^[19],但是低于均值 2.65,也小于 Raich 等^[20]报道的全球土壤呼吸 Q_{10} 值的均值 2.4. 中国

不同气候带人工林土壤呼吸 Q_{10} 值变化范围为 (1.13 ~ 3.26), 均值为 2.09^[21], 与本研究中美楮人工林土壤全年 Q_{10} 2.01 接近. 本研究中天然林土壤呼吸 Q_{10} 值低于人工林, 这表明, 米楮天然林在经过人为干扰, 形成米楮人工林后, 土壤呼吸 Q_{10} 值有增大的趋势. Sheng 等^[22] 和 Hu 等^[23] 对不同天然林转变为人工林的研究发现, 土壤呼吸 Q_{10} 值会随着人为干扰强度的增加而升高, 人为干扰强度增加, 加速了有机质的分解和微生物的活性, 从而增强了土壤呼吸的温度敏感性^[24].

3.2 凋落物对土壤呼吸的影响

凋落物层对生态系统的环境、土壤和植被均有

一定的塑造作用^[25], 本研究表明, 米楮天然林和人工林土壤呼吸与当月和前一个月凋落物量呈现显著相关性(表 4), 主要是因为凋落物在森林系统营养物质循环中起着重要作用, 提供植物生长和微生物活动所需要的一切养分^[26,27], 另一方面, 凋落物归还量的季节变化也对土壤呼吸动态产生影响, 主要通过改变呼吸底物的数量影响土壤呼吸. 王超等^[28] 对亚热带地区毛竹林研究发现毛竹林土壤呼吸与当月凋落物量(1 ~ 6 月)呈显著正相关关系. 米楮天然林的年凋落物量大于米楮人工林, 从而对米楮天然林土壤呼吸速率和呼吸年通量大于人工林产生一定影响.

表 4 土壤呼吸速率(R_s)与月凋落物量的相关性分析

Table 4 Correlation between monthly soil respiration and monthly litterfall

试验地		前第 3 个月	前第 2 个月	前第 1 个月	当月	后第 1 个月
米楮天然林	<i>r</i>	0.416	0.679	0.770	0.744	0.466
	<i>P</i>	0.179	0.015	0.003	0.006	0.127
	<i>n</i>	12	12	12	12	12
米楮人工林	<i>r</i>	0.147	0.488	0.780	0.741	0.358
	<i>P</i>	0.649	0.107	0.003	0.006	0.253
	<i>n</i>	12	12	12	12	12

3.3 森林转换对土壤呼吸的影响

森林的管理措施通过改变群落的植被组成、土壤的理化性质以及林内的小气条件等, 直接或间接地影响土壤呼吸的 CO_2 排放^[29]. 植物群落组成在调控森林土壤呼吸过程中也起着重要作用, 不同类型的植物群落表现出不同的土壤呼吸速率^[30,31].

在研究期间估算米楮天然林和人工林土壤呼吸的年通量分别为 $14.34\ t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$ 和 $11.18\ t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$, 介于中国森林土壤呼吸年通量变化范围内 $[2.36 \sim 30.19\ t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}]$ ^[19], 米楮天然林经过皆伐、火烧、挖穴造林和幼林抚育形成米楮人工林后土壤呼吸年通量下降了 22.03%. 盛浩等^[32] 对亚热带常绿阔叶林转变为次生林、人工林以及柑橘园、坡耕地的研究发现, 土壤呼吸下降了 32% ~ 63%, 平均下降 48%; Yang 等^[33] 在我国福建的研究表明常绿阔叶林在经过皆伐火烧形成杉木林后土壤呼吸通量减少 31% ~ 67%, 他们认为天然林转换为人工林后, 土壤呼吸通量下降的主要原因是有机碳储量、细根生物量以及凋落物量的下降所引起的. Liu 等^[14] 的研究发现常绿阔叶林转变为毛竹林后, 土壤呼吸通量有增加的趋势, 并且归因于集约型的管理措施; 施肥和高密度种植; 史宝库等^[34] 对小兴安岭原始阔叶红松林转变为次生白桦林后的研究

发现, 生长季节土壤呼吸速率增加了 33%, 并且认为是由于次生白桦林经过人为干扰后, 林分处于生长阶段, 生态系统代谢旺盛造成的. 诸多研究表明森林土壤呼吸与土壤有机碳含量呈现显著的正相关关系^[35,36], 天然林砍伐以及随后的土地利用活动(如炼山、挖穴造林), 常造成土壤有机质的严重流失^[37], 米楮天然林土壤呼吸年通量较人工林大, 这主要是因为米楮天然林 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 土层土壤有机碳储量都显著大于人工林(表 1). 此外根系呼吸对土壤呼吸的贡献在 45% ~ 50% 的范围内^[38], 细根的作用尤其明显, 米楮天然林 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 土层细根生物量显著高于人工林(表 1), 同样引起米楮天然林土壤呼吸年通量较人工林大.

4 结论

(1) 米楮天然林和人工林土壤呼吸与土壤 5 cm 深处温度呈极显著正相关关系, 天然林与土壤 0 ~ 12 cm 范围内含水量呈显著正相关关系, 人工林土壤呼吸与含水量不具有相关关系. 土壤温度和含水量共同解释了土壤呼吸变化的 81.3% 和 85.6%.

(2) 米楮天然林和人工林土壤呼吸速率与当月和前 1 个月凋落物量呈极显著正相关关系. 土壤温

度和凋落物量可以共同解释土壤呼吸变化的 94.0% 和 91.8%。

(3) 米楮天然林转换为米楮人工林后, 土壤理化性质发生改变, 其中有机碳和全氮含量都有所下降; 土壤表层细根生物量和年凋落物量也有所降低, 从而引起了米楮人工林土壤呼吸年通量较天然林降低了 22.03%。

参考文献:

- [1] Watson R T, Noble I R, Bolin B, *et al.* Land use, land-use change, and forestry: a special report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] Lorenz K, Lal R. Carbon sequestration in forest ecosystems[M]. Berlin: Springer, 2010.
- [3] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, **464** (7288): 579-582.
- [4] Liu J X, Zhou G Y, Zhang D Q, *et al.* Carbon dynamics in subtropical forest soil: effects of atmospheric carbon dioxide enrichment and nitrogen addition[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**(4): 730-738.
- [5] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94[J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(8): 800-812.
- [6] Reichstein M, Rey A, Freibauer A. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices[J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2003, **17**(4): 1104-1119.
- [7] Steinmann K, Siegwolf R T, Saurer M, *et al.* Carbon fluxes to the soil in a mature temperate forest assessed by ^{13}C isotope tracing[J]. *Oecologia*, 2004, **141**(3): 489-501.
- [8] 陈光水, 杨玉盛, 王小国, 等. 格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态及影响因素[J]. *生态学报*, 2005, **25**(8): 1941-1947.
- [9] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, **333** (6045): 988-993.
- [10] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, **263** (5144): 185-190.
- [11] Werner C, Zheng X H, Tang J W, *et al.* N_2O , CH_4 and CO_2 emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China[J]. *Plant and Soil*, 2006, **289**(1-2): 335-353.
- [12] Payeur-Poirier J L, Coursolle C, Margolis H A, *et al.* CO_2 fluxes of a boreal black spruce chronosequence in eastern North America[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **153**(15): 94-105.
- [13] 褚金翔, 张小全. 川西亚高山林区三种土地利用方式下土壤呼吸动态及组分区分[J]. *生态学报*, 2006, **26**(6): 1693-1700.
- [14] Liu J, Jiang P, Wang H, *et al.* Seasonal soil CO_2 efflux dynamics after land use change from a natural forest to Moso bamboo plantations in subtropical China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, **262**(6): 1131-1137.
- [15] Fang C, Moncrief J B. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**(2): 155-165.
- [16] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, *et al.* Effects of water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 53-69.
- [17] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应[J]. *生态学报*, 2004, **24**(3): 583-591.
- [18] 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J]. *植物生态学报*, 2007, **27**(5): 1960-1968.
- [19] 陈光水, 杨玉盛, 吕萍萍, 等. 中国森林土壤呼吸模式[J]. *生态学报*, 2008, **28**(4): 1748-1761.
- [20] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B*, 1992, **44**(2): 81-99.
- [21] 王超, 黄蓉, 杨智杰, 等. 万木林保护区柑橘和锥栗园土壤呼吸的比较[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(6): 1469-1475.
- [22] Sheng H, Yang Y S, Yang Z J, *et al.* The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China[J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(3): 1107-1121.
- [23] Hu R G, Kusa K, Hatano R. Soil respiration and methane flux in adjacent forest, grassland, and cornfield soils in Hokkaido, Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2001, **47**(3): 621-627.
- [24] McCulley R L, Boutton T W, Archer S R. Soil respiration in a subtropical savanna parkland: Response to water additions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**(3): 820-828.
- [25] 韩广轩, 周广胜. 土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望[J]. *植物生态学报*. 2009, **33**(1): 197-205.
- [26] Sayer E J, Tanner E V J. Experimental investigation of the importance of litterfall in lowland semi-evergreen tropical forest nutrient cycling[J]. *Journal of Ecology*, 2010, **98**(5): 1052-1062.
- [27] Tobon C, Sevink J, Verstraten J M. Litterflow chemistry and nutrient uptake from the forest floor in northwest Amazonian forest ecosystems[J]. *Biogeochemistry*, 2004, **69**(3): 315-339.
- [28] 王超, 杨智杰, 陈光水, 等. 万木林保护区毛竹林土壤呼吸特征及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(5): 1212-1218.
- [29] 张冬秋, 石培礼, 张宪洲, 等. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, **20**(7): 778-785.
- [30] Carbone M S, Trumbore S E. Contribution of new photosynthetic assimilates to respiration by perennial grasses and shrubs: residence times and allocation patterns[J]. *New Phytologist*, 2007, **176**(1): 124-135.
- [31] Johnson D, Phoenix G K, Grime J P. Plant community

- composition, not diversity, regulates soil respiration in grasslands [J]. *Biology Letters*, 2008, **4**(4): 345-348.
- [32] 盛浩, 李旭, 杨智杰, 等. 中亚热带山区土地利用变化对土壤 CO₂ 排放的影响[J]. *地理科学*, 2010, **30**(3): 446-451.
- [33] Yang Y S, Chen G S, Guo J F, *et al.* Soil respiration and carbon balance in a subtropical native forest and two managed plantations [J]. *Plant Ecology*, 2007, **193**(1): 71-84.
- [34] 史宝库, 金光泽, 汪兆洋. 小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异[J]. *生态学报*, 2012, **32**(17): 5416-5428.
- [35] Merbold L, Ziegler W, Mukelabai M M, *et al.* Spatial and temporal variation of CO₂ efflux along a disturbance gradient in a miombo woodland in Western Zambia [J]. *Biogeosciences*, 2011, **8**(1): 147-164.
- [36] Chen S, Huang Y, Zou J, *et al.* Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150**(4): 590-605.
- [37] 杨玉盛, 谢锦升, 盛浩, 等. 中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响[J]. *地理学报*, 2007, **62**(11): 1123-1131.
- [38] Subke J A, Inglis I, Cotrufo M F. Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: a metaanalytical review [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(6): 921-943.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行