

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

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

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫酸类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响

王蕊¹, 郭胜利^{1,2,3*}, 刘庆芳¹, 张彦军³, 姜继韶², 郭慧敏², 李如剑³

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 了解果园土壤呼吸变化及其影响因素, 有利于深入理解退耕还果条件下黄土高原地区土壤碳源汇功能. 在长武农田生态系统国家野外站, 以盛产期果园 (2000 年建成) 为对象, 利用土壤碳通量测量系统 (Li-COR, Lincoln, NE, USA) 于 2011、2012 年监测了果树冠幅下距树干不同距离处土壤呼吸、土壤水分和温度变化, 分析了土壤呼吸的时空变化及其影响因素. 结果表明: ① 土壤呼吸速率随着距树干距离延长而降低. 与 2 m 处相比, 0.5 m 处土壤累积呼吸量 2011 年提高 20%, 2012 年提高 31%; 0.5 m 和 2 m 处土壤呼吸的温度敏感性 (Q_{10}) 2011 年相应依次为 1.79 和 1.56, 2012 年依次为 1.79 和 1.38. ② 距树干 2 m 处温度和水分稍高于 0.5 m 处, 但差异不显著 ($P > 0.05$). 土壤呼吸与土壤温度均呈显著的指数关系, 而与土壤水分的相关性不显著. 温度变化可解释土壤呼吸的季节性变化, 但不能解释距离树干不同处的差异. ③ 距离树干不同位置处的根系密度差异是影响果园土壤呼吸空间变化及其温度敏感性的重要生物因素; ④ 冠幅下土壤呼吸的变异系数为 23% ~ 31%. 估算果园土壤呼吸需考虑其距离树干的空間差异性.

关键词: 土壤呼吸; 土壤水分; 土壤温度; 根系生物量; 苹果园

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1915-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.05.040

Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors

WANG Rui¹, GUO Sheng-li^{1,2,3}, LIU Qing-fang¹, ZHANG Yan-jun³, JIANG Ji-shao², GUO Hui-min², LI Ru-jian³

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To evaluate the orchard variability of soil respiration and the response of soil respiration to its influencing factors is helpful for a deep understanding about the effects of converting cropland to apple orchard. A field experiment was conducted in the Changwu State Key Agro-Ecological Station. Soil respiration, soil temperature, soil moisture and roots biomasses were periodically measured in a mature apple orchard during 2011 and 2012. Soil respiration decreased as the distance from the trunk increased. The cumulative soil respiration in the 0.5 m-distance from the trunk was 20% and 31% higher than that in the 2 m-distance from the trunk, respectively in 2011 and 2012. The temperature sensitivity of soil respiration (Q_{10}) was relatively lower in the 2 m-distance than that in the 0.5 m-distance in both years. Soil temperature and soil moisture were slightly higher in the 2 m-distance, but there was no significant difference between the 2 m-distance and the 0.5 m-distance. Soil respiration and soil temperature showed a significant exponential relationship, but there was no positive correlation between soil moisture and soil respiration. Soil temperature changes can explain seasonal variation of soil respiration well, but it could not explain its spatial variability. Root density was an important factor for the spatial variability of soil respiration and Q_{10} . Variation of soil respiration coefficient was 23% - 31%. Therefore, the distance from the trunk should be considered when estimating orchards soil respiration.

Key words: soil respiration; soil moisture; soil temperature; root biomass; apple orchard

土壤呼吸是调控陆地生态系统碳循环的重要生态过程. 在陆地生态系统中, 土壤呼吸速率微小变化也会对大气 CO_2 浓度造成显著影响^[1]. 因此, 准确了解土壤呼吸速率对预测大气 CO_2 浓度的变化至关重要^[2,3]. 然而, 受地形地貌、水文条件、土壤理化性状、土地利用方式、植被类型和土壤微生物组成等因素的影响, 土壤呼吸速率表现出显著的时空变异性^[4-6]. 忽视土壤呼吸的空间变异性, 可能过低或过高估计生态系统土壤 CO_2 通量^[7,8]. 了解

土壤呼吸的时空变异性有助于准确估计生态系统, 特别是对自然条件异质性较大的生态系统的土壤呼吸和陆地生态系统碳循环.

水热是影响土壤呼吸的重要环境因素. 在森林生态系统中, 树木地上部的高度、冠层的分布形式、

收稿日期: 2013-09-10; 修订日期: 2013-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41071338); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050504)

作者简介: 王蕊 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳循环及生态环境, E-mail: chanyu981995182@163.com

* 通讯联系人, E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

覆盖度都会显著影响局域的小气候^[9]、土壤水分^[10]、养分分布^[11]、微生物的生境^[12]等其它特性. 土壤呼吸的空间变异性与细根的空间分布密切相关, 根系生物量与土壤呼吸速率呈显著正相关关系^[13]. 此外, 根系会通过分泌物和土壤理化性状改变来影响土壤微生物呼吸^[14]. 与一年生作物相比, 人工种植园内植被高大且多年生长. 与天然林地相比, 人工种植园内植被一般按照一定的株距和行距分布, 因而植被根系、土壤水分、温度等会发生显著空间变异, 并进而影响土壤呼吸空间变异性^[15]. 在黄土高原地区, 种植果园既是当地居民脱贫致富的重要途径, 也是坡地治理水土流失的重要措施. 1980 年以来苹果树种植面积逐年增加, 至 2009 年, 黄土区苹果园面积已达到 100 多万 hm^2 . 目前, 对黄土区农田和林草土壤呼吸已有大量研究^[16,17]. 但果园土壤呼吸空间变异及其影响因素鲜有报道.

本研究选取黄土旱塬区典型盛果期果园, 针对距离树干不同位置处土壤呼吸季节变化, 探讨了土壤呼吸空间分布的时空变化, 并分析了土壤呼吸变化与土壤生物、非生物因素的关系.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于陕西省长武县(东经 $107^{\circ}40'$, 北纬 $35^{\circ}12'$), 紧邻中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(简称长武站), 属于典型的黄土高原沟壑区, 海拔 1 200 m, 属大陆季风气候. 1984 ~ 2012 年间年均降水量为 578 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 49% 左右, 年平均蒸发量为 1 565 mm. 年平均气温 9.4°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 3 029 $^{\circ}\text{C}$, 年日照时数为 2 230 h, 日照率为 51%, 年辐射总量为 484 $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$, 无霜期 171 d. 地带性土壤为黏壤质黑垆土, 母质为中壤质马兰黄土, 土层深厚, 土质疏松. 土壤肥力指标为: 有机碳 $6.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $0.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $37.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $3.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $129.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

试验地所在地的土地利用类型有农田、果园、荒草地、林地等. 塬面地势平坦, 过去一直是粮食作物的主要种植区; 从 1980 年开始, 部分塬面农田和梁坡荒草地先后改建为苹果园, 截至 2010 年底, 长武县苹果园面积已发展到 1.6 万 hm^2 , 年总产达到 24 万 t, 产值突破 8 亿元, 属国家认定的陕西省苹果原产地域保护区, 是全国苹果生产重点县和陕西

省优质苹果基地县.

1.2 试验设计

供试果园于 2000 年由塬面农田转化而来, 面积为 2 000 m^2 左右, 主要品种为红富士 (*Malus pumila* Mill.). 园内株行距均为 $2 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, 无灌溉; 每年 11 月施用基肥, 施肥量为氮肥 $100 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和磷肥 $375 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 次年 7 月追施氮肥 $100 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 人工挖沟撒施肥料后掩埋; 一般春秋两次修剪, 春季实施疏花疏果; 9 月底采摘果实, 多年平均产量为 $4\,000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

在果园内选取 3 棵长势良好、无病虫害果树, 以每棵树的主干为中心, 沿三等分圆半径方向取 0.5 m、2 m 两点(即在距离每棵果树主干 0.5 m、2 m 处各设有 3 个点), 每株果树 6 个监测点, 总计 18 个点(图 1). 在每个点位上安装外径 20 cm, 高 12 cm 的 PVC 管, PVC 管露出地面 2 cm, 用于测定土壤呼吸速率.

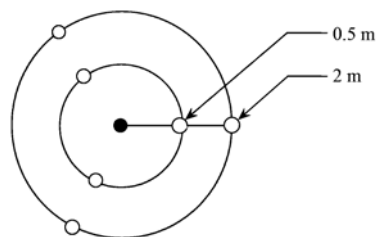


图 1 苹果园 PVC 管设置示意

Fig. 1 Diagrammatic representation of the location of the PVC collars where soil respiration was measured

1.3 土壤呼吸、水分、温度的测定及根系分布的调查

为了避免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.

2011 年 3 月 ~ 2012 年 11 月(除寒冷冬季的 12、1、2 月), 选择晴好天气在 09:00 ~ 11:00 进行土壤呼吸速率、土壤温度、土壤水分的测定. 大约每 10 d 测定 1 次. 两年试验期间土壤呼吸速率、温度以及水分共计测量 37 次, 其中 2011 年测量 17 次, 2012 年测量 20 次.

2013 年 7 ~ 9 月对 5 棵果树的根系分别进行了 3 次调查. 利用根钻 ($d = 9 \text{ cm}$), 以树干为中心, 每 120° 沿半径方向等间距设置采样点(即采样点分别

位于半径方向的 0.5 m 和 2 m 处), 钻取 0 ~ 20 cm 样品(重复 5 次), 利用游标卡尺将 $d < 2$ mm 的细根拣出, 冲洗, 80℃ 烘干至恒重, 计算细根生物量。

1.4 数据处理与统计分析

利用 Sigmpilot 软件制作相关的基础图件。采用 SAS(SAS 9.1, SAS Institute) 软件中非均衡数据方差分析(Proc GLM 程序包)分别进行 0.5 m 和 2 m 处土壤呼吸、土壤温度、土壤水分及细根生物量的方差分析, 用以比较不同冠幅下土壤呼吸、土壤温度、土壤水分和细根生物量之间的差异, 采用 T 检验的方法分析不同距离处土壤呼吸的温度敏感性^[18]。在评价环境因子对土壤呼吸的影响时, 利用指数关系模拟土壤呼吸与土壤温度的关系, 用一元二次方程模拟土壤呼吸与土壤水分的关系, 利用线性内插法推算不同年际间的累积土壤呼吸量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 以 $\text{CO}_2\text{-C}$ 计)^[19]。

2 结果与分析

2.1 距离树干不同位置处土壤温度、水分的变化

试验区所在地全年降水波动大且分布不均, 主要集中在雨季(7 ~ 9 月), 而这一时期恰逢该地区的高温期, 即雨热同期(图 2)。土壤温度随季节性气温变化, 呈现明显的季节变异性, 0.5 m、2 m 处的土壤温度动态趋势相似[图 3(b) 和图 4(b)]: 春季随着气温逐渐回升, 地表 5 cm 处温度逐渐增加, 到夏季达到最大值, 秋季随气温下降而逐渐降低。2011 年地表 5 cm 处温度最高达 24.3℃, 最低至 2.3℃, 均值为 14.0℃; 2012 年变化范围为 24.7 ~ 2.77℃, 均值为 16.3℃。0.5 m 处、2 m 处的土壤温度略有不同, 两年观测期内 2 m 处稍高于 0.5 m 处, 但均未达到显著性水平($P < 0.05$)。

与土壤温度变化不同, 受降水频率及降水量的影响, 表层(0 ~ 5 cm)土壤水分波动较为剧烈, 最低

值出现在雨季前(3 ~ 6 月), 雨季后(7 ~ 9 月)达最高值[图 3(c) 和图 4(c)]。0.5 m 处和 2 m 处的土壤水分有相似变化趋势但水分高低存在差异: 2011 年 2 m 处含水量(17%)稍高, 而 2012 年 0.5 m 处含水量(16%)高于 2 m 处(14%)。

2.2 距离树干不同位置处土壤呼吸速率的变化及其与温度的关系

0.5 m、2 m 处土壤呼吸速率呈相似的季节格局, 但呼吸速率存在一定的差异, 一般来说 0.5 m 处的土壤呼吸较大。春季(3 ~ 5 月)稍有波动地缓慢上升, 夏季(6 ~ 8 月)达到最高, 秋季(9 ~ 11 月)迅速下降, 与土壤温度的变化规律基本一致, 而与土壤水分的变化规律相关性较小[图 3(a) 和图 4(a)]。0.5 m 和 2 m 处土壤呼吸速率在不同物候期有所差别, 共出现两次呼吸峰值。5 月出现第一次呼吸峰, 2011 年 0.5 m 处为 $2.44 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 2 m 处为 $2.10 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 2012 年分别为 2.77

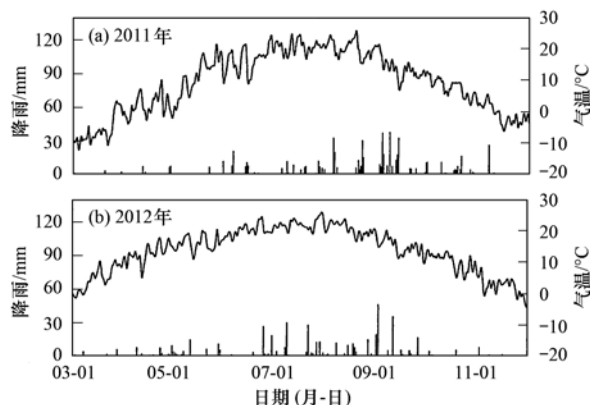


图2 试验地日降雨量和日平均气温

Fig. 2 Daily precipitation and mean daily temperature at study site

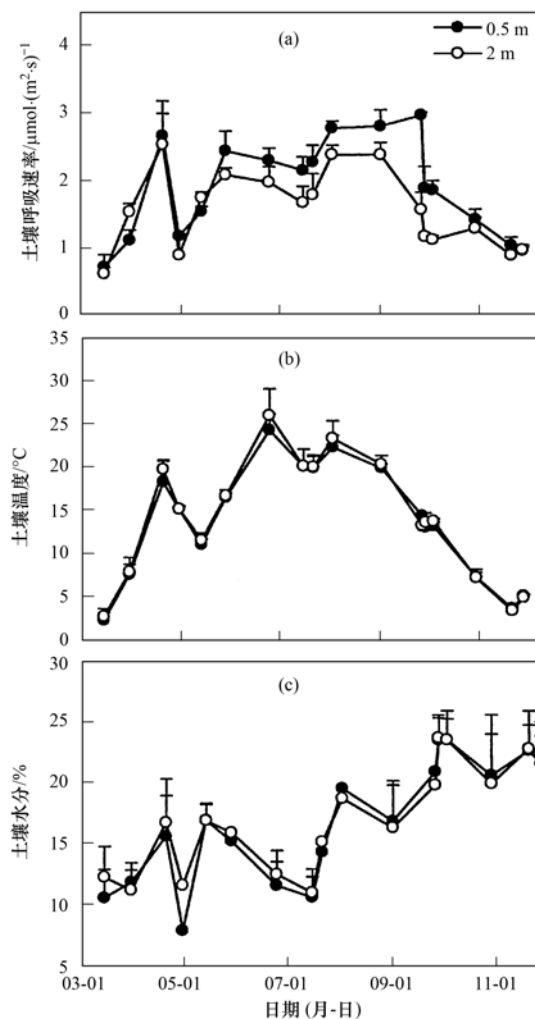


图3 2011年土壤呼吸及环境因子动态变化特征

Fig. 3 Dynamics of soil respiration and environmental factors in 2011

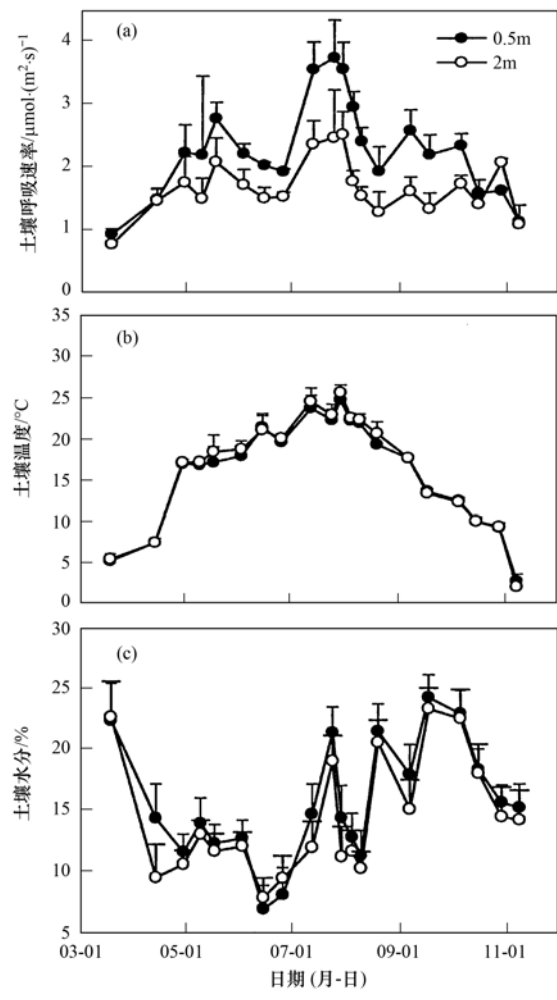


图4 2012年土壤呼吸及环境因子动态变化特征

Fig. 4 Dynamics of soil respiration and environmental factors in 2012

$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $2.08\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,相较于2 m处,0.5 m处土壤呼吸速率分别提高了16%和33%;夏末(7月底8月初之间)再次出现呼吸峰,2011年0.5 m和2 m处分别为 $2.78\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $2.38\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,2012年为 $3.74\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $2.46\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,0.5 m处比2 m处分别提高17%和53%.9月底土壤呼吸速率均迅速下降,但2 m处的土壤呼吸速率降低较快,此时0.5 m、2 m处土壤呼吸速率的差异程度逐渐变小.

2.3 距离树干不同位置处土壤CO₂累积量及温度的敏感性的变化

依据观测期内所测定的试验数据对土壤CO₂累积量进行估算,0.5 m处CO₂累积量显著高于2 m处CO₂累积量.2011年0.5 m、2 m处分别为 $545\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, $453\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,2012年为 $580\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, $444\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,两年分别提高20%和31%(表1).

对土壤呼吸与土壤温度的回归模拟发现,土壤呼吸与土壤温度之间存在很好的相关性(图5),距离树干不同位置处土壤呼吸速率土壤温度能解释土壤呼吸变化的42%~87%.数据结果分析表明距离树干不同位置处土壤呼吸对温度的敏感性也有所不同;土壤呼吸指数函数模型中系数 a 差异不显著,而温度敏感系数 b 差异显著, $Q_{10}(=e^{10b})$ 从0.5 m处的1.79下降到2 m处的1.56(2011)和1.38(2012)(表2).

表1 2011年、2012年土壤平均含水量,平均温度及累积呼吸量的变化¹⁾

Table 1 Mean soil moisture, mean soil temperature and cumulative respiration in 2011 and 2012

年份	距离/m	平均水分/%	平均温度/℃	累积呼吸(CO ₂ -C)/g·m ⁻²
2011	0.5	16.64±5.04a	13.87±6.67a	545±8.9a
	2	17.04±4.49a	14.19±6.99a	453±16.9b
2012	0.5	15.56±4.87a	16.16±6.39a	580±50.3a
	2	14.39±4.83a	16.48±6.71a	444±46.2b

1)表中数据表示方法为:Mean±standard error;小写字母为 $P<0.05$ 时距离树干0.5 m和2 m处差异显著性

表2 土壤呼吸与温度关系的统计分析¹⁾

Table 2 Statistical analysis of temperature relationship of soil respiration

年份	距离/m	a	b	R^2	t_a	t_b	Q_{10}
2011	0.5	0.781±0.053	0.058±0.004	0.64	0.024	4.115 *	1.79
	2	0.795±0.077	0.045±0.004	0.87			1.56
2012	0.5	0.840±0.116	0.058±0.008	0.71	-0.022	3.649 *	1.79
	2	0.843±0.211	0.032±0.006	0.42			1.38

1) *表示 $P<0.01$ 差异显著; a 和 b 是 $R_s=ae^{bT}$ 的模型参数, R_s 代表土壤呼吸, T 代表土壤温度. R^2 是决定系数, t_a 和 t_b 是 a 和 b 的 t 检验值

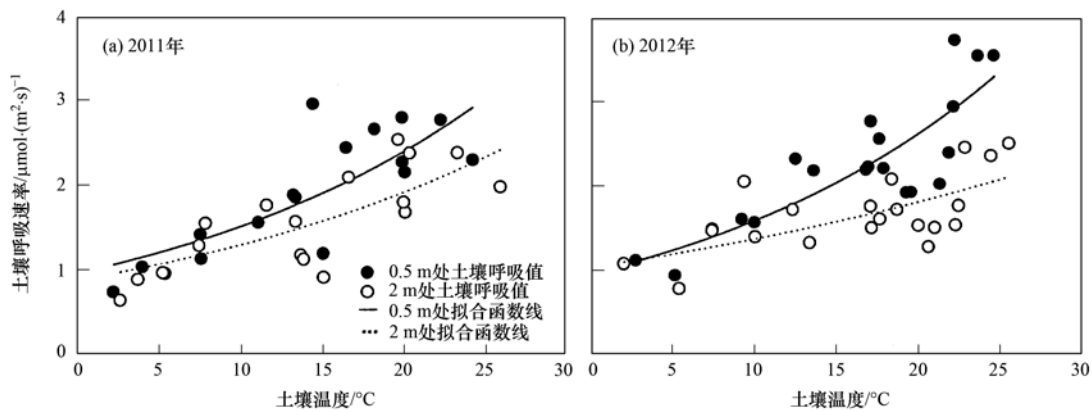


图5 土壤呼吸与土壤温度的关系

Fig. 5 Relationship between soil respiration and soil temperature

3 讨论

3.1 距离树干不同位置处土壤呼吸差异的生物和非生物因素

本研究结果显示,距离树干 0.5 m、2 m 处的土壤呼吸速率差异明显,较高的土壤呼吸速率通常出现在 0.5 m 处. 在以前的研究中,土壤呼吸作用在小尺度上的空间异质性在不同生态系统也得到类似的结论:对玉米农田土壤呼吸速率的研究发现,靠近植株处 > 株间 > 行间^[20]; 松树林中,靠近松树的土壤呼吸速率通常高于远离松树处^[21,22],人工桉树林中断线附近的地方大于行间土壤呼吸值^[23]. 究其原因可能与土壤温度^[24,25]、土壤水分含量^[13,26]、细根生物量等因素有关^[27].

土壤呼吸与土壤温度具有显著指数关系(图 5),表明土壤温度的变化很好地解释了土壤呼吸在时间尺度上的变异性,此结论与 Khomik 等^[28]对混交林的研究结果相似. 但本研究发现 2 m 处的土壤温度较 0.5 m 处稍高,而土壤水分的高低在两年观测期内相反,但两处的温度和水分均未达到显著性水平($P < 0.05$). 因此,本研究中土壤温度和水分对距离树干不同位置土壤呼吸的差异贡献不大. 这与前人的研究结果略有不同;闫美芳等^[15]发现新疆杨树人工林土壤呼吸的空间变化性与土壤温度关系密切^[29];而 Scott-Denton 等^[27]发现高海拔地区森林

土壤呼吸空间变化与水分有关而与温度相关性小.

虽然 0.5 m、2 m 处的土壤温度差异不显著,但均与土壤呼吸速率呈显著的指数关系,且土壤呼吸的温度敏感性呈现出 0.5 m > 2 m 的趋势(表 2),这种响应程度上的差异可能与土壤性质或覆盖条件有关^[30]. Boone 等^[31]的研究表明根系呼吸及根际微生物的温度敏感性比微生物呼吸更明显,根呼吸和根际微生物呼吸对土壤呼吸的大小具有重要贡献,因此 0.5 m 处的 Q_{10} 值大于 2 m 处 Q_{10} 值很可能与 0.5 m 处的细根系生物量显著高于 2 m 处细根生物量有关.

土壤呼吸主要包括根系呼吸和微生物呼吸^[32],而林木根系呼吸占土壤呼吸的 10% ~ 90%^[33],土壤呼吸随着根系生物量的增加而增加^[15]. 所以,测定位置和根系生物量的分布可能是导致土壤呼吸差异的主要因素. 为此,选取了 5 棵果树对其根系分别进行了 3 次调查,结果发现 0.5 m 处细根生物量明显高于 2 m 处(表 3).

此外,树间的干扰作用对土壤呼吸也有一定的影响. 如图 1 所示,以圆心点位置果树为例,0.5 m 和 2 m 处 6 个采样点中,除与果树行垂直的两点外,其余两个位置的 0.5 m 及 2 m 采样点可能会受到圆心点之外南北两株的影响. 以 2012 年数据为例,3 棵果树 0.5 m 处土壤呼吸平均变异系数为 14%、15% 和 15%,2 m 处分别为 16%、24% 和 20%. 这

表3 冠幅下根系生物量水平分布调查结果¹⁾

Table 3 Result of horizontal distribution of root biomass

项目	根系生物量/g					均值
	树 1	树 2	树 3	树 4	树 5	
0.5 m	1.14 ± 0.70a	0.96 ± 0.50a	2.17 ± 0.40a	0.25 ± 0.11a	0.31 ± 0.11a	0.97 ± 0.70a
2 m	0.07 ± 0.04b	0.16 ± 0.18b	0.37 ± 0.12b	0.15 ± 0.09a	0.28 ± 0.07 a	0.21 ± 0.11b

1) 表中数据表示方法为: mean ± standard error; 小写字母为 $P < 0.05$ 时距离树干 0.5 m 和 2 m 处差异显著性

种树间的干扰作用可能与温度、水分以及细根生物量等受影响程度有关,其具体机制有待进一步深入研究.

3.2 冠幅下土壤呼吸监测的方法选择

本研究表明,果园冠幅下土壤呼吸存在显著差异(表4).前人对林地土壤呼吸的变异性研究也得到类似结论,橡树林土壤呼吸的空间变异在28%~42%^[34];杨树林土壤呼吸的平均变异系数为37%^[35];而北方混交林土壤呼吸的空间变异在4%~74%之间^[28].若本研究中单独以0.5 m处的土

壤呼吸速率来估算2011年土壤呼吸量,那么土壤呼吸速率高估了7%,但若以2 m处土壤呼吸速率计算就低估了11%;而2012年出现的误差更大,以0.5 m处来计算会高出13%,以2 m处计算会低16%.由此可见,准确估算土壤呼吸就需要基于土壤呼吸空间变异性考虑样点的布设方法.很多研究并没有考虑到土壤呼吸空间变异性对土壤呼吸速率的影响,但果园中由于植株空间布局的规律性,应该考虑到植株的空间格局对土壤呼吸作用的影响.

表4 果树冠幅下土壤呼吸变异系数

Table 4 Coefficient of variation of soil respiration

项目	2011 变异系数/%				2012 变异系数/%			
	树1	树2	树3	均值	树1	树2	树3	均值
0.5 m 冠幅下	40	36	39	38 ± 2	30	39	36	35 ± 5
2 m 冠幅下	43	36	39	39 ± 4	30	38	27	32 ± 6
整棵冠幅下	31	26	23	27 ± 4	25	31	31	29 ± 4

4 结论

果园土壤呼吸速率随着距树干距离延长而降低.相对于距树干0.5 m处,2 m处土壤呼吸速率,土壤累积呼吸量及土壤呼吸的温度敏感性均有所下降.根系密度差异是影响果园土壤呼吸空间差异和温度敏感性的重要生物因素,而土壤温度的变化可解释土壤呼吸的季节性变化.果园冠幅下土壤呼吸存在显著差异,变异系数为23%~31%.准确估算果园土壤呼吸需考虑土壤呼吸空间变异性的影响.

致谢:感谢长武站对本研究的支持.

参考文献:

- [1] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: implications for climate change [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 1-6.
- [2] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**(1): 23-36.
- [3] Franzluebbers K, Franzluebbers A J, Jawson M D. Environmental controls on soil and whole-ecosystem respiration from a tallgrass prairie [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**(1): 254-262.
- [4] Borken W, Xu Y J, Davidson E A, *et al.* Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(12): 1205-1216.
- [5] Parfitt R L, Scott N A, Ross D J, *et al.* Land-use change effects on soil C and N transformations in soils of high N status: comparisons under indigenous forest, pasture and pine plantation [J]. *Biogeochemistry*, 2003, **66**(3): 203-221.
- [6] 陈书涛,刘巧辉,胡正华,等.不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1017-1025.
- [7] Kang S, Doh S, Lee D, *et al.* Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(10): 1427-1437.
- [8] Dilustro J J, Collins B, Duncan L, *et al.* Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, **204**(1): 87-97.
- [9] Von Arx G, Graf Pannatier E, Thimonier A, *et al.* Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: potential implications for seedling establishment in a changing climate [J]. *Journal of Ecology*, 2013, **101**(5): 1201-1213.
- [10] 杨文强,王艳萍,张青峰.黄土高原沟壑区苹果林冠截留特征[J]. *水土保持通报*, 2013, **33**(2): 93-96.
- [11] Aponte C, García L V, Marañón T. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, **309**: 36-46.
- [12] Prescott C E, Grayston S J. Tree species influence on microbial communities in litter and soil: Current knowledge and research needs [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, **309**: 19-27.
- [13] Saiz G, Byrne K A, Butterbach-Bahl K, *et al.* Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation Sitka spruce chronosequence in central Ireland [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(6): 1007-1020.
- [14] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(14): 1915-1925.
- [15] 闫美芳,张新时,周广胜.不同树龄杨树(*Populus balsamifera*)人工林的土壤呼吸空间异质性[J]. *生态学报*, 2010, **30**(13): 3449-3456.

- [16] 张芳, 郭胜利, 邹俊亮, 等. 长期施氮和水热条件对夏闲期土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3175-3180.
- [17] 周小刚, 张彦军, 南雅芳, 等. 黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1026-1033.
- [18] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, **413**(6856): 622-625.
- [19] Wilson H M, Al-Kaisi M M. Crop rotation and nitrogen fertilization effect on soil CO₂ emissions in central Iowa[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, **39**(3): 264-270.
- [20] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献[J]. 生态学报, 2006, **27**(12): 5254-5261.
- [21] Wiseman P E, Seiler J R. Soil CO₂ efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **192**(2-3): 297-311.
- [22] Pangle R E, Seiler J. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO₂ efflux rates in a 2-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation in the Virginia Piedmont[J]. *Environmental Pollution*, 2002, **116**(S1): S85-S96.
- [23] Epron D, Nouvellon Y, Rouspard O, *et al.* Spatial and temporal variations of soil respiration in a *Eucalyptus* plantation in Congo[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **202**(1-3): 149-160.
- [24] Mäkiranta P, Minkinen K, Hytönen J, *et al.* Factors causing temporal and spatial variation in heterotrophic and rhizospheric components of soil respiration in afforested organic soil croplands in Finland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(7): 1592-1600.
- [25] Luo J, Chen Y C, Wu Y H, *et al.* Temporal-spatial variation and controls of soil respiration in different primary succession stages on glacier forehead in Gongga Mountain, China[J]. *PloS One*, 2012, **7**(8): e42354.
- [26] Butler A, Meir P, Saiz G, *et al.* Annual variation in soil respiration and its component parts in two structurally contrasting woody savannas in Central Brazil[J]. *Plant and Soil*, 2012, **352**(1-2): 129-142.
- [27] Scott-Denton L E, Sparks K L, Monson R K. Spatial and temporal controls of soil respiration rate in a high-elevation, subalpine forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(4): 525-534.
- [28] Khomik M, Arain M A, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**(1-4): 244-256.
- [29] Yan M, Zhang X, Zhou G, *et al.* Temporal and spatial variation in soil respiration of poplar plantations at different developmental stages in Xinjiang, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, **75**(1): 51-57.
- [30] 刘艳, 陈书涛, 胡正华, 等. 模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4205-4211.
- [31] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. *Nature*, 1998, **396**(6711): 570-572.
- [32] Lavigne M B, Boutin R, Foster R J, *et al.* Soil respiration responses to temperature are controlled more by roots than by decomposition in balsam fir ecosystems[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, **33**(9): 1744-1753.
- [33] 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.
- [34] Hanson P J, Wullschlegel S D, Bohlman S A, *et al.* Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest[J]. *Tree Physiology*, 1993, **13**(1): 1-15.
- [35] Stoyan H, De-Polli H, Böhm S, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale[J]. *Plant and Soil*, 2000, **222**(1-2): 203-214.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-lu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 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