

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征 朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)

大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响 蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)

近3年太原市夏季降水的化学特征研究 郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)

太原市PM_{2.5}中有机碳和元素碳的污染特征 刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)

青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布 李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)

北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究 王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)

人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)

春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究 刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)

青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析 李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)

亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析 张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)

长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)

黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究 郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)

苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)

滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)

城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性 李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)

艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)

工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评估 臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)

山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评估 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)

UV协同ClO₂去除三氯生及其降解产物的研究 李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)

氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究 康英,段晋明,景传勇(523)

负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究 曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)

磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究 刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)

TiO₂@酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究 王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)

MnO₂/CFP复合电极的制备及电吸附Pb²⁺特性的研究 刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)

吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO₂催化剂 王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)

掺铁TiO₂纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究 项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)

天然矿物负载Fe/Co催化H₂O₂氧化降解阳离子红3R 马楠,刘华波,谢鑫源(576)

臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究 张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)

碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响 韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)

低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究 马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)

O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响 丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)

改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探 周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)

热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究 杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)

不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)

地表臭氧浓度升高对旱作农田N₂O排放的影响 吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)

亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究 刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)

川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)

黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响 张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)

汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)

土壤电动修复的电极空间构型优化研究 刘芳,付融冰,徐珍(678)

有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险 张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)

水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律 杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)

植物根系体外溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例 朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)

垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究 徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)

1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究 刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)

CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)

锯齿新米虾对Cu²⁺和毒死蜱毒性的生理响应 李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)

同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物 田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)

热水环境中Na⁺活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究 张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)

区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用 樊新刚,米文宝,马振宁(751)

《环境科学》征订启事(401) 《环境科学》征稿简则(437) 信息(489,522,726,735)

亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究

刘义凡, 陈书涛*, 胡正华, 沈小帅, 张旭

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要: 为研究亚热带次生林不同土壤呼吸组分对土壤呼吸的贡献率及土壤呼吸组分的温度敏感性, 于 2010-03-2014-02 进行了 4 a 的野外观测试验. 设置了 4 个随机区组, 每个区组设置断根和不断根处理, 在断根小区四周挖壕沟以防止根系进入断根小区. 采用 Li-8100 便携式土壤碳通量测定系统观测不同处理的土壤呼吸, 并同步观测土壤温度和土壤湿度. 结果表明, 不断根小区的土壤呼吸速率和断根小区的异养呼吸速率均具有明显的季节变异规律, 不断根小区的土壤呼吸速率量值极显著 ($P < 0.001$) 高于断根小区的异养呼吸速率量值. 4 a 观测期间不断根处理平均土壤呼吸速率为 $(2.59 \pm 0.48) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 而断根处理平均土壤呼吸速率为 $(1.74 \pm 0.28) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 不同年份观测的土壤呼吸速率的年平均之间无显著差异 ($P > 0.05$), 各年份异养呼吸速率的年平均之间亦无显著差异 ($P > 0.05$). 土壤呼吸中的异养组分与土壤呼吸之间的关系可用比例函数方程拟合, 异养呼吸占土壤呼吸的比例为 65.9%, 自养呼吸占土壤呼吸的比例为 34.1%, 异养呼吸是土壤呼吸的主要组成部分. 随着观测时间的延长, 异养呼吸占土壤呼吸的比例呈线性下降趋势. 异养呼吸速率和自养呼吸速率与土壤温度之间的关系均可用指数方程拟合, 异养呼吸的温度敏感系数 Q_{10} 值低于自养呼吸的 Q_{10} 值.

关键词: 次生林; 土壤呼吸; 异养呼吸; 自养呼吸; 温度敏感系数

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0644-08 DOI: 10.13227/j.hjck.2015.02.036

Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest

LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao*, HU Zheng-hua, SHEN Xiao-shuai, ZHANG Xu

(School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: A four-year field experiment was performed from March 2010 to February 2014 in order to investigate the contribution of different respiratory components to soil respiration and the temperature sensitivity of different respiratory components. Four blocks were arranged in field, and there were trenched and un-trenched plots in each block. Trenching, which can exclude roots, was performed around the trenched plots. A portable soil CO₂ fluxes system (Li-8100) was used to measure soil respiration rates. Soil temperature and soil moisture were simultaneously observed when measuring soil respiration rates. The results showed that the heterotrophic respiration rate in the trenched plots and the soil respiration rate in the un-trenched plots had the same seasonal pattern. Soil respiration rate in the un-trenched plots was significantly ($P < 0.001$) higher than that in the trenched plots. Mean soil respiration rates in un-trenched plots and mean heterotrophic respiration rate in trenched plots were (2.59 ± 0.48) and $(1.74 \pm 0.28) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, respectively. There was no significant ($P > 0.05$) difference in the mean soil respiration rate or mean heterotrophic respiration rate between measurement years. The relationship between heterotrophic respiration and soil respiration could be fitted with a proportion function. Heterotrophic and autotrophic respiration contributed 65.9% and 34.1% to the soil respiration, respectively. The main contributor to soil respiration was heterotrophic respiration. The relationship between the ratio of heterotrophic respiration to soil respiration and measurement date could be fitted with a linear function. An exponential function could be used to fit the relationship between heterotrophic respiration and soil temperature, and between autotrophic respiration and soil temperature. The temperature sensitivity coefficient (Q_{10}) for heterotrophic respiration was lower than that for autotrophic respiration.

Key words: secondary forest; soil respiration; heterotrophic respiration; autotrophic respiration; temperature sensitivity coefficient

全球变暖已引起了人们的广泛关注, 全球变暖主要与温室气体排放有关, CO₂ 是最主要的温室气体, CO₂ 在大气中的浓度与全球碳循环过程密切相关. 森林是陆地生态系统中最大的碳库, 森林生态系统的碳平衡将直接影响全球碳平衡^[1]. 土壤呼吸是森林生态系统碳通量中的重要组分, 在不考虑土壤动物活动、化学氧化等因素的条件下, 土壤总呼吸可较简化地划分为异养呼吸和自养呼吸组

分^[2, 3].

以往人们在土壤总呼吸组分的区分领域进行了大量研究, 例如: 张艳等^[4]的研究表明, 自养呼吸对

收稿日期: 2014-07-06; 修订日期: 2014-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41375006, 41175136); 江苏省“青蓝工程”项目

作者简介: 刘义凡(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统碳氮循环与气候变化, E-mail: lyf2008_love@163.com

* 通讯联系人, E-mail: chenstyf@aliyun.com

土壤总呼吸的贡献率为 54.3%, 略高于土壤异养呼吸的贡献率(45.7%); Epron 等^[5]认为, 自养呼吸在土壤总呼吸中占主导地位, 自养呼吸组分占土壤总呼吸的比例为 60%; Högberg 等^[6]的研究表明, 自养呼吸对土壤总呼吸的贡献率为 52% ~ 56%; 汪金松等^[7]报道, 油松人工林异养呼吸对土壤总呼吸的贡献率为 79.8%, 异养呼吸在土壤总呼吸中占主导地位. 然而, 从现有资料看, 人们大多针对土壤总呼吸的组分区分这一议题进行一年或一个生长季的研究^[8-13], 而关于多年长期连续观测的试验数据则非常鲜见. 土壤总呼吸中的不同组分在不同的年份可能呈现出不同的变异规律, 其变异可能受气象要素、植被因素的制约, 研究土壤呼吸组分的长期动态有助于从机制上阐明土壤碳循环的内在机制, 针对土壤呼吸的组分进行多年的长期定位观测对于了解在多年尺度上森林生态系统碳平衡具有重要意义.

本研究以北亚热带北缘的森林生态系统为对象, 进行了 4 a 的野外观测试验, 通过分析土壤呼吸中异养、自养组分比例和环境因子对土壤呼吸组分的影响, 以期研究森林生态系统碳循环研究提供

基础参考资料和理论支撑.

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

本研究地点位于南京市北郊的龙王山森林, 试验地坐标为 118°42'E、32°11'N, 海拔 69 m. 该地区位于北亚热带北缘, 气候类型为亚热带湿润季风气候, 具有四季分明、雨量充沛、气候温和的特点. 该地区多年平均气温为 15.5℃, 月最低气温(2.4℃)出现于 1 月, 月最高气温(27.8℃)出现于 7 月. 该试验地多年平均降水量 1 062.3 mm, 月最低降水量(24.4 mm)和月最高降水量(193.4 mm)分别出现于 12 月和 7 月. 在本试验阶段, 当地日降水量的动态变化如图 1 所示. 样地植被郁闭度为 0.9, 林冠层树种主要有白栎 (*Quercus fabri* L.)、化香 (*Platycarya strobilacea* L.)、构树 (*Broussonetia papyrifera* L.)、马尾松 (*Pinus massoniana* L.) 等植物, 草本层有苔草 (*Carex* spp. L.)、天门冬 (*Asparagus cochinchinensis* L.)、繁缕 (*Stellaria media* L.) 等植物. 样地植被生长季为 3 ~ 10 月.

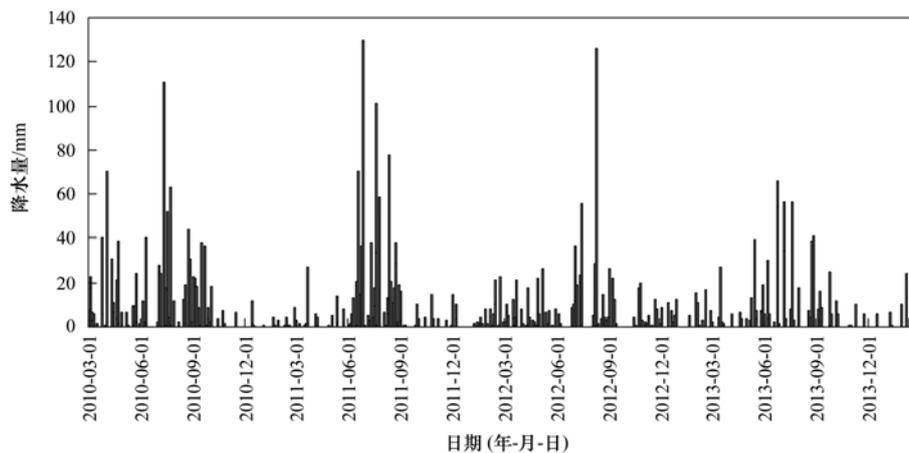


图 1 试验阶段(2010-03 ~ 2014-02)的日降水量

Fig. 1 Daily precipitation during the experimental period (from March 2010 to February 2014)

1.2 试验设计

采用随机区组试验研究样地土壤呼吸及异养呼吸. 在试验地设置 4 个区组(4 个重复), 每个区组中包含断根处理和不断根处理, 每个试验小区的面积为 1 m × 1 m. 于野外观测土壤呼吸 1 个月前进行断根处理, 断根时间为 2010 年 2 月, 植物根系经历了冬季后尚未开始生长, 此时断根效果较好. 另外, 断根后一个月后挖出断根小区土壤, 可见大部分根系已经死亡, 断根后一个月是小区内植物根系死亡的主要时间段. 在每个断根小区周围挖深度为 30

cm 的壕沟, 使小区外的植物根系不能进入到小区内^[14]. 该森林研究样地土层厚度为 40 ~ 60 cm, 土壤中根系的主要分布深度为 0 ~ 7 cm, 有研究表明, 在土层相对较浅的情况下沟深 30 cm 能较好地排除小区内的根系^[15, 16]. 将断根小区内的地上植物全部剪除, 并定期去除新生长出的植物, 以保证断根小区内测定的呼吸作用不包括植物的呼吸. 在不断根小区内, 仅去除测定土壤呼吸的底座内的植物. 在上述试验设计下, 不断根和断根小区内测定的呼吸作用分别为土壤呼吸和异养呼吸, 将土壤呼吸减异

养呼吸可得自养呼吸(即植物的根呼吸)。

1.3 土壤呼吸及环境因子测定

将直径 20 cm 的土壤呼吸底座(PVC 材质)预先埋入土壤中,采用 Li-8100 便携式土壤碳通量观测系统(Licor 公司,美国)测定不同小区的土壤呼吸速率。测定土壤呼吸的频率为每周测定一次。于每个采样日上午的 08:00 ~ 10:00 时间段内测定不同小区的呼吸速率。在每个底座上测定土壤呼吸的过程总计 3 min,土壤呼吸仪每秒钟记录一次土壤呼吸罩内的 CO_2 浓度,其时间间隔为 1 s,每轮总计 180 个观测值。土壤呼吸罩内的 CO_2 浓度随着时间的延长而逐渐增大,根据在不同时间点测定的土壤呼吸罩内的 CO_2 浓度与时间进行回归,可计算得到土壤呼吸速率的量值。在不断根小区测定的即为土壤呼吸,在断根小区测定的即为异养呼吸。在测定土壤呼吸的同时,采用 Li-8100 附属配置的温度、湿度探头测定 5 cm 深度的土壤温度、土壤湿度(体积含水量)。

1.4 统计分析

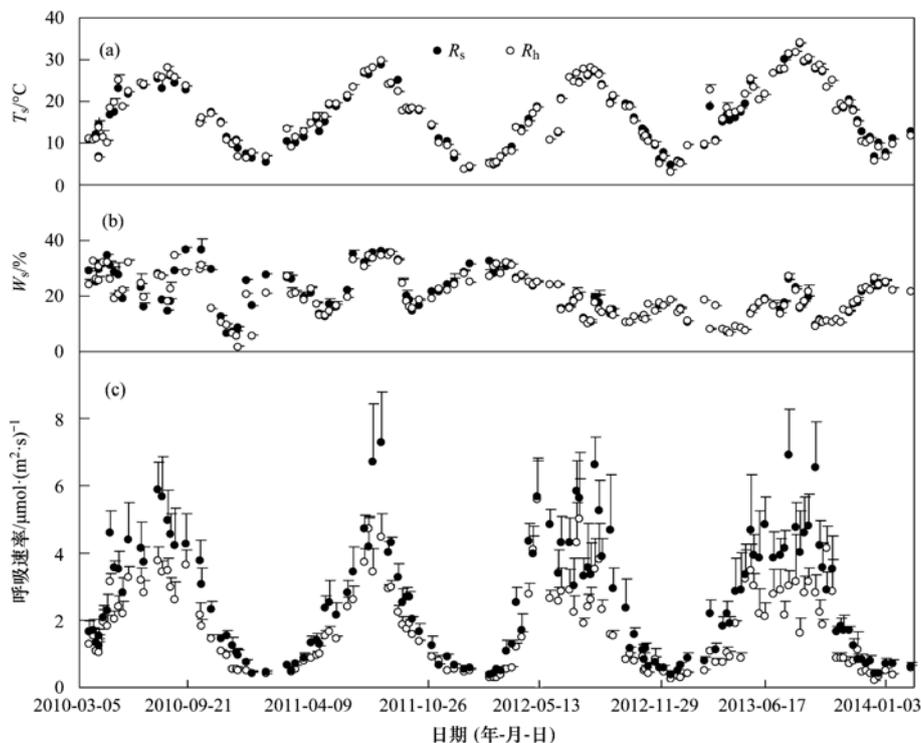
采用 EXCEL 2003 软件制作断根和不断根小区的土壤温度、土壤湿度、土壤呼吸速率的动态变化图,采用 SPSS 16.0 软件中的方差分析模块分析不同年份间土壤呼吸速率及异养呼吸速率的差异。采用 EXCEL 2003 软件得到异养呼吸速率与土壤呼吸

速率关系的线性回归方程,并制作异养呼吸占土壤呼吸的比例与日期的回归关系图,以及异养呼吸占土壤呼吸的比例与土壤温度、土壤湿度的回归关系图。采用 EXCEL 2003 软件分析土壤呼吸中异养组分和自养组分与土壤温度的回归关系。

2 结果与分析

2.1 土壤温度、土壤湿度、土壤呼吸速率的季节变异

2010-03 ~ 2014-02,土壤温度表现出明显的季节变异性,其变化趋势与当地气温一致,而土壤湿度与温度的变异规律不一致[图 2(a)、2(b)]。不断根小区对应的土壤温度的变异范围为 3.8 ~ 33.8 $^{\circ}\text{C}$,断根小区对应的土壤温度的变异范围为 3.1 ~ 34.0 $^{\circ}\text{C}$ [图 2(a)]。t 检验结果表明,不断根与断根小区的土壤温度无显著差异,两小区的土壤湿度亦无显著差异。不断根和断根小区的土壤湿度具有相同的季节变异规律,最高土壤湿度出现在 2010 年 8 月[图 2(b)]。如图 2(c)所示,土壤呼吸速率具有明显的季节变异规律,其变异与土壤温度的季节动态一致,呈现出从冬季到夏季逐渐升高的趋势。在不同年份,夏季出现土壤呼吸速率或异养呼吸速率峰值的时间点存在差异,2010、2011、2012、2013 年土壤呼吸速率峰值分别出现在 7 月、7 月、8 月、7 月,而



图中误差线为标准误差(SE)

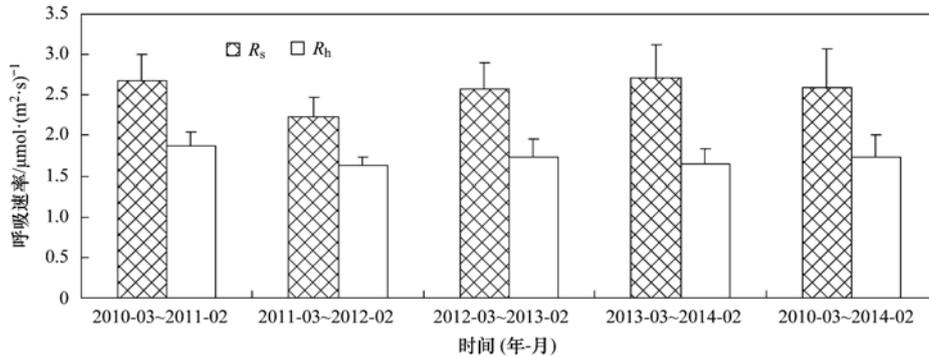
图 2 土壤温度(T_s)、土壤湿度(W_s)、土壤呼吸速率(R_s)及异养呼吸速率(R_h)的季节变化

Fig. 2 Seasonal variability in soil temperature (T_s), soil moisture (W_s), soil respiration (R_s) and heterotrophic respiration (R_h)

这 4 a 异养呼吸速率峰值分别出现在 7 月、7 月、7 月、9 月。在观测阶段内,不断根小区土壤呼吸速率的变异范围在 $0.37 \sim 7.32 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,而断根小区异养呼吸速率的变异范围为 $0.19 \sim 5.62 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,不断根小区的土壤呼吸速率量值明显高于断根小区的异养呼吸速率量值。

不同年份土壤呼吸速率及异养呼吸速率的年平均均值之间无显著差异 ($P > 0.05$),在 2010-03 ~ 2014-02 期间,平均土壤呼吸速率为 (2.59 ± 0.48)

$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,平均异养呼吸速率为 $(1.74 \pm 0.28) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,两者的差值为自养呼吸速率的量值,即 $(0.85 \pm 0.28) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (图 3)。2010-03 ~ 2011-02、2011-03 ~ 2012-02、2012-03 ~ 2013-02、2013-03 ~ 2014-02 期间平均土壤呼吸速率分别为 (2.67 ± 0.32) 、 (2.24 ± 0.24) 、 (2.58 ± 0.33) 、 $(2.71 \pm 0.40) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,同期平均异养呼吸速率分别为 (1.87 ± 0.17) 、 (1.63 ± 0.11) 、 (1.74 ± 0.22) 、 $(1.65 \pm 0.28) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 。



图中误差线为标准误差(SE)

图 3 不同年份土壤呼吸速率(R_s)及异养呼吸速率(R_h)的平均值

Fig. 3 Mean values of soil respiration (R_s) and heterotrophic respiration (R_h) in different years

2.2 土壤呼吸组分占土壤呼吸的比例

将土壤呼吸中的异养组分与土壤呼吸速率进行线性回归,两者之间的关系可用比例函数方程 $y = 0.659x$ (x 、 y 分别为土壤呼吸速率和异养呼吸速率)描述(图 4),土壤呼吸速率可以决定 81.5% 的异养呼吸速率的变异。根据图 4 中的比例函数可得,异养呼吸占土壤呼吸的比例为 65.9%,自养呼

吸占土壤呼吸的比例为 34.1%,异养呼吸是土壤呼吸的主要组成部分。

异养呼吸占土壤呼吸的比例在 30.5% ~ 99.1% 之间变异,大部分最高值出现在冬季,冬季自养呼吸作用较弱,异养呼吸与土壤呼吸非常接近;大部分最低值出现在夏季,此时处于植物的旺盛生长阶段,自养呼吸占土壤呼吸的比例相对较高(图 5)。自养呼吸占土壤呼吸的比例与日期之间的关系可用线性方程描述(图 5)。在 2010-03 ~ 2014-02 观测阶段内,异养呼吸占土壤呼吸的比例随观测日期

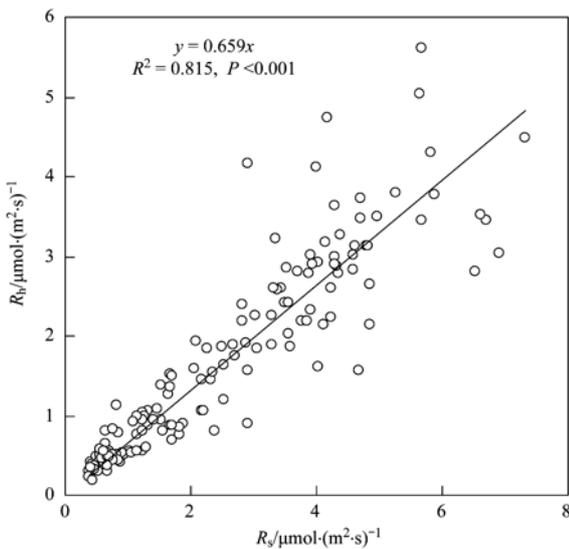


图 4 异养呼吸速率(R_h)与土壤呼吸速率(R_s)的关系

Fig. 4 Relationship between heterotrophic respiration (R_h) and soil respiration (R_s)

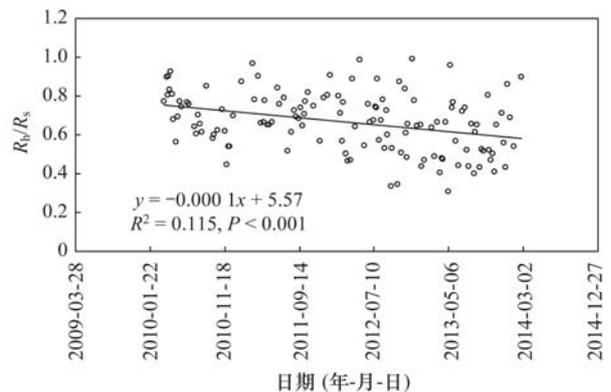


图 5 异养呼吸占土壤呼吸的比例(R_h/R_s)与日期的关系

Fig. 5 Relationship between the ratio of heterotrophic respiration to soil respiration (R_h/R_s) and date

而变化,随着观测时间的延长,异养呼吸占土壤呼吸的比例呈线性下降趋势(图5)。于2013-05测定的土壤有机碳结果表明,断根小区的有机碳含量为 $(50.3 \pm 3.9) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而不断根小区的有机碳含量为 $(65.5 \pm 2.1) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,前者比后者的有机碳含量

显著降低($P < 0.001$),断根造成了土壤有机碳的迅速流失,由此可能导致了异养呼吸占土壤呼吸比例的下降。进一步的分析表明,异养呼吸占土壤呼吸的比例与土壤温度的相关性不显著,但随着土壤湿度的增大而增大(图6)。

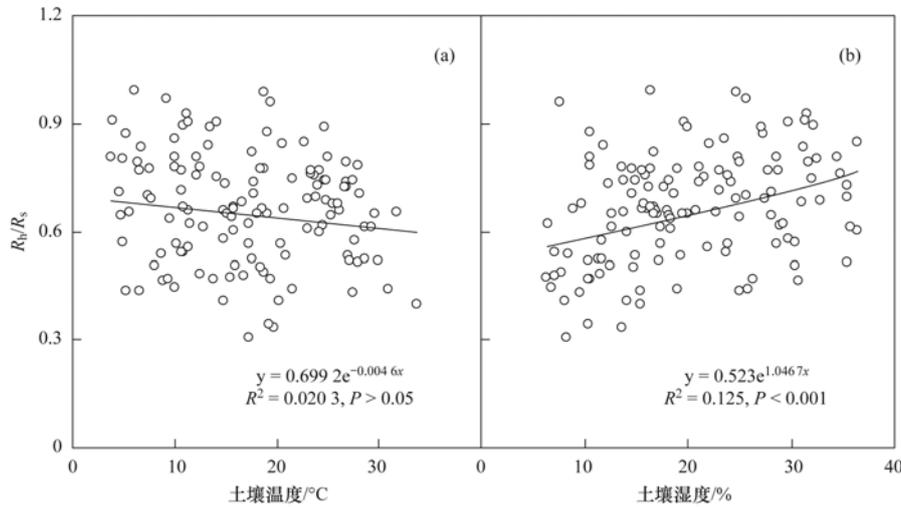


图6 异养呼吸占土壤呼吸的比例(R_h/R_s)与土壤温度或湿度的关系

Fig. 6 Relationship between the ratio of heterotrophic respiration to soil respiration (R_h/R_s) and soil temperature or moisture

2.3 土壤呼吸组分的温度敏感性

异养呼吸和自养呼吸组分的季节变异主要受土壤温度的影响,异养呼吸速率和自养呼吸速率均随土壤温度的升高而增大。异养呼吸速率和自养呼吸速率与温度之间的关系均可用指数方程拟合,4 a 观测期间,土壤温度可以解释 70.3% ($R^2 = 0.703$) 的异养呼吸速率的变异以及 52.7% ($R^2 = 0.527$) 的自养呼吸速率的变异(图7)。根据指数回归方程可计算得到异养呼吸和自养呼吸的温度敏感系数 Q_{10} 值(即温度每升高 10°C ,呼吸速率变为原来的倍数)分

别为 2.44 和 3.05,这表明在同等的增温范围内,自养呼吸比异养呼吸的升高速度更快。由图7还可看出,当土壤温度为零时,基础异养呼吸速率和基础自养呼吸速率分别为 $0.281 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $0.085 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,前者显著高于后者,这也进一步说明异养呼吸在土壤呼吸中占主导地位。

在不同年份,异养呼吸和自养呼吸的基础呼吸速率存在差异(图8、表1),2010-03~2011-02 基础异养呼吸速率在 4 a 中最高,为 $0.391 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; 2012-03~2013-02 基础自养呼吸

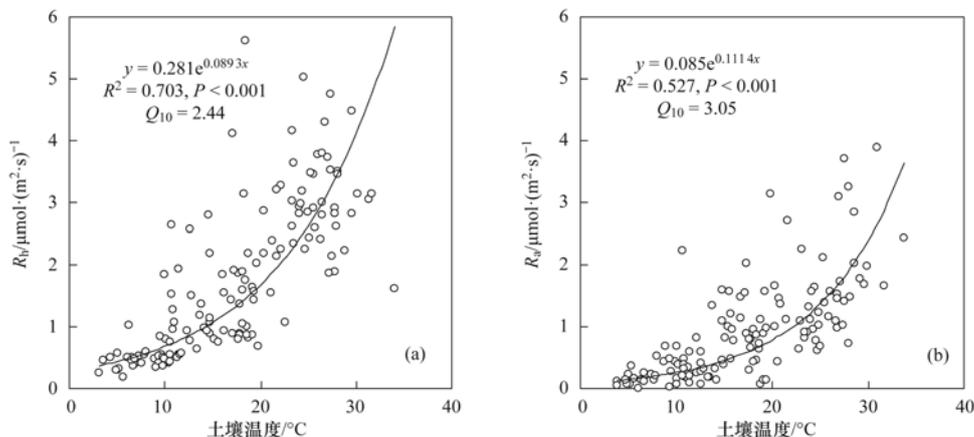


图7 4 a 期间异养呼吸速率(R_h)及自养呼吸速率(R_a)与土壤温度的关系

Fig. 7 Relationship between heterotrophic respiration (R_h) and soil temperature, and between autotrophic respiration (R_a) and soil temperature during the four years

速率在 4 a 中最高, 为 $0.108 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 异养呼吸和自养呼吸的 Q_{10} 值存在年际间差异. 2010-03 ~ 2011-02、2011-03 ~ 2012-02、2012-03 ~ 2013-02、2013-03 ~ 2014-02 期间异养呼吸的 Q_{10} 值分别为

2.35、2.85、2.64、2.50, 而同期自养呼吸的 Q_{10} 值分别为 2.94、4.33、2.68、2.80 (图 8、表 1). 2012-03 ~ 2013-02 期间, 异养呼吸和自养呼吸的 Q_{10} 值在 4 a 的观测期间最高.

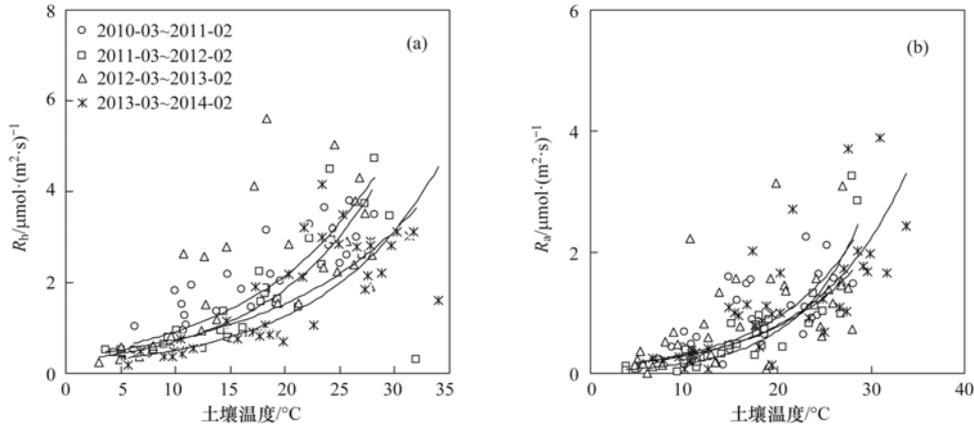


图 8 不同年份异养呼吸速率 (R_h) 及自养呼吸速率 (R_a) 与土壤温度的关系

Fig. 8 Relationship between heterotrophic respiration (R_h) and soil temperature, and between autotrophic respiration (R_a) and soil temperature in different years

表 1 不同年份异养呼吸速率及自养呼吸速率与温度的回归方程参数¹⁾

Table 1 Parameters for the relationship between heterotrophic respiration and soil temperature, and between autotrophic respiration and soil temperature during different measurement years

年份	R_h					R_a				
	a	b	R^2	P	Q_{10}	a	b	R^2	P	Q_{10}
2010-03 ~ 2011-02	0.391	0.0854	0.754	<0.001	2.35	0.106	0.107 8	0.592	<0.001	2.94
2011-03 ~ 2012-03	0.221	0.1049	0.943	<0.001	2.85	0.037	0.146 5	0.744	<0.001	4.33
2012-03 ~ 2013-04	0.267	0.0971	0.668	<0.001	2.64	0.108	0.098 4	0.346	<0.001	2.68
2013-03 ~ 2014-05	0.202	0.0916	0.764	<0.001	2.50	0.101	0.103 0	0.574	<0.001	2.80

1) 表中参数 a 、 b 为图 8 中指数回归方程 $y = ae^{bx}$ 的参数, 其中, x 、 y 分别代表温度和呼吸速率; R^2 为决定系数; P 值为回归显著性指标; $Q_{10} = e^{10b}$

3 讨论

3.1 异养呼吸对土壤呼吸的贡献

针对异养呼吸与自养呼吸对土壤呼吸的贡献率, 国内外学者进行了大量研究. Wang 等^[17] 通过大样本分析指出, 全球森林异养呼吸占土壤呼吸的比例在 10.3% ~ 94.0% 之间变异. 本研究中, 就 4a 观测期间的平均值而言, 异养呼吸占土壤呼吸的比例为 65.9%, 这一结果符合 Raich 等^[18] 对于异养呼吸占土壤呼吸比例为 70% 的假定. 本研究中, 4a 观测阶段内异养呼吸和自养呼吸对土壤呼吸的贡献率分别为 65.9% 和 34.1%. 这一研究结果与在我国不同森林生态系统中的观测结果非常接近, 例如: 颜学佳等^[19] 对兴安落叶松土壤呼吸组分的观测结果表明异养呼吸对土壤呼吸的贡献率为 63%, 自养呼吸对土壤呼吸的贡献率为 37%, 前者大大高于后

者; 卢华正等^[20] 在西双版纳热带季节雨林和橡胶林中测得自养呼吸的贡献率分别为 29% 和 42%; 王小国等^[21] 在四川人工桉木和柏木混交林中测得异养呼吸占土壤呼吸的百分比为 59%. 在我国大部分森林生态系统中测定的结果均表明异养呼吸对土壤呼吸的贡献率大于自养呼吸.

在本研究中, 断根 3a 后测定的土壤有机碳结果表明, 断根小区的有机碳含量高于不断根小区的有机碳含量, 当断根处理与不断根处理除了存在根系与否之外, 在土壤主要理化性质尤其是土壤呼吸底物方面也存在显著差异的时候, 此时计算得到两个处理之间土壤呼吸的差值可能会比实际值偏大, 然而, 由于异养呼吸中的主要贡献者为凋落物分解所释放出的 CO_2 ^[22], 因而土壤呼吸底物差异所造成的断根和不断根小区呼吸速率的相对变化可能会被部分抵消或缓冲.

3.2 不同土壤呼吸组分的影响因素

在本研究中观测到土壤呼吸的异养和自养组分具有不同的温度敏感性,异养呼吸和自养呼吸的 Q_{10} 值在分别为 2.44 和 3.05,自养组分具有更高的 Q_{10} 值,这一研究结果与以往大多数研究结果一致^[17, 20, 21, 23],但与 Bond-Lamberty 等^[16]的研究结果相反,其认为,高纬度土壤有机质中的难分解组分可能会对温度具有更高的响应度,这可能会导致异养呼吸比自养呼吸的 Q_{10} 值相对更高.实际上,在大多数情况下,自养呼吸的碳源直接来自光合作用固定的碳,光合作用固定的碳可通过树干向下传输,有研究表明,光合作用固定的碳转化为根呼吸的碳需要几天时间,并且白天根呼吸利用光合作用固定的碳的模式和夜间可能也存在差异^[24~26],在无外界环境因子胁迫的条件下,来自光合作用固定的碳更容易被根系自身的呼吸作用消耗^[27, 28].另外,在野外条件下观测得到的自养呼吸实际上包含了从冬季到夏季植物生长所导致的逐渐增加的呼吸量,因而自养呼吸对温度升高的响应程度会更高^[17, 29, 30].与以往研究相比,本研究不仅发现异养呼吸与自养呼吸的 Q_{10} 值存在差异,还发现不同年份测定的土壤呼吸 Q_{10} 值存在年际间差异(图 8),2012-03 ~ 2013-02 期间异养呼吸和自养呼吸的 Q_{10} 值非常接近,说明此期间两个土壤呼吸组分对温度的响应规律几乎是相同的.2011-03 ~ 2012-02 期间自养呼吸的 Q_{10} 值比异养呼吸高 1.48,其差异在 4 a 的观测期间是最高的.

本研究中,在 2010-03 ~ 2014-02 观测阶段内,异养呼吸占土壤呼吸的比例呈线性下降趋势(图 5).其主要的原因:不断根小区除了原有土壤有机质和凋落物分解释放出的 CO_2 ,还有死亡根系和根际分泌物分解所释放出的 CO_2 ,而断根小区没有了死亡根系和根际分泌物的碳输入,异养呼吸的碳源主要为原有土壤有机质和凋落物.由此可见,死亡根系和根际分泌物的碳输入对于异养呼吸而言具有重要作用,随着断根小区有机质的逐渐减少,异养呼吸占土壤呼吸的比例也逐渐降低.

本研究中,土壤呼吸的不同组分与土壤湿度的关系不明显,土壤湿度通常在干旱生态系统中或干旱胁迫时会表现出对自养及异养呼吸产生较强影响^[31~33],由于本研究中未出现持续干旱胁迫,因而土壤呼吸与土壤湿度的相关性不明显.值得注意的是,异养呼吸占土壤呼吸的比例随着土壤湿度的增大而增大(图 6).其可能的原因:自养呼吸取决

于根生物量的大小及活性,与土壤湿度的关系不明显,而异养呼吸的大小受干旱胁迫的制约,当土壤湿度增大时,异养呼吸量增大,且超过了土壤呼吸增大的幅度,继而造成了异养呼吸占土壤呼吸的比例增大. Wang 等^[17]的大样本分析结果也表明:在降水量较高(大于 1 000 mm)时自养呼吸与降水量之间无显著相关性,但在一个比较宽泛的范围内(无论降水量是否小于 1 000 mm),异养呼吸与降水量之间的关系均可用线性方程拟合.

4 结论

(1)不断根小区的异养呼吸速率和断根小区的土壤呼吸速率均具有明显的季节变异规律,不断根小区的土壤呼吸速率量值明显高于断根小区的异养呼吸速率量值.不同年份观测的土壤呼吸速率的年平均之间无显著差异,各年份异养呼吸速率的年平均之间亦无显著差异.

(2)土壤呼吸中的异养组分与土壤呼吸之间的关系可用比例函数方程拟合,异养呼吸占土壤呼吸的比例为 65.9%,自养呼吸占土壤呼吸的比例为 34.1%,异养呼吸是土壤呼吸的主要组成部分.

(3)随着观测时间的延长,异养呼吸占土壤呼吸的比例呈线性下降趋势.

(4)异养呼吸速率和自养呼吸速率与土壤温度之间的关系均可用指数方程拟合,异养呼吸的温度敏感系数 Q_{10} 值低于自养呼吸的 Q_{10} 值.

致谢:感谢南京信息工程大学的张寒、任景全在野外样品采集和分析中给予的帮助.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **73**(1): 3-27.
- [3] Kuzyakov Y. Sources of CO_2 efflux from soil and review of partitioning methods [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(3): 425-448.
- [4] 张艳,姜培坤,许开平,等. 集约经营雷竹林土壤呼吸年动态变化规律及其影响因素 [J]. *林业科学*, 2011, **47**(6): 17-22.
- [5] Epron D, Farque L, Lucot E, *et al.* Soil CO_2 efflux in a beech forest the contribution of root respiration [J]. *Annals of Forest Science*, 1999, **56**(4): 289-295.
- [6] Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, *et al.* Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration [J]. *Nature*, 2001, **411**(6839): 789-792.
- [7] 汪金松,范娟,赵秀海,等. 太岳山油松人工林土壤呼吸组

- 分及其影响因子[J]. 林业科学, 2013, **49**(2): 1-7.
- [8] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 115-146.
- [9] Subke J-A, Inglima I, Cotrufo M F, *et al.* Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: a meta-analytical review[J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(6): 921-943.
- [10] 田祥宇, 涂利华, 胡庭兴, 等. 华西雨屏区苦竹人工林土壤呼吸各组分特征及其温度敏感性[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(2): 293-300.
- [11] 张俊兴, 苏宏新, 刘海丰, 等. 3 种温带森林土壤呼吸季节动态及其驱动机制[J]. *内蒙古农业大学学报*, 2011, **32**(4): 160-167.
- [12] 刘智, 闫文德, 王光军, 等. 去根处理对樟树林土壤呼吸的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, **32**(5): 120-124.
- [13] Ferréa C, Zenone T, Comolli R, *et al.* Estimating heterotrophic and autotrophic soil respiration in a semi-natural forest of Lombardy, Italy[J]. *Pedobiologia*, 2012, **55**(6): 285-294.
- [14] 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): 1733-1753.
- [15] Mäkiranta P, Riutta T, Penttil T, *et al.* Dynamics of net ecosystem CO₂ exchange and heterotrophic soil respiration following clearfelling in a drained peatland forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150**(12): 1585-1596.
- [16] Bond-Lamberty B, Bronson D, Bladyka E, *et al.* Bond-A comparison of trenched plot techniques for partitioning soil respiration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(10): 2108-2114.
- [17] Wang W, Chen W L, Wang S P, *et al.* Forest soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components; Global patterns and responses to temperature and precipitation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(8): 1236-1244.
- [18] 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**(1): 81-99.
- [19] 颜学佳, 魏江生, 周梅, 等. 兴安落叶松林土壤呼吸及组分的变化特征[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(6): 948-954.
- [20] 卢华正, 沙丽清, 王君, 等. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸的季节变化[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(10): 2315-2322.
- [21] 王小国, 朱波, 高美荣, 等. 川中丘陵区人工桉柏混交林根呼吸对土壤总呼吸的贡献[J]. *山地学报*, 2009, **27**(3): 270-277.
- [22] Wang Q K, He T X, Wang S L, *et al.* Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, **178-179**: 152-160.
- [23] 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.
- [24] Comstedt D, Boström B, Ekblad A. Autotrophic and heterotrophic soil respiration in a Norway spruce forest: estimating the root decomposition and soil moisture effects in a trenching experiment [J]. *Biogeochemistry*, 2011, **104**(1-3): 121-132.
- [25] Han G X, Luo Y Q, Li D J, *et al.* Ecosystem photosynthesis regulates soil respiration on a diurnal scale with a short-term time lag in a coastal wetland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **68**: 85-94.
- [26] Yan W D, Xu W M, Chen X Y, *et al.* Soil CO₂ flux in different types of forests under a subtropical microclimatic environment [J]. *Pedosphere*, 2014, **24**(2): 243-250.
- [27] Zhou X h, Wan S Q, Luo Y Q. Source components and interannual, variability of soil CO₂ efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(4): 761-775.
- [28] Gaumont-Guay D, Black T A, Barr A G, *et al.* Biophysical controls on rhizospheric and heterotrophic components of soil respiration in a boreal black spruce stand [J]. *Tree Physiology*, 2008, **28**(2): 161-171.
- [29] Widén B, Majdi H. Soil CO₂ efflux and root respiration at three sites in a mixed pine and spruce forest: seasonal and diurnal variation [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, **31**(5): 786-796.
- [30] Jassal R S, Black T A, Nesci Z. Biophysical controls of soil CO₂ efflux in two coastal Douglas-fir stands at different temporal scales [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **153**: 134-143.
- [31] 谢薇, 陈书涛, 胡正华. 中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 334-340.
- [32] Baldocchi D D, Tang J W, Xu L K. How switches and lags in biophysical regulators affect spatial-temporal variation of soil respiration in an oak-grass savanna [J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2006, **111**, G02008, doi: 10.1029/2005JG000063.
- [33] Savage K E, Davidson E A. Interannual variation of soil respiration in two New England forests [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(2): 337-350.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行