

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析	钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)
基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素	高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM _{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析	陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析	张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势	徐虹, 唐迦, 肖致美, 高璟赞, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析	李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)
长江三角洲 2010 ~ 2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单	朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)
北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性	许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子	高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析	李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价	冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析	樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)
超低排放高湿度气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试	胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征	王坚, 黄压, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立	潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)
基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演	黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨垠晖, 杜晓晨 (3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例	刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为	赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱奔, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析	许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)
过氧化钙 (CaO ₂) 联合生物炭对河道底泥的修复	李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)
基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}$ -NO ₃ ⁻ , $\delta^{18}\text{O}$ -NO ₃ ⁻) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪	徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)
三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷	严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算	高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)
Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附	赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为	薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响	江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS	李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮	方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性	张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)
基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策	刘晓蕾, 李安婕 (3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响	刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能	戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝辉, 张瑞良, 何欣昱 (3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移	袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)
四环素胁迫对 <i>Shigella flexneri</i> 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程	高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择	乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响	侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用	宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率	罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响	方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响	邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N ₂ O 排放的影响	周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素	葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力	黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响	蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响	刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响	魏宾斌, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)
螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响	覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测	俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)
《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)	

改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响

邵康^{1,2}, 贡璐^{1,2*}, 何学敏^{1,2}, 陈文静^{1,2}, 张雪妮^{1,2}, 朱海强^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 探究外源性碳输入改变对森林土壤呼吸的影响是深入解析森林碳循环的基础。本研究基于植物残体添加和去除控制实验, 设置 5 种不同碳输入(对照组、双倍凋落物组、去根组、去凋落物组和去根去凋落物组)处理, 研究了天山雪岭云杉林(*Picea schrenkiana*) 生长季土壤呼吸对碳输入改变的短期响应。结果表明, 整个实验期间对照、双倍凋落物、去根、去凋和去根去凋处理土壤呼吸速率均值分别为 3.38、3.94、2.65、2.87 和 2.01 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$; 与对照处理相比, 双倍凋落物处理使累计土壤呼吸通量增加 402.65 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 去根、去凋和去根去凋处理分别减少了 515.00、354.73 和 967.15 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 减少幅度为去根去凋 > 去根 > 去凋。整个实验期间相对于对照组, 双倍凋落物处理下土壤呼吸速率平均增加 20.35%, 去凋、去根、去根去凋处理下土壤呼吸速率分别平均降低 14.40%、20.78% 和 40.83%。土壤矿质呼吸、凋落物呼吸和根系呼吸对土壤总呼吸的相对贡献率由大至小依次为: 土壤矿质呼吸(59.46%) > 根系呼吸(21.49%) > 凋落物呼吸(14.79%)。由主成分分析可知, 土壤呼吸速率的变化与土壤温度、土壤湿度、全磷、pH 值、土壤有机碳正相关, 与土壤容重负相关, 而全氮、碳氮比和土壤电导率对土壤呼吸速率影响不大。

关键词: 雪岭云杉; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤湿度; 碳输入

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3804-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202001091

Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of *Picea schrenkiana* Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang

SHAO Kang^{1,2}, GONG Lu^{1,2*}, HE Xue-min^{1,2}, CHEN Wen-jing^{1,2}, ZHANG Xue-ni^{1,2}, ZHU Hai-qiang^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecological Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

Abstract: The impact of exogenous carbon input changes on forest soil respiration provides the basis for an intensive analysis of the forest carbon cycle. Based on a plant residue addition and removal control experiment, this study investigated the short-term soil respiration response to carbon input changes of *Picea schrenkiana* on the Tianshan Mountains during their growing season with five different carbon input treatments: control, double litter, no root, no litter, and no input. The results revealed that, during the entire observation period, the cumulative soil respiration rates were 3.38, 3.94, 2.65, 2.87, and 2.01 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ in the double litter, control, no litter, no root, and no input treatments, respectively. Compared with the control treatment, the cumulative soil CO_2 efflux increased by 402.65 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ in the double litter treatment, whereas it decreased by 515.00, 354.73, and 967.15 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ in the no litter, no root, and no input treatments, respectively. The mineral soil respiration, litterfall respiration, and root respiration contributed 59.46%, 21.49%, and 14.79%, respectively, to the total soil respiration rate. PCA analysis revealed that the soil respiration rate was positively correlated with the soil temperature, soil moisture, soil total phosphorus content, pH, and soil organic carbon content, and negatively correlated with the soil bulk density, while the soil total nitrogen content, carbon nitrogen ratio, and soil electrical conductivity had no effect on the soil respiration rate.

Key words: *Picea schrenkiana*; soil respiration; soil temperature; soil moisture; carbon input

土壤呼吸是土壤碳循环的重要过程亦是大气 CO_2 的主要来源之一, 土壤呼吸产生的碳通量是陆地生态系统中仅次于光合作用的第二大碳通量, 其中森林土壤呼吸据估每年释放 68 Pg 的 CO_2 ^[1], 约占陆地生态系统土壤呼吸碳通量的 70%^[2]。森林土壤呼吸受森林土壤水热条件和碳输入调控, 其中凋落物和死根及根系分泌物是森林土壤碳输入的主要来源, 其输入的轻微波动都可能导致森林土壤呼吸发生变动^[3,4]。探讨外源性碳输入改变对森林土壤呼吸的影响是深入解析森林碳循环的基础, 有助于研究森林生态系统物质循环对全球气候变化的响应与反馈机制。

国内外学者对森林土壤呼吸展开了大量的研究, 对象范围分布广泛, 包括温带针叶林^[5]、温带落叶阔叶林^[6]、亚热带常绿阔叶林^[7]和热带雨林^[8]等不同森林生态系统, 研究内容聚焦土壤呼吸的日、季节和年动态变化规律, 探讨了土壤中的水、热等自然要素和人为干扰要素对土壤呼吸的影响。前期多以土壤呼吸及其影响因素的规律性研究为主, 缺乏基于控制实验的深入解析。在森林生态系统中, 通过植

收稿日期: 2020-01-10; 修订日期: 2020-02-26

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题项目 (2019D04001)

作者简介: 邵康(1988~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生态系统生态学, E-mail: shawangkang@126.com

* 通信作者, E-mail: gonglu721@163.com

物残体的添加和去除实验(detritus input and removal treatment, DIRT)可以较好模拟自然条件下复杂碳化合物的输入改变对土壤呼吸的影响。近年来,基于DIRT展开了一系列的工作并取得了有益的结论,实验结果因树种、区域环境和时间周期等呈现不同的规律。进一步开展不同森林生态系统改变碳输入下土壤呼吸的研究对全面揭示外源碳对森林土壤碳循环的影响有重要的科学意义,可为正确评估森林土壤的“源/汇”效应提供科学依据。

天山山脉是亚欧大陆腹地最大的山系,雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)是天山山脉最主要的地带性森林植被优势种,其约占新疆天然林面积的44.9%,以纯林形式构成了天山森林乃至新疆森林的主体^[9]。目前关于雪岭云杉林生态系统的研究主要集中在云杉的生理生态、种群和群落特征以及土壤碳氮分布规律等方面,而对森林土壤呼吸的研究比较缺乏,凋落物和根等植物残体输入的改变对土壤呼吸的影响尚不明确。

本文以新疆天山中段北坡的雪岭云杉林为研究对象,通过设置对照(control check, CK)、双倍凋落物(double litter, DL)、去根(no root, NR)、去凋(no litter, NL)和去根去凋(no input, NI)这5种处理方式,分析处理后短期土壤呼吸与土壤环境因子的变化特征,探讨改变碳输入下土壤呼吸与土壤环境因子的相关关系,旨在为全球变化背景下干旱区山地森林碳循环研究提供科学支撑和理论数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于天山北坡中山带,地处新疆乌鲁木齐地区乌鲁木齐县甘沟乡新疆南山天文台附近的雪岭云杉林区(43.47°N, 87.18°E),海拔约1 800 m。研究区属温带大陆性山地气候,夏季温暖多雨,冬季寒冷干燥;1月温度最低,7月温度最高,年均温约0~4℃,年均降水量176 mm,主要集中在6~9月,占年降水量的70%~80%。雪岭云杉林以纯林为主体,林下主要土壤类型为灰褐色森林土。

1.2 研究方法

1.2.1 实验样地的设置

于2017年9月在研究区坡向坡度相似、同一海拔、树龄相近的云杉林中,选取3个具有代表性的大小约50 m×50 m的样地,样地之间间隔大于100 m。每块样地设置5个1 m×1 m的样方,对应CK、DL、NR、NL和NI这5种不同处理方式,共计15个样方。CK:不采取任何处理;DL:双倍凋落物处理,为每月下旬将去凋落物处理上的尼龙网内的凋落物

均匀撒布在样方内;NR:采用切根法,在样方四周挖深度1 m壕沟,切根后插入尼龙网,以阻止根向样方内生长;NL:样方上用尼龙网收集凋落物,每月在土壤呼吸测量时清除一次样方内植被及凋落物;NI:采用去凋落物和去根处理混合实施。在每个样方中心位置布设1个内径为20 cm、高10 cm的土壤环,土壤环压入土中5 cm,实验期间土壤环位置保持不变。NL和NI处理样方内土壤环置于尼龙网下,防止凋落物进入。

1.2.2 土壤呼吸及土壤理化因子的测定

2018年5~10月于每月中旬利用Li-8100土壤呼吸测定仪(Li-8100, Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA)开展土壤呼吸(soil respiration, R_s)测定。选择2~3 d晴好天气进行测定,土壤呼吸测定时间为北京时间11:00~13:00,每个土壤环测定时间为2 min,重复3次。每次土壤呼吸测定前1 d,在不扰动样方内土壤和土壤环的前提下沿根部剪除植物。在测定土壤呼吸的同时在样方内土壤环四周随机选取3个点,采用土壤温湿度测试仪测定5~10 cm处土壤温度(soil temperature, T_s)和湿度(soil humidity, H_s),重复3次。为了减少早期去根处理后残根分解对土壤呼吸实验产生的干扰,土壤呼吸相对贡献率计算时排除5、6月的测量数据。测定完土壤呼吸后,采用五点四分法取样采集0~10 cm土样,部分样品装入铝盒,部分样品装入采样袋带回实验室自然风干,过筛保存,以供理化性质测定。

土壤理化性质测试的指标包括:土壤pH值、电导率(electric conductivity, EC)、容重(soil bulk density, ρ_b)、有机碳(soil organic carbon, SOC)、全氮(soil total nitrogen, TN)、全磷(soil total phosphorus, TP)和土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)。采用电位法测定pH;采用电极法测定EC;采用环刀法测定 ρ_b ;采用重铬酸钾氧化-外加热法测定SOC;采用半微量凯氏法测定TN;采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法测定TP和采用KCl浸提-靛酚蓝比色法测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。

1.2.3 数据统计分析

研究采用重复测量方差分析(repeat measured ANOVA)对不同处理下土壤温湿度和土壤呼吸速率的季节变化差异进行显著性检验;采用单因素方差分析(ANOVA)对不同处理间土壤温湿度和土壤呼吸差异速率进行显著性检验。采用Pearson相关线性回归模型描述各分室土壤呼吸之和与对照组土壤呼吸吻合度。利用主成分分析法(principal component analysis, PCA)分析了土壤呼吸速率与土壤理化指标间的相关关系。PCA排序中,土壤呼吸速率与理化指标间的相关性主要由指标箭头长短(箭头越长相

关性越大)和指标间箭头夹角的余弦值($<90^\circ$ 表示正相关; $>90^\circ$ 表示负相关; 90° 表示,不相关)决定.不同颜色的点代表不同碳输入处理.以上分析使用 Origin 2019 软件完成.

累计土壤呼吸(cumulative soil respiration flux, R)计算方法为:

$$R = 44 \times 10^{-6} \times 86\,400 \times \sum R_{Sx} \times D_x \quad (1)$$

以实测日土壤呼吸速率平均值作为该月土壤呼吸速率的平均值; R_{Sx} 为第 x 月平均土壤呼吸速率; D_x 为第 x 月天数,其余数值为单位换算系数^[10].

参照 Rey 等^[11]的研究方法,根据不同碳输入处理土壤呼吸速率间差值即可获得植物根系呼吸速率(respiration rate of plant root, R_R)、地表凋落物呼吸速率(respiration rate of litterfall, R_L)、土壤矿质呼吸速率(respiration rate of soil mineral, R_M)等各土壤分室呼吸速率,计算公式如下:

$$R_R = R_{CK} - R_{NR} \quad (2)$$

$$R_L = R_{CK} - R_{NL} \quad (3)$$

$$R_M = R_{NI} \quad (4)$$

各分室土壤呼吸的贡献率计算公式如下:

凋落物呼吸对土壤呼吸的贡献率 $= R_L / R_{CK} \times 100\%$

根呼吸对土壤呼吸的贡献率 $= R_R / R_{CK} \times 100\%$

矿质呼吸对土壤呼吸的贡献率 $= R_M / R_{CK} \times 100\%$

本文采用指数方程模型^[12]表示土壤呼吸速率与土壤温度的关系,计算公式如下:

$$R_s = ae^{bt} \quad (5)$$

式中, a 和 b 为参数, a 表示的是当温度等于 0°C 时

的 R_s , b 指温度反应系数, t 为所测的表层土壤温度.

土壤呼吸温度敏感系数(Q_{10})计算公式为:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (6)$$

2 结果与分析

2.1 不同碳输入处理下雪岭云杉林土壤温度和湿度的月动态变化规律

如图1所示,在CK、DL、NR、NL和NI这5种不同碳输入处理下,雪岭云杉林 T_s 均呈现5~7月升高,7~8月达到最高值,8~10月逐渐降低的单峰曲线;各处理 T_s 在不同月份的变化趋势大体一致,同一月份各处理间 T_s 没有显著性差异($P > 0.05$).CK、DL、NR、NL和NI这5种处理下 T_s 均值分别为 9.35 、 9.33 、 9.36 、 9.39 和 9.42°C ,表现为 $NI > NL > NR > CK > DL$.

5种碳输入处理下雪岭云杉林 H_s 在5~10月均呈现先减小后增大再减小的变化规律;各处理 H_s 在7月达到最大值,在10月达到最小值.CK、DL、NR、NL和NI这5种处理下 H_s 变化范围分别为 $44.52\% \sim 60.17\%$ 、 $46.66\% \sim 56.69\%$ 、 $43.29\% \sim 56.98\%$ 、 $42.05\% \sim 54.43\%$ 和 $42.85\% \sim 52.77\%$.在整个实验期,不同处理 H_s 由大到小分别为DL(53.56%) $>$ CK(52.99%) $>$ NR(49.93%) $>$ NL(49.82%) $>$ NI(47.77%).方差分析显示,除NI分别与CK和DL处理间差异性显著($P < 0.05$)外,其余处理两两之间差异均不显著($P > 0.05$).

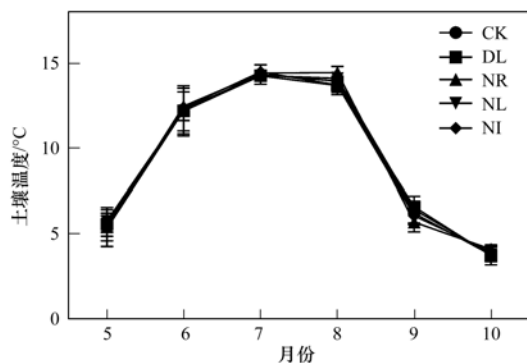


图1 不同碳输入处理下雪岭云杉林下土壤温度和湿度月动态变化

Fig. 1 Monthly dynamic changes of the temperature and moisture of *Picea schrenkiana* soil among different carbon inputs

2.2 不同碳输入处理对土壤呼吸速率的影响

不同碳输入处理下雪岭云杉林5~10月 R_s 的月动态变化如图2所示,5种不同碳输入处理 R_s 均呈现先升高后降低的变化规律.各处理下 R_s 均在7月出现最高值,在10月出现最低值.在整个处理期间,5种处理 R_s 表现为 $DL[3.94 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}] > CK[3.38 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}] > NL[2.87$

$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}] > NR[2.65 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}] > NI[2.01 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$.从方差分析结果看,DL处理 R_s 显著高于其他4种处理($P < 0.05$),NI处理则显著低于除NR处理以外的其他处理($P < 0.05$),CK和NR处理与NL处理之间差异均不显著($P > 0.05$).

CK、DL、NR、NL和NI处理在实验期间的 R 分

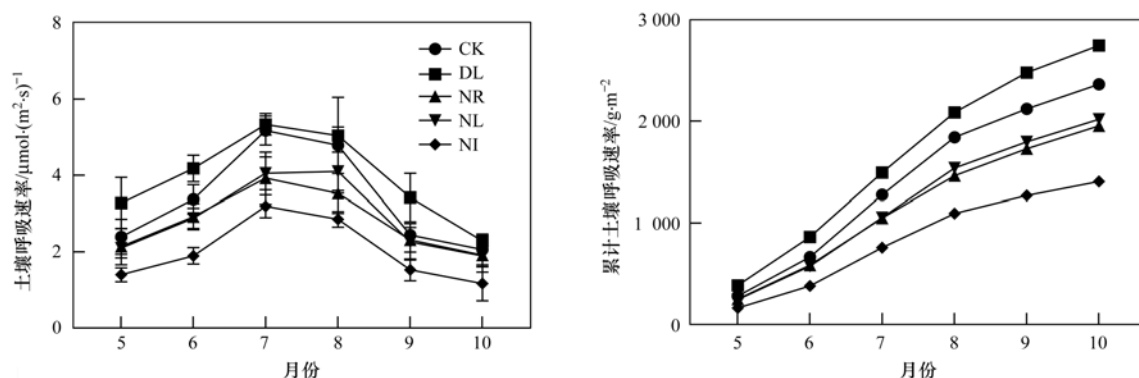


图2 不同碳输入雪岭云杉林下土壤呼吸速率的月动态变化及月累计土壤呼吸变化

Fig. 2 Monthly dynamic changes and cumulative soil CO_2 efflux of the respiration rate of *Picea Schrenkiana* soil among different carbon inputs

别为 2 386.45、2 789.11、1 871.45、2 031.73 和 1 419.30 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; 与 CK 处理相比, DL 处理使 R 增加 402.65 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, NR、NL 和 NI 处理分别减少了 515.00、354.73 和 967.15 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 减少幅度 $\text{NI} > \text{NR} > \text{NL}$. 表明在实验期内 DL 处理使 R 增加, 而实验期内其他处理使 R 减少.

2.3 改变碳输入处理后土壤呼吸速率的变化幅度

碳输入改变后雪岭云杉林 5~10 月 R_s 变化幅度如图 3 所示. 碳输入增加(DL)处理使 R_s 上升, 其中 9 月 R_s 上升幅度最为明显, 上升了 40.11%; 7 月上升幅度最低, 上升了 3.16%. 整个处理期间, DL 处理后 R_s 平均上升 20.35%, 整个生长季碳输入增加处理对雪岭云杉林 R_s 表现为显著的促进作用. 碳输入减少(NR、NL 和 NI)处理下 R_s 在 5~10 月均呈下降趋势, 3 种处理 R_s 降低幅度范围分别为 13.34%~26.36%、12.38%~17.84% 和 37.38%~43.68%. 整个实验期间 NR、NL 和 NI 处理平均降低 20.78%、14.40% 和 40.83%; NI 处理下 R_s 降低最为明显, 整个生长季碳输入减少处理对雪岭云杉林 R_s 表现为显著的抑制作用.

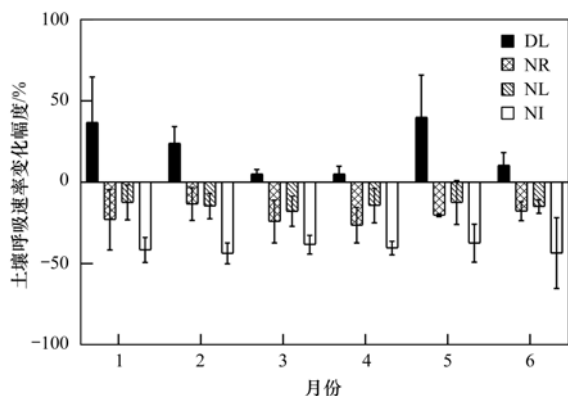


图3 改变碳输入后雪岭云杉林土壤呼吸速率变化幅度

Fig. 3 Range of the soil respiration rate with the change of carbon input in the *Picea schrenkiana* forest

2.4 土壤分室呼吸及其相对贡献率

如图 4 所示, 雪岭云杉林生长季(5~10 月) R_L 、

R_L 和 R_M 均呈先升高后降低的变化规律. R_L 与 R_M 在 7 月出现峰值, R_R 在 7 月和 8 月明显高于其他月份. 整个处理期间, R_M 、 R_R 和 R_L 均值分别为 2.01、0.50 和 0.73 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 矿质呼吸对土壤呼吸的相对贡献率明显高于植物根系和地表凋落物呼吸对土壤呼吸的相对贡献率, 其贡献率分别为 59.46%、14.79% 和 21.59%.

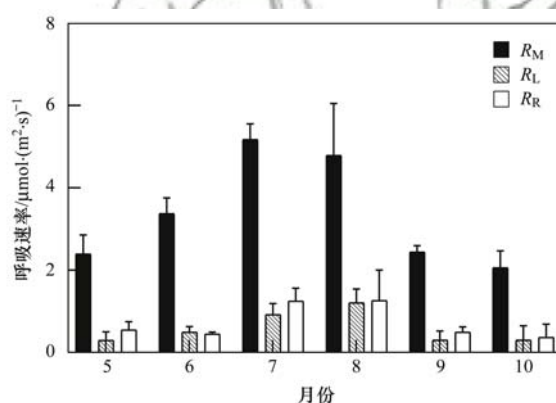


图4 土壤分室呼吸速率

Fig. 4 Soil respiration rate for different soil components

2.5 土壤呼吸速率与土壤理化因子及土壤理化因子之间的关系

图 5 为 R_s 与多种土壤理化因子关系的主成分分析(PCA)排序. 从 PCA 结果看, R_s 的变化主要在 PC1 轴体现. 进一步由箭头长度及夹角判断, R_s 变化与 T_s 、 H_s 、TP、pH、SOC 呈正相关, 与 ρ_b 呈负相关, 而 TN、C/N 和 EC 对 R_s 影响不大. 土壤理化指标间也有一定相关性, H_s 、 T_s 与 SOC、TP、pH 呈正相关, 与 ρ_b 呈负相关关系.

3 讨论

进一步分析 R_s 与其主要环境影响因子间的关系. T_s 能够解释 R_s 变异的 77%~81%. 不同碳输入处理并没有改变 R_s 与 T_s 相关关系, 不同碳输入处理 R_s 与 T_s 均呈极显著相关($P < 0.01$). 与 CK 相

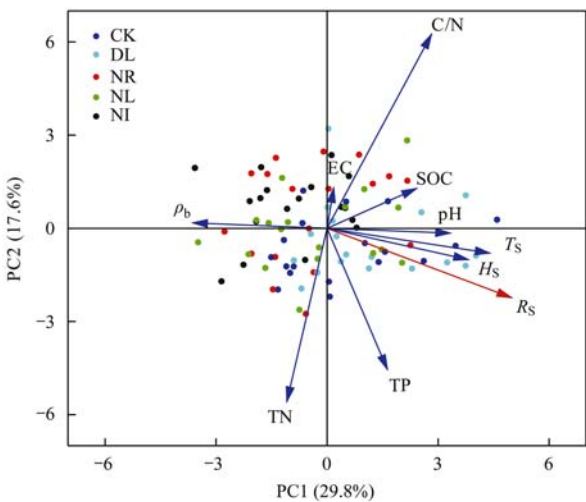


图5 土壤呼吸速率与土壤理化因子的PCA排序
Fig. 5 Principal component analysis biplots of the soil respiration rate and soil physicochemical factors

比,DL处理增加了土壤呼吸的温度敏感度,NR、NL和NI处理降低了 R_s 的温度敏感系数. CK、DL、NR、NL和NI这5种处理 Q_{10} 值分别为2.23、2.46、2.01、2.01和2.23(表1).

表1 不同碳输入土壤呼吸速率与土壤温度的关系模型及 Q_{10} 值
Table 1 Relationship model between the soil respiration rate and soil temperature under different carbon inputs and the Q_{10} value

处理	b	R^2	P	Q_{10}
CK	0.08	0.77	<0.01	2.23
DL	0.09	0.78	<0.01	2.46
NR	0.07	0.81	<0.01	2.01
NL	0.07	0.79	<0.01	2.01
NI	0.08	0.81	<0.01	2.23

3.1 碳输入改变对土壤呼吸的影响

凋落物对土壤呼吸的作用机制是一个复杂的土壤生化过程. 土壤呼吸的绝大部分底物来源于凋落物及其次级产物,凋落物的添加或去除会改变土壤有机碳的供应从而影响土壤呼吸^[13]. 相关研究表明碳输入改变对土壤呼吸的影响是显著的^[14],本实验整个观测期间,DL处理使 R_s 平均增加了20.35%,NR处理使 R_s 平均降低了14.40%;DL处理下 R_s 的增加幅度大于NL处理下 R_s 的降低幅度. 本实验研究结果表明碳输入的增加会显著促进土壤呼吸,而碳输入的减少会显著减小土壤呼吸,这与汪金松等^[15]对中国温带油松、Subke等^[16]对德国挪威云杉以及Sulzman等^[14]、Crow等^[17]和Lajtha等^[18]对美国温带松木、杉木针叶林凋落物控制实验的研究结果一致,但与Boone等^[19]的研究结果相反. 由于额外凋落物输入可能会刺激土壤微生物优先分解土壤现存有机质,添加凋落物所引起的土壤呼吸增加程度往往远大于去除凋落物所引起的土壤呼吸降低程

度,这主要与土壤碳的激发效应有关^[17]. 一般情况下碳输入增加,如添加凋落物产生的激发效应可使土壤呼吸增加7%~60%,不同的升高幅度可能与地上植被叶型、凋落物C/N等有一定关系;而碳输入减少导致土壤呼吸降低幅度可能与研究区地理位置、地上植被类型、实验持续时间和土壤呼吸测定时间不同有一定关系^[20].

根系是植物将光合产物直接输入到地下的唯一途径. 切断根系后,植物地上部分光合作用产物输入到地下减少将明显降低微生物的数量和活性^[21]. 本研究中NR和NI处理分别使 R_s 降低了20.78%和40.83%,且NI处理叠加效应大于NL和NR处理分别降低的幅度之和. 本实验研究结果与Sulzman等^[14]的研究工作所得结果相似,其通过DIRT实验发现,在北美温带杉木针叶林中土壤根系呼吸占土壤总呼吸的23%;朱凡等^[22]的研究表明,去除杉木根系使土壤呼吸年均降低30.4%,去除根系显著降低了土壤呼吸. 在热带林、亚热带林中,去除根系后土壤呼吸下降通常比本实验所得结果偏大,温带及寒温带森林土壤呼吸中的土壤根系呼吸所占比重远低于热带^[20].

土壤呼吸通常包括一个非生物过程和3个生物过程,其中一个非生物过程通常指土壤矿质呼吸,3个生物过程通常指植物根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸^[23]. 本研究结果表明在观测期内, R_m 大于 R_L 和 R_R ,也大于两者之和, R_m 在土壤呼吸中起主要作用,这与褚金翔等^[24]的研究结果一致. 杉树林生长的灰褐色森林土富含有机质,腐殖土本身有机物土壤矿质呼吸产生的 CO_2 远大于外来碳输入土壤呼吸产生的 CO_2 量.

3.2 土壤温湿度对土壤呼吸的影响

土壤温度对土壤呼吸的影响主要是通过控制土壤微生物活性及根系生长,进而影响土壤呼吸^[15]. 本研究结果显示,5种凋落物处理下的 R_s 与 T_s 之间都具有显著相关性($P<0.05$),说明 T_s 是影响雪岭云杉林 R_s 的主要因素之一,这与已有的研究结果一致^[12,25]. Q_{10} 值通常表征土壤呼吸对温度变化响应的敏感程度,高温条件下会出现低 Q_{10} 值而低温条件下会出现高 Q_{10} 值^[26]. 本研究中DL处理的 Q_{10} 值(2.46)高于CK处理的 Q_{10} 值(2.23),说明加倍凋落物处理升高了土壤呼吸速率的温度敏感性;NR、NL和NI处理的 Q_{10} 值分别为2.01、2.01和2.23,均显著低于CK处理($P<0.05$),表明上述处理使土壤呼吸的温度敏感性降低,处理后土壤呼吸对温度变化抵御能力减弱,这与王光军等^[27~29]的研究结果一致.

在本实验中,不同碳输入处理 R_s 与 H_s 之间的相关性较小,这与王光军等^[27~29]在杉木林的研究结果一致. 由于研究样地位于山谷腹地,不同碳输入处理下土壤含水量本身相对干旱荒漠地区较大,变化范围较小,并不是土壤呼吸速率的主要限制因子.

3.3 其他土壤理化因子对土壤呼吸的影响

除土壤温湿度外,其他土壤理化因子亦对土壤呼吸起到一定影响. 本研究结果显示, R_s 与 SOC、TP、pH 和 ρ_b 相关关系为极显著 ($P < 0.01$). 适宜的土壤 pH 对土壤微生物生长发育有利,可通过促进微生物活动进而促进土壤 CO_2 排放^[30]. 本研究中 R_s 和土壤 pH 呈正相关,证实了这一点,并且与赵吉霞等^[31]的研究结果一致. 碳是影响植物根系和土壤微生物代谢活动的主要成分,磷可以提高土壤微生物利用土壤碳的能力. 本研究中 R_s 与 SOC 和 TP 呈正相关,这与 Jassal 等^[32]得出的土壤呼吸与碳、磷含量呈正相关的结论一致. 本研究中 R_s 与 ρ_b 呈负相关, ρ_b 越高,土壤紧实度越高,土壤孔隙度越低,微生物获得氧气的几率越低. 由此一来, ρ_b 增加使土壤与大气间气体交换受阻,从而抑制了土壤微生物的呼吸作用^[33].

4 结论

(1) 整个实验期间 5 种处理土壤呼吸速率表现为: 双倍凋落物 > 对照 > 去凋 > 去根 > 去根去凋. 对照、双倍凋落物、去根、去凋和去根去凋处理下累计土壤呼吸通量与对照处理相比, 双倍凋落物处理使累计土壤呼吸通量增加, 去根、去凋和去根去凋处理使累计土壤呼吸通量减少, 降低的幅度表现为: 去根去凋 > 去根 > 去凋.

(2) 土壤矿质呼吸、凋落物呼吸和根系呼吸对土壤总呼吸的相对贡献率由大至小依次为: 土壤矿质呼吸 > 根系呼吸 > 凋落物呼吸.

(3) 由主成分分析可知, 土壤呼吸速率的变化与土壤温度、土壤湿度、全磷、pH、土壤有机碳呈正相关, 与土壤容重呈负相关, 而全氮、碳氮比和土壤电导率对土壤呼吸速率影响不大.

参考文献:

- [1] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. Functional Ecology, 1994, **8**(3): 315-323.
- [2] Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G, et al. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests[J]. Global Change Biology, 2001, **7**(3): 269-278.
- [3] 曹富强, 刘朝晖, 刘敏, 等. 森林凋落物及其分解过程的研究进展[J]. 广西农业科学, 2010, **41**(7): 693-697.
Cao F Q, Liu Z H, Liu M, et al. Research progress on the forest litterfall and its decomposition process[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2010, **41**(7): 693-697.
- [4] 尹华军, 张子良, 刘庆. 森林根系分泌物生态学研究: 问题与展望[J]. 植物生态学报, 2018, **42**(11): 1055-1070.
Yin H J, Zhang Z L, Liu Q. Root exudates and their ecological consequences in forest ecosystems: Problems and perspective[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, **42**(11): 1055-1070.
- [5] Shi Z, Li Y Q, Wang S J, et al. Accelerated soil CO_2 efflux after conversion from secondary oak forest to pine plantation in southeastern China[J]. Ecological Research, 2009, **24**(6): 1257-1265.
- [6] 高强, 马明睿, 韩华, 等. 去除和添加凋落物对木荷林土壤呼吸的短期影响[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(5): 1189-1197.
Gao Q, Ma M R, Han H, et al. Short-term effects of aboveground litter exclusion and addition on soil respiration in a *Schima superba* forest in Zhejiang Province, eastern China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(5): 1189-1197.
- [7] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China[J]. Global Change Biology, 2008, **14**(2): 403-412.
- [8] 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.
Lu H Z, Sha L Q, Wang J, et al. Seasonal variation of soil respiration and its components in tropical rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, **20**(10): 2315-2322.
- [9] 陈文静, 贡璐, 刘雨桐. 季节性雪被对天山雪岭云杉凋落叶分解和碳氮磷释放的影响[J]. 植物生态学报, 2018, **42**(4): 487-497.
Chen W J, Gong L, Liu Y T. Effects of seasonal snow cover on decomposition and carbon, nitrogen and phosphorus release of *Picea schrenkiana* leaf litter in Mt. Tianshan, Northwest China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, **42**(4): 487-497.
- [10] 向元彬, 黄从德, 胡庭兴, 等. 模拟氮沉降和降雨对华西屏区常绿阔叶林土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(16): 5227-5235.
Xiang Y B, Huang C D, Hu T X, et al. Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on soil respiration in an evergreen broad-leaved forest in the Rainy Area of western China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(16): 5227-5235.
- [11] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, et al. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy[J]. Global Change Biology, 2002, **8**(9): 851-866.
- [12] 张彦军. 凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3497-3506.
Zhang Y J. Variation in the temperature sensitivity of surface litter respiration and its influencing factors[J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3497-3506.
- [13] 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.
- [14] Sulzman E W, Brant J B, Bowden R D, et al. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO_2 efflux in an old growth coniferous forest[J]. Biogeochemistry, 2005, **73**(1): 231-256.
- [15] 汪金松, 赵秀海, 张春雨, 等. 改变 C 源输入对油松人工林土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(9): 2768-2777.

- Wang J S, Zhao X H, Zhang C Y, *et al.* Changes of carbon input influence soil respiration in a *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(9): 2768-2777.
- [16] Subke J A, Hahn V, Battipaglia G, *et al.* Feedback interactions between needle litter decomposition and rhizosphere activity[J]. *Oecologia*, 2004, **139**(4): 551-559.
- [17] Crow S E, Lajtha K, Bowden R D, *et al.* Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**(10): 2224-2232.
- [18] Lajtha K, Bowden R D, Nadelhoffer K. Litter and root manipulations provide insights into soil organic matter dynamics and stability[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, **78**(S1): S261-S269.
- [19] 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.
- [20] Lajtha K, Bowden R D, Crow S, *et al.* The detrital input and removal treatment (DIRT) network: Insights into soil carbon stabilization[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **640-641**: 1112-1120.
- [21] Yang S J, Du Z Y, Yu Y, *et al.* Effects of root pruning on physico-chemical characteristics and biological properties of winter *jujube* rhizosphere soil[J]. *Plant Soil Environment*, 2011, **57**(11): 493-498.
- [22] 朱凡, 王光军, 田大伦, 等. 杉木人工林去除根系土壤呼吸的季节变化及影响因子[J]. *生态学报*, 2010, **30**(9): 2499-2506.
- Zhu F, Wang G J, Tian D L, *et al.* Seasonal variation of soil respiration by root exclusion and its controlling factors in a *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(9): 2499-2506.
- [23] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. *The Botanical Review*, 1977, **43**(4): 449-528.
- [24] 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.
- Chu J X, Zhang X Q. Dynamic and fractionalization of soil respiration under three different land use/covers in the subalpine region of western Sichuan Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(6): 1693-1700.
- [25] 张智起, 张立旭, 徐炜, 等. 气候变暖背景下土壤呼吸研究的几个重要问题[J]. *草业学报*, 2019, **28**(9): 164-173.
- Zhang Z Q, Zhang L X, Xu W, *et al.* Several important issues of soil respiration under climate warming[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, **28**(9): 164-173.
- [26] Bååth E, Wallander H. Soil and rhizosphere microorganisms have the same Q_{10} for respiration in a model system [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(12): 1788-1791.
- [27] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响[J]. *植物生态学报*, 2009, **33**(4): 739-747.
- Wang G J, Tian D L, Yan W D, *et al.* Effects of aboveground litter exclusion and addition on soil respiration in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, **33**(4): 739-747.
- [28] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 马尾松林土壤呼吸对去除和添加凋落物处理的响应[J]. *林业科学*, 2009, **45**(1): 27-30.
- Wang G J, Tian D L, Yan W D, *et al.* Response of soil respirations to litterfall exclusion and addition in *Pinus massoniana* plantation in Hunan, China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, **45**(1): 27-30.
- [29] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 去除和添加凋落物对枫香 (*Liquidambar formosana*) 和樟树 (*Cinnamomum camphora*) 林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2009, **29**(2): 643-652.
- Wang G J, Tian D L, Yan W D, *et al.* Impact of litter addition and exclusion on soil respiration in a *Liquidambar formosana* forest and a nearby *Cinnamomum camphora* forest of central southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(2): 643-652.
- [30] 栾军伟, 向成华, 骆宗诗, 等. 森林土壤呼吸研究进展[J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(12): 2451-2456.
- Luan J W, Xiang C H, Luo Z S, *et al.* Research advances in forest soil respiration[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(12): 2451-2456.
- [31] 赵吉霞, 王邵军, 陈奇伯, 等. 滇中云南松林土壤呼吸季节动态及其影响因子研究[J]. *西北林学院学报*, 2015, **30**(3): 8-13, 20.
- Zhao J X, Wang S J, Chen Q B, *et al.* Soil Respiration and its affecting factors of *Pinus Yunnanensis* in the middle regions of Yunnan[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, **30**(3): 8-13, 20.
- [32] Jassal R S, Black T A, Roy R, *et al.* Effect of nitrogen fertilization on soil CH_4 and N_2O fluxes, and soil and bole respiration[J]. *Geoderma*, 2011, **162**(1-2): 182-186.
- [33] 孙艳, 王益权, 徐伟君, 等. 紧实胁迫对土壤呼吸强度及黄瓜生长和品质的影响[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(6): 1128-1134.
- Sun Y, Wang Y Q, Xu W J, *et al.* Effect of soil compaction on soil respiration intensity, plants growth and fruit quality of cucumber[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(6): 1128-1134.

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebirur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)