

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周嫻, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素

张彦军^{1,2}

(1. 宝鸡文理学院, 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013; 2. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 宝鸡 721013)

摘要: 地表凋落物呼吸是土壤呼吸的一个重要组成部分, 研究凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素对准确理解地区的土壤碳循环具有重要意义. 本研究在黄土高原南部的一个典型人工刺槐林内 (*Robinia pseudoacacia* L.), 通过地表凋落物控制试验 (对照处理, 去除凋落物处理、倍增凋落物处理), 研究凋落物呼吸温度敏感性的年际 (2009~2013年) 变化特征及其驱动因素. 凋落物呼吸温度敏感性的年际差异显著 ($P < 0.05$); 在对照处理下, 其最小值为 4.15, 最大值为 6.67, 均值为 5.10, 变异系数为 19%; 在倍增凋落物处理下, 其变化于 1.17~6.52 之间, 均值为 3.36, 变异系数高达 56%. 凋落物呼吸温度敏感性的年际变异与年平均土壤水分、地表凋落物量以及二者的交互作用密切相关 ($P < 0.01$), 同时对凋落物呼吸温度敏感性的贡献呈现出土壤水分大于地表凋落物量的趋势 (对照处理: 2.68 和 2.04; 倍增凋落物处理: 1.37 和 0.69). 此外, 地表凋落物倍增后, 凋落物呼吸温度敏感性却减少了 34% (3.36 和 5.10). 同时, 在对照处理下, 大约有超过 50% 的地表凋落物碳滞留在该刺槐林生态系统中 [$215 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $113 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], 但在倍增处理下, 仅有 24% 的地表凋落物碳滞留在该林地生态系统中 [$430 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $326 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], 即在该人工刺槐林生态系统中地表凋落物的增加未必意味着土壤有机碳储量的增加. 因此, 探究地表凋落物控制措施、土壤水分、地表凋落物量和凋落物呼吸温度敏感性之间的关系对准确理解地区的土壤碳循环具有重要意义.

关键词: 土壤水分; 土壤温度; 地表凋落物; 凋落物控制措施; 凋落物呼吸

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3497-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612097

Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors

ZHANG Yan-jun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China; 2. College of Geography and Environmental Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China)

Abstract: Surface litter respiration is a major component of soil respiration in the carbon cycle of terrestrial ecosystems, and studying the variation in the temperature sensitivity of surface litter respiration and its influencing factors is important for the accurate understanding of the regional soil carbon cycle. In a typical locust plantation (*Robinia pseudoacacia* L.) ecosystem in a small watershed in Wang Donggou of Loess Plateau, China, three surface litter control treatments were established: ① control treatment, ② litter removal treatment, and ③ doubled litter treatment, for studying the interannual variation (2009-2013) in the temperature sensitivity of surface litter respiration and its influencing factors. The interannual variability in the temperature sensitivity of surface litter respiration was statistically significant ($P < 0.05$). It ranged from 4.15 in 2012 to 6.67 in 2010, with mean value of 5.10 and a coefficient of variation of 19% in the control treatment, and from 1.77 to 6.52, with mean value of 3.36 and a coefficient of variation of 56% in the doubled litter treatment. It was closely related with annual surface litter biomass, annual mean soil moisture content, and the interplay between annual surface litter biomass and annual mean soil moisture content ($P < 0.01$). Moreover, the contribution to temperature sensitivity of surface litter respiration from soil moisture was greater than that from surface litter biomass (control treatment: 2.68 vs. 2.04, respectively; doubled litter treatment: 1.37 vs. 0.69, respectively). Additionally, under the doubled litter treatment, temperature sensitivity of surface litter respiration decreased by 34%. In the artificial locust plantation ecosystem, over 50% of surface litter carbon was kept under the control treatment [$215 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ vs. $113 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], but only 24% of surface litter carbon was kept under the doubled litter treatment [$430 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ vs. $326 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], which implied that the soil carbon reserves in the plantation ecosystem will not increase with an increase of surface litter biomass in the Loess Plateau, China. Therefore, investigating the relationships among soil moisture, surface litter biomass, and surface litter biomass control measures are useful for the accurate understanding of the regional soil carbon cycle.

Key words: soil moisture; soil temperature; surface litter biomass; surface litter control measures; surface litter respiration

收稿日期: 2016-12-12; 修订日期: 2017-03-18

基金项目: 宝鸡市科技计划项目 (16RKX1-14); 宝鸡文理学院博士科研启动费项目 (ZK2017041); 宝鸡文理学院重点项目 (ZK2017039, ZK2017040)

作者简介: 张彦军 (1985~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为陆地生态系统碳循环, E-mail: zhangyanjun@bjwlxy.cn

土壤呼吸是一个复杂的生态学过程,其主要包括根系呼吸、微生物呼吸以及地表凋落物呼吸^[1],且在全球尺度上,每年因地上和地下凋落物矿化和分解而释放到大气中的 CO_2 浓度占到总土壤呼吸的比例高达 70% 以上^[2]. 地表凋落物作为联系地上和地下部分的重要枢纽,在林地生态系统碳循环中起着重要作用^[3, 4],地表凋落物一方面可以通过腐殖化以土壤有机碳的形式存储在土壤中^[4],另一方面可以通过土壤微生物的矿化和分解以土壤呼吸的形式释放到大气中^[3]. 因此,地表凋落物呼吸的变化特征与土壤中的碳储量和气候变暖趋势(大气 CO_2 浓度增加)密切相关.

在林地生态系统中,地表凋落物呼吸是土壤呼吸的重要组成部分,而地表凋落物呼吸占土壤呼吸的比例大约为 10% ~ 40%^[2, 5~9],且这一比例在水热条件较好的热带和亚热带地区高达 30% 以上^[10~12],在水热条件适中的温带地区维持在 20% 左右^[8, 13, 14],在寒温带地区由于较低的大气/土壤温度而小于 10%^[5, 6]. 土壤微环境(土壤温度和水分)是影响凋落物呼吸的重要因素^[9, 15],且土壤温度和土壤水分对凋落物呼吸的影响分别利用指数和抛物线关系模型进行拟合^[9, 16, 17]. 有研究表明,凋落物呼吸温度敏感性变化于 1.29 ~ 10.6 之间^[7, 16, 18, 19],且凋落物呼吸温度敏感性的时空变异性与土壤温度^[18]、土壤水分^[20]等因素有关. 在旱地生态系统中,除了土壤温度和水分以外,降雨的剧烈波动性不可避免地影响到土壤水分的有效性,而土壤水分有效性将进一步影响归还到土壤中的地表凋落物量^[21, 22],而底物的数量也是影响凋落物呼吸温度敏感性变异的主要因素之一^[18]. 因此,笔者推测除了土壤温度和水分以外,降水导致的地表凋落物量变化也是影响凋落物呼吸温度敏感性的因素之一.

在林地生态系统中,针对土壤呼吸/土壤呼吸温度敏感性^[23~25]、根系和微生物呼吸/根系和微生物呼吸温度敏感性^[17, 18, 26]、甚至地表凋落物呼吸/地表凋落物呼吸贡献率^[6, 8, 9, 13, 16]的变化特征及其影响因素均有大量的研究. 虽然也有相关的研究探讨凋落物呼吸温度敏感性的变化特征^[7, 16~20],但是其内在的驱动机制仍然很匮乏. 基于此,本研究在黄土高原一个恢复了 30 年的典型人工刺槐林内,通过地表凋落物控制试验(对照处理、去除地表凋落物处理、倍增地表凋落物处理)利用 5 年连续的实测资料(土壤呼吸、土壤温度、土壤水分、地表凋落

物),研究凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素,以期气候变化条件下地区的土壤呼吸与气候反馈机制提供数据支撑和理论依据.

1 材料与方法

1.1 地点描述

王东沟小流域(35°13'N, 107°40'E; 海拔 1 095 m)位于陕西省长武县,为中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(长武农田生态试验站)所在地. 流域属于黄土高原南部典型高原沟壑区,其地貌类型由塬面、沟坡以及沟道三部分组成,且这三部分约各占土地面积的 1/3,沟壑密度为 2.78 条·km⁻². 塬面海拔 1 220 m,流域内从塬面到沟底的最大高差为 280 m. 塬面主要用于粮食的生产,而沟坡由于陡峭的地形以及不合理的人为活动极易遭受水土流失,其土壤侵蚀模数高达 50 [t·(hm²·a)⁻¹],而严重的水土流失已经极大地威胁到该地区的粮食安全、地表水质量,改变了地区的水文循环模式.

流域属半干旱湿润性季风气候. 1984 ~ 2011 年间年均降水量为 586 mm,其中最高年份为 954 mm,最低年份为 296 mm,6 ~ 8 月降水量占年总量的 60% 左右. 年平均气温 9.4℃,大于 10℃ 积温为 3 029℃,年日照时数为 2 230 h,日照率为 51%,年辐射总量为 484 kJ·cm⁻²,无霜期 171 d. 表层土壤(0 ~ 20 cm)有机碳 6.50 g·kg⁻¹,全氮 0.62 g·kg⁻¹,碱解氮 37.0 mg·kg⁻¹,速效磷 3.0 g·kg⁻¹,速效钾 129.3 mg·kg⁻¹,CaCO₃ 10.5%,pH 8.4,黏粒含量(<0.002 mm) 14%,田间持水量 22.4%,土壤凋萎含水量 9.0%^[14, 16].

1.2 植被描述

在黄土区,人工刺槐林(*Robinia pseudoacacia* L.)于 20 世纪 70 年代被广泛种植(种植密度为 1 213 株·hm⁻²),目的是为了遏制严重的水土流失和改善其恶劣的生态环境. 在该林地生态系统中(0.68 hm²),平均树高(H)约为(6.8 ± 1.6) m,胸径(DBH)为(6.4 ± 2.6) cm,植被覆盖度为 55%. 林下灌丛以茅莓(*Rubus parvifolius* L.)为主,其树高和覆盖度分别为(62.8 ± 11.8) cm 和 55%,林下草本植物以白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng)为主,其草高为(42.5 ± 11.9) cm,郁闭度为 75%^[14, 16].

1.3 试验设计

在 2008 年 3 月,于王东沟小流域内的典型沟坡系统上,随机选择生长相对均一的人工刺槐林为研

研究对象,试验设置了3种地表凋落物控制措施:对照处理、去除地表凋落物处理、倍增地表凋落物处理^[8, 16, 27],并于每个地表凋落物控制措施下建立5个1.5 m×1.5 m的永久试验小区。在对照处理中(LCK),地上部凋落物被允许正常地输入小区内部;在去除地表凋落物处理中(LR),地上部凋落物被网眼大小为1 mm²的尼龙网从小区中移除;而在倍增地表凋落物处理中(LA),人为定期(月初)地将从去除地表凋落物处理下收集的地表凋落物量均匀的撒在倍增地表凋落物处理下,其目的是实现该处理下的地表凋落物量翻倍。同时为了减少风对不同地表凋落物控制处理下调落物的保持尽可能不产生或者少产生影响,将试验小区放在林子的中间。

在整个试验期间(2009~2013),于林地上方布置了5个尼龙网(面积为1 m²;网眼大小为1 mm²)以此来收集地上部凋落物量。地表凋落物每季度收集一次,收集后的地表凋落物水洗后置于烘箱中在70℃的恒温下烘72 h,待地表凋落物质量保持恒重后称重 $[g \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}]$ ^[28]。

1.4 土壤呼吸、土壤温度和水分的测量

土壤呼吸的测定利用闭路式土壤碳通量系统,仪器型号为LI-8100(直径20 cm,LI-COR, Iacon, NE, USA)。为了避免PVC管安装过程中对土壤造成的扰动,继而引起短期土壤呼吸的剧烈波动。因此,在初次测定土壤呼吸前的24 h安装PVC管(直径20 cm,高12 cm),并使PVC管出露地表2 cm,安装好的PVC管永久留在试验小区内,直至试验结束。土壤呼吸测定前去除PVC管里面的一切可见的地上部动植物活体,每个PVC管上连续测定两次,两次测量之间的时间间隔为30 s,这两次土壤呼吸值之间的变异控制在15%之内。每个PVC管上的测量时间为150 s,其中包括30 s的前期预处理、30 s的后期预处理以及90 s的观测期。试验期间(2009-03~2013-11)每天在09:00~11:00之间进行土壤呼吸的测定,此时间段内的测定值可代表一天的平均值^[29, 30],平均大概每15 d测定一次。冬季(12月、1月和2月)由于气候寒冷,土壤温度和水分波动较小,植物和土壤中的微生物均处于休眠状态,因此冬季不进行土壤呼吸的测定。土壤呼吸在试验期间依次测量了13、12、15、19和13次。

在测定土壤呼吸的同时测定土壤温度(每个PVC管3次重复)和水分(每个PVC管4次重复),土壤温度和水分的测定在距离PVC管10 cm处进行。距地表5 cm处的土壤温度利用数字显示

温度计(仪器型号:JM624 测温仪;产地:中国;精度:±0.2 FS±0.1℃)测定,0~5 cm处的土壤水分利用便携式水分仪(仪器型号:ML3-HH2;产地:英国;精度:±1% vol)测定。土壤充水孔隙(soil water-filled pore space, WFPS)由下列方程计算获得:

$$WFPS(\%) = 100 \times [W_v / (2.65 - \rho_b) / 2.65] \quad (1)$$

式中, W_v 是体积含水量, ρ_b 是土壤容重,2.65是土壤颗粒密度。

1.5 数据分析

通过差减法计算凋落物呼吸:

对照下的凋落物呼吸 = 对照下的土壤呼吸 -

去除凋落物下的土壤呼吸

(2)

倍增凋落物下的凋落物呼吸 = 倍增凋落物下的土壤呼吸 - 去除凋落物下的土壤呼吸

(3)

利用差减法会导致个别观测日的凋落物呼吸出现负值(10%),可能由于土壤呼吸相比凋落物控制处理而言本身具有较高的变异性、或者地表凋落物对土壤呼吸的拟制作用、甚至是小区自身具有较大的空间异质性等原因所致^[9, 31]。

利用指数和 Q_{10} 关系模型拟合土壤温度对凋落物呼吸(去除负的凋落物呼吸)的影响^[9]:

$$F = \beta_0 e^{\beta_1 T} \quad (4)$$

$$Q_{10} = e^{10\beta_1} \quad (5)$$

式中, F $[\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$ 为凋落物呼吸, T (℃)为5 cm处的土壤温度, β_0 和 β_1 是拟合参数。

凋落物呼吸对土壤水分的响应机制十分复杂,这种复杂性表现在以下两个方面^[9, 16]:①一般而言凋落物呼吸在过高或者过低的土壤水分条件下均会受到不同程度的抑制,因此利用抛物线模型拟合土壤水分对凋落物呼吸的影响;②土壤水分对凋落物呼吸的影响很有可能混淆了土壤温度对其的影响。

$$F = \beta_2 W^2 + \beta_3 W + \beta_4 \quad (6)$$

式中, W 是0~5 cm处的土壤水分, β_2 、 β_3 和 β_4 是拟合系数。

土壤温度和土壤水分的交互作用能很好地拟合二者对凋落物呼吸的影响,因此利用双变量模型模拟凋落物呼吸对土壤温度和土壤水分的响应机制^[16]。

$$F = \beta_0 e^{\beta_5(TW) + \beta_6(TW)^2} \quad (7)$$

式中, β_5 和 β_6 是拟合系数。

利用线性内插法估算累积土壤呼吸/凋落物呼

吸,对于个别观测日出现负的地表凋落物呼吸在计算累积凋落物呼吸时该具体观测日的凋落物呼吸按照0计算^[9, 16]. 利用 SigmaPlot 10.0 软件的线性回归模型拟合年平均土壤水分和地表凋落物量对凋落物呼吸温度敏感性的影响.

地表凋落物量和年平均土壤水分对凋落物呼吸温度敏感性的交互影响由下列方程获得^[9]:

$$F = \beta_7 W + \beta_8 L + \beta_9 WL + \beta_{10} \quad (8)$$

式中, F 为凋落物呼吸温度敏感性, W 为年平均土壤水分, L 为地表凋落物量, β_7 、 β_8 、 β_9 和 β_{10} 是拟合系数.

为了单独量化年平均土壤水分和地表凋落物量对凋落物呼吸温度敏感性的贡献,在方程(8)的基础上通过方程(9)、(10)计算地表凋落物量和年平均土壤水分的标准化回归系数(β),地表凋落物量和年平均土壤水分 β 值的大小即可以反映出二者对凋落物呼吸温度敏感性贡献的大小^[9]:

$$\beta_{W'} = \beta_7 \times (W'/F') \quad (9)$$

$$\beta_{L'} = \beta_8 \times (L'/F') \quad (10)$$

式中, $\beta_{W'}$ 和 $\beta_{L'}$ 分别是年平均土壤水分和地表凋落物量的 β 值, W' 和 L' 分别是年平均土壤水分和地表凋落物量的标准偏差, F' 是拟合的凋落物呼吸温度敏感性的标准偏差.

2 结果与分析

2.1 不同凋落物处理下的土壤微气候差异

不同凋落物处理下的土壤温度具有相似的季节变化趋势,且这种变化趋势与大气温度的变化趋势基本一致,均呈现出夏季大于其它季节的趋势(图1). 此外,不同凋落物处理下的平均土壤温度呈现出倍增凋落物处理>对照处理>去除凋落物处理的趋势(14.92℃、14.76℃和14.27℃),但各处理间的差异没有达到统计显著水平($P>0.05$).

不同凋落物处理下的土壤水分具有相似的季节变化趋势,且这种变化趋势与降雨的不均匀分布密切相关(图1). 此外,不同凋落物处理下的平均土壤水分差异显著($P<0.05$),且呈现出去除凋落物处理>

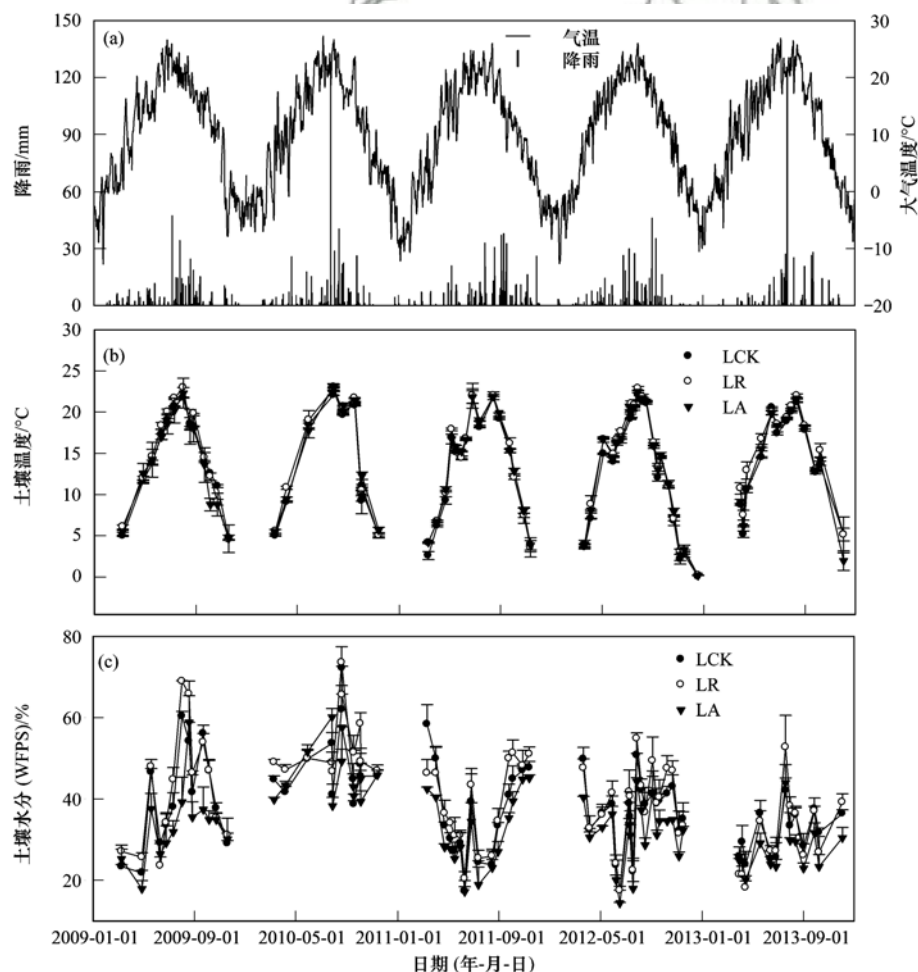


图1 不同凋落物处理下的土壤温度 and 水分

Fig. 1 Soil temperature/moisture for the different surface litter control measures

对照处理 > 倍增凋落物处理的趋势 (41.58% WFPS、38.26% WFPS 和 35.37% WFPS),这可能是由于尼龙网的遮阴效果所导致的。

2.2 凋落物呼吸的动态变化趋势

不同地表凋落物处理下的土壤呼吸速率具有相似的变化趋势,且这种变化趋势与大气或者土壤温度的变化趋势基本一致 (图 1 和 2),均呈现出夏季大于其它季节的趋势 (LCK: [4.05 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] 和

[1.91 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]; LA: [4.76 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] 和 [2.40 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]; LR: [3.50 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] 和 1.76 [$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$])。此外,不同地表凋落物处理下的土壤呼吸速率呈现出 LA > LCK > LR 的 趋 势 (表 1: [3.34 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]、[2.72 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] 和 [2.41 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]; [1 035 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]、[833 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$] 和 [709 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$])。

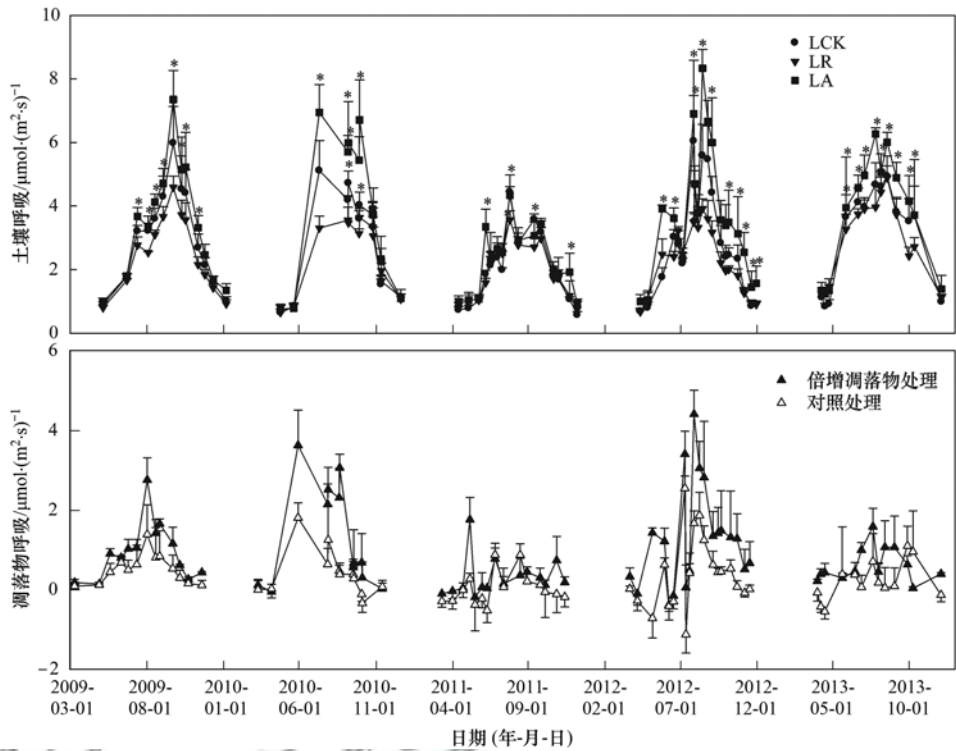


图 2 不同地表凋落物处理下的土壤呼吸/凋落物呼吸

Fig. 2 Soil/surface litter respiration for the different surface litter control measures

凋落物呼吸的动态变化趋势与大气或者土壤温度的变化趋势基本一致 (图 1 和 2),呈现出夏季大于其他季节的趋势 [倍增凋落物处理: 1.51 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 0.58 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$; 对照处理: 0.79 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 0.31 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$],且不同地表凋落物处理下的凋落物呼吸速率呈现出倍增凋落物处理 > 对照处理的趋势 [表 1: 1.03

$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 0.51 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$; 326 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 113 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]。

2.3 凋落物呼吸的影响因素

土壤温度对凋落物呼吸的影响用指数关系模型进行拟合,且土壤温度可以解释 59% ~ 85% (对照处理)和 34% ~ 67% (倍增凋落物处理)的凋落物呼吸变异性 (表 2)。

表 1 不同地表凋落物处理下的累积土壤呼吸/凋落物呼吸¹⁾

Table1 Annual cumulative soil/surface litter respirationin for the different surface litter control measures

年份	累积土壤呼吸/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$			累积凋落物呼吸/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	
	对照处理	去除地表凋落物处理	倍增地表凋落物处理	对照处理	倍增地表凋落物处理
2009	868 ± 124aA	730 ± 56aB	1101 ± 95aC	131 ± 33aA	371 ± 28aB
2010	950 ± 73aA	766 ± 42aB	1151 ± 111aC	165 ± 36aA	385 ± 20aB
2011	635 ± 40bA	529 ± 37bB	724 ± 36bC	48 ± 15bA	195 ± 19bB
2012	745 ± 73cA	675 ± 37cA	1025 ± 192aB	132 ± 31aA	350 ± 15aB
2013	965 ± 166aA	843 ± 44aB	1172 ± 107aC	89 ± 25cA	329 ± 30aB
均值	833 ± 95A	709 ± 43B	1035 ± 108C	113 ± 45A	326 ± 24B

1) 同一列的不同小写字母代表不同年份间的累积土壤呼吸或者凋落物呼吸统计达到显著水平 ($P < 0.05$),同一行的不同大写字母表示不同地表凋落物控制处理下的累积土壤呼吸或者凋落物呼吸差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

表 2 土壤温度对凋落物呼吸的影响

Table 2 Effect of soil temperature on surface litter respiration

年份	对照处理				倍增凋落物处理			
	$F = \beta_0 e^{\beta_1 T}$	Q_{10}	R^2	P	$F = \beta_0 e^{\beta_1 T}$	Q_{10}	R^2	P
2009	$F = 0.05e^{0.139\ 2T}$	4.58	0.85	<0.01	$F = 0.13e^{0.120\ 6T}$	3.34	0.59	<0.05
2010	$F = 0.001e^{0.189\ 8T}$	6.67	0.59	<0.05	$F = 0.03e^{0.187\ 5T}$	6.52	0.67	<0.05
2011	$F = 0.000\ 2e^{0.154\ 1T}$	4.67	0.68	<0.01	$F = 0.06e^{0.107\ 6T}$	2.93	0.34	<0.05
2012	$F = 7.90e^{0.142\ 3T}$	4.15	0.83	<0.01	$F = 0.42e^{0.080\ 4T}$	2.23	0.54	<0.05
2013	$F = 0.06e^{0.164\ 2T}$	5.15	0.63	<0.01	$F = 0.26e^{0.057\ 2T}$	1.77	0.41	<0.05

土壤水分对凋落物呼吸的影响比较复杂,这种复杂性表现在凋落物呼吸对土壤水分的响应可能混淆了土壤温度对凋落物呼吸的影响(图3).在对照处理下,当土壤温度大于17℃时,凋落物呼吸对土壤水分的响应可以用抛物线关系模型进行拟合($P < 0.05$),且土壤水分可以解释41%的凋落物呼吸变异性,当土壤温度小于17℃时,凋落物呼吸不受土壤水分的制约($P > 0.05$);在倍增凋落物处理下,无论是土壤温度大于17℃或者小于17℃,凋落物呼吸均不同程度受到土壤水分的影响($P < 0.05$),在相对高温时土壤水分可以解释高达42%的凋落物呼吸变异性($P < 0.05$),在相对低温时土壤水分仅可以解释18%的凋落物呼吸变异性($P < 0.05$).除了土壤温度和土壤水分以外,凋落物呼吸对土壤温度和土壤水分的响应曲面可以直观明了地反映出土壤温度和土壤水分以及二者交互作用对凋落物呼吸的影响(图4, $P < 0.01$).

2.4 凋落物呼吸温度敏感性的影响因素

在季节尺度上(一个完整的生长季),土壤温度是影响凋落物呼吸的主要因素,且凋落物呼吸温度敏感性的年际差异显著($P < 0.05$):在对照处理下,凋落物呼吸温度敏感性的最小值为4.15(2012年),最大值为6.67(2010年),均值为5.10,变异系数为19%(表2);在倍增凋落物处理下,其变化于1.17~6.52之间,均值为3.36,变异系数为56%(表2).此外,倍增地表凋落物显著地减少了凋落物呼吸温度敏感性($P < 0.05$),平均倍增地表凋落物处理减少了34%的凋落物呼吸温度敏感性(3.36和5.10).

在年际尺度上,凋落物呼吸温度敏感性与年平均土壤水分、地表凋落物量以及二者的交互作用密切相关(表3, $P < 0.01$).同时进一步的研究发现(图5),对凋落物呼吸温度敏感性的贡献(B值)呈现出土壤水分大于地表凋落物量的趋势(对照处

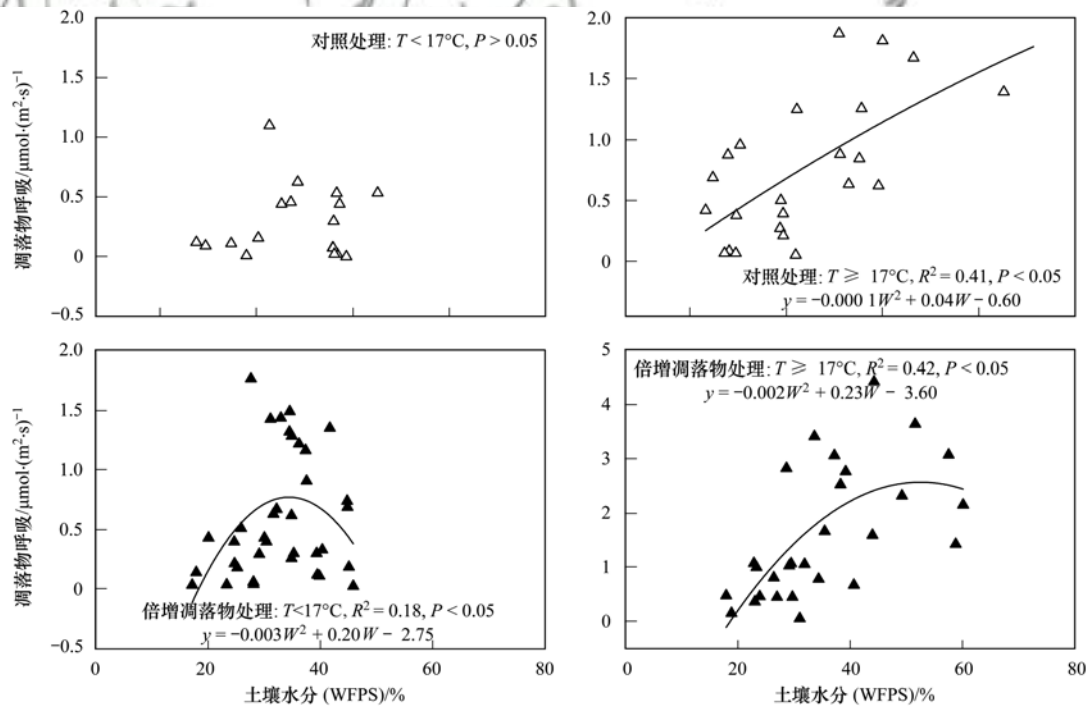


图 3 土壤水分对凋落物呼吸的影响

Fig. 3 Effect of soil moisture on surface litter respiration

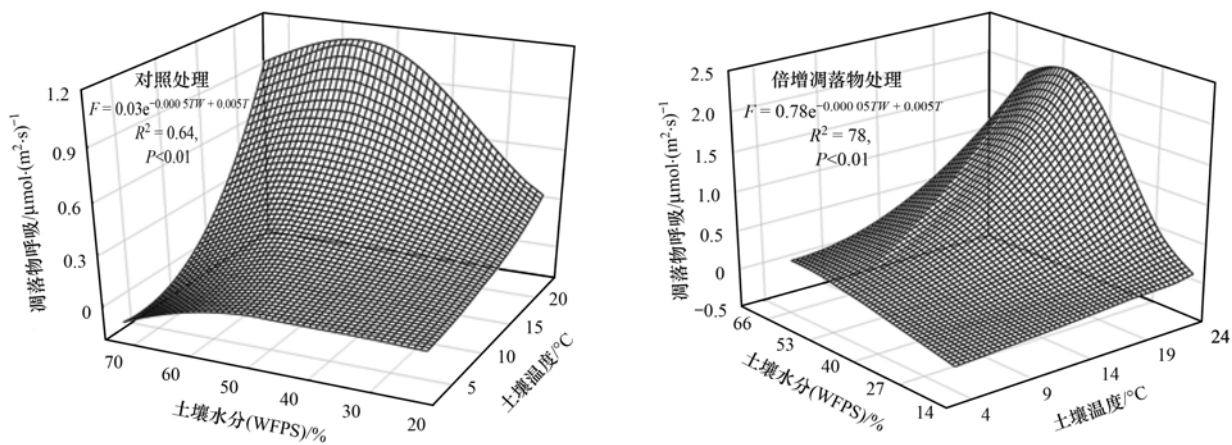


图4 土壤水分和土壤温度的交互作用对凋落物呼吸的影响

Fig. 4 Effect of the interplay between soil temperature and soil moisture on surface litter respiration

理: 2.68 和 2.04; 倍增凋落物处理:1.37 和 0.69)。此外,进一步的研究结果发现:地表凋落物量主要取决于夏季降雨(图6),且对数关系可以很

好地模拟夏季降雨对地表凋落物量的影响($y = 303\ln x - 1\,228$, $R^2 = 0.96$, $P < 0.01$)。

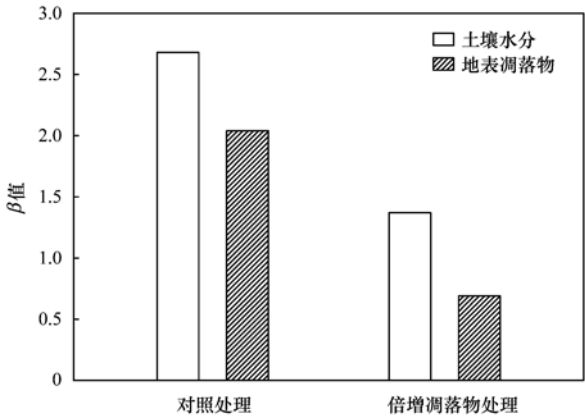


图5 地表凋落物量和土壤水分对凋落物呼吸温度敏感性的贡献

Fig. 5 Contribution of surface litter biomass and soil moisture on the temperature sensitivity of surface litter respiration

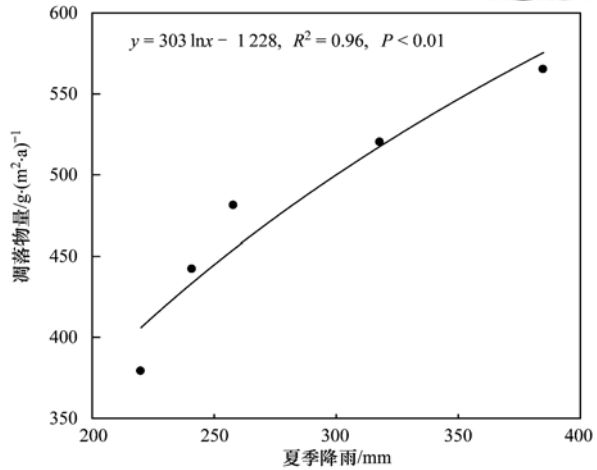


图6 夏季降雨对凋落物量的影响

Fig. 6 Effect of summer rainfall on surface litter biomass

表3 地表凋落物量(L)和年平均土壤水分(W)的交互作用对地表凋落物呼吸温度敏感性的影响

Table 3 Effect of the interplay between surface litter biomass (L) and annual mean soil moisture (W) on the temperature sensitivity of surface litter respiration

处理	方程	R^2	P
对照处理	$y = 0.31W + 0.03L - 0.0005W \times L - 12.34$	0.81	<0.01
倍增凋落物处理	$y = 0.32W + 0.02L - 0.0002W \times L - 14.18$	0.96	<0.01

3 讨论

3.1 凋落物呼吸温度敏感性的影响因素

在本研究中,不同地表凋落物控制处理下的累积凋落物呼吸变化于48~385 g·(m²·a)⁻¹之间,其正好位于全球林地累积地表凋落物呼吸的变化范围[61~970 g·(m²·a)⁻¹]^[2, 7, 10],然而本研究中的平均累积凋落物呼吸却低于其它拥有充足降雨的

林地生态系统的平均累积凋落物呼吸^[8, 27]。此外,不同地表凋落物控制处理下的凋落物呼吸温度敏感性变化于1.17~6.67之间,其恰好也位于全球林地地表凋落物呼吸温度敏感性的变化范围(1.29~10.6)之内^[7, 16, 18, 19]。但是,本研究中的平均凋落物呼吸温度敏感性却高于其它林地生态系统的平均凋落物呼吸温度敏感性(4.23和3.61)^[7, 16, 18, 19],这可能是因为黄土高原地区是我国典型的生态脆弱区

以及典型的干旱和半干旱地区,其有限的降雨(544 mm)和较低的地表凋落物归还量[$477 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]均限制了该区的地下生理过程以及造成该区的生态系统对气候变化相对较为敏感^[9, 16].

不同地表凋落物控制处理下的凋落物呼吸温度敏感性的年际变化差异显著($P < 0.05$),而土壤水分和地表凋落物是驱动其变化的主要因素,究其原因可能与以下因素有关:①在水分匮乏的干旱、半干旱的黄土高原地区,土壤水分是控制地下生理过程的主要限制性因素^[32, 33],因此土壤水分的微小波动必然会影响地下生理过程的相应变化^[34, 35].例如,中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站的室内培养试验研究结果表明,青藏高原高寒矮嵩草草甸生态系统的凋落物呼吸温度敏感性随着土壤湿度的增加呈现出增加的趋势^[20].在本研究中,凋落物呼吸温度敏感性随着土壤水分的增加呈现出线性增加的趋势($y = 0.08x + 1.74$, $R^2 = 0.42$, $P < 0.05$),这与已有的研究结果相一致^[20];②降雨是黄土高原地区唯一的水分来源,降雨的剧烈波动不可避免地影响到地表凋落物量^[21, 22].在本研究中,地表凋落物量随着夏季降雨的增加呈现出对数增加的趋势(图6),这与已有的研究结果相类似^[36].除了土壤水分以外,底物的数量(地表凋落物量)也是影响凋落物呼吸温度敏感性的重要因素^[18].例如,在湖北省赤壁市丁母山林场的纯毛竹林中的研究发现,凋落物呼吸温度敏感性随着地表凋落物归还量的减少(因复垦和劈草造成归还到土壤中的地表凋落物量不同程度地降低)而呈现出降低趋势^[18].且研究结果显示,凋落物呼吸温度敏感性随着地表凋落物量的增加而呈线性增加趋势($y = 0.01x + 0.05$, $R^2 = 0.58$, $P < 0.05$),这与已有的研究结果相匹配^[18].

3.2 应用意义

地表凋落物控制措施一方面通过直接影响微生物进行新陈代谢的食物来源(地表凋落物),另一方面通过间接影响土壤微环境差异影响地表凋落物呼吸温度敏感性^[18, 20].本研究结果表明,当地表凋落物量倍增以后,累积凋落物呼吸量增加了将近3倍,但是相应地凋落物呼吸温度敏感性却降低了34%(3.36和5.10),即在未来持续增温的条件下,倍增地表凋落物条件下的凋落物呼吸对升温相对不敏感.究其原因可能与以下因素有关:①倍增地表凋落物量以后由于地表凋落物层的加厚很有可能拟制了土壤中 CO_2 的排放^[27];②倍增地表凋落物后很

有可能通过增加土壤水分或者减少土壤温度降低凋落物呼吸温度敏感性^[37],这是因为已有的研究结果表明,地表凋落物呼吸温度敏感性随着土壤温度的增加或者土壤水分的减少而呈现出减少的趋势^[18, 20];③刺槐林属于固氮树种,与其它非固氮树种相比较而言,刺槐林地表凋落物具有相对较低的C:N^[38],而研究结果显示相对活性的底物具有较小的呼吸温度敏感性^[39, 40],但具体的原因有待进一步的试验.

此外,在对照处理下,地表凋落物碳输入量远大于其输出量[图7: $215 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $113 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$],即大约有超过50%的地表凋落物碳滞留在该刺槐林生态系统中.但在倍增处理下,仅有24%的地表凋落物碳滞留在该刺槐林生态系统中[图7: $430 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $326 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$],即在该人工刺槐林生态系统中地表凋落物的增加未必意味着土壤有机碳储量的增加.

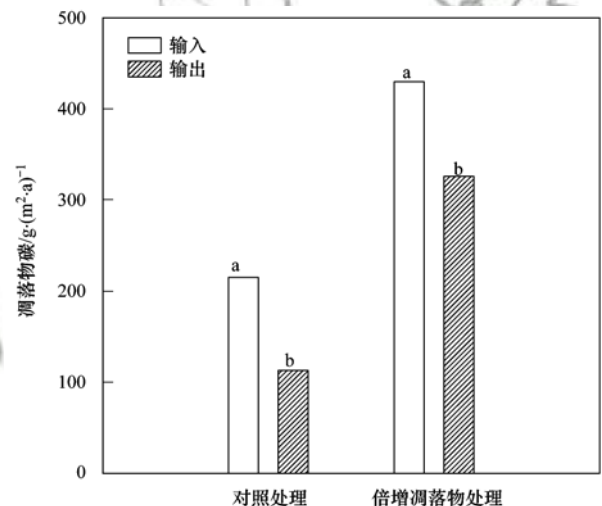


图7 不同凋落物处理下的土壤碳平衡状况

Fig. 7 Balance of soil carbon for the different surface litter control measures

在黄土高原地区的人工刺槐林生态系统中,以凋落物呼吸的形式释放到大气中 CO_2 大约为 $113 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,约占总土壤呼吸的15%.本研究结果显示,凋落物呼吸温度敏感性的年际变化主要取决于年平均土壤水分和地表凋落物量,而年平均土壤水分和地表凋落物量均受降雨频率与分布的制约(图6和8).因此,在旱地生态系统中,为了更加准确地预测凋落物呼吸的动态变化趋势,降雨的剧烈波动性是必须考虑的一个重要因素之一.

4 结论

研究凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影

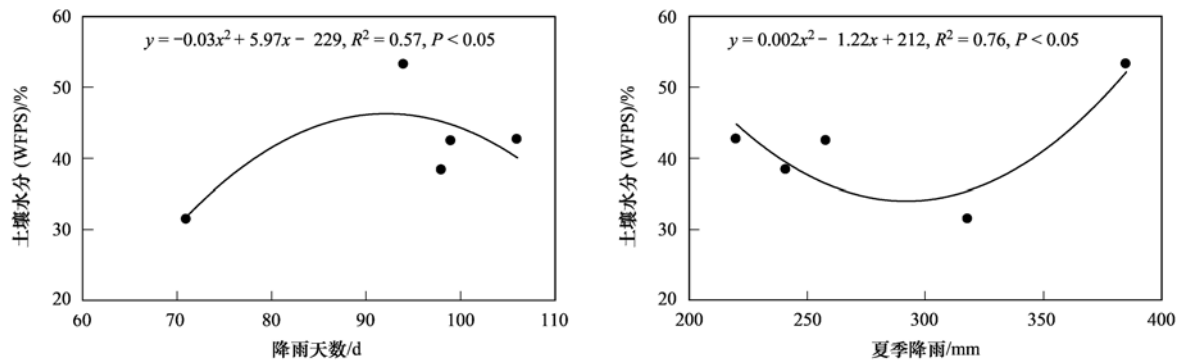


图8 降雨频率与分布对土壤水分的影响

Fig. 8 Effect of rainfall frequency and distribution on annual mean soil moisture

响因素对丰富和准确理解地区的土壤碳循环具有重要意义。凋落物呼吸温度敏感性的年际差异显著 ($P < 0.05$),而这种年际差异性主要取决于年平均土壤水分、地表凋落物量以及二者的交互作用 ($P < 0.01$),且对凋落物呼吸温度敏感性的贡献呈现出土壤水分大于地表凋落物量的趋势。此外,在倍增凋落物条件下,凋落物呼吸增加了将近3倍,但是相应的凋落物呼吸温度敏感性却减少了34%。无论是在对照或者是在倍增凋落物处理下,均呈现出地表凋落物的输入量大于输出量的趋势。因此,凋落物控制措施、土壤水分、地表凋落物量是黄土区刺槐林凋落物呼吸温度敏感性的主要驱动因素。

致谢:感谢西北农林科技大学水土保持研究所郭胜利课题组、中国科学院长武黄土高原农业生态试验站和宝鸡文理学院张蓓蓓副教授给予的帮助。

参考文献:

- [1] Kuzyakov Y. Sources of CO_2 efflux from soil and review of partitioning methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(3): 425-448.
- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1992, **44**(2): 81-99.
- [3] Prescott C E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **101**(1-3): 133-149.
- [4] Xu S, Liu L, Sayer E J. Variability of aboveground litter inputs alters soil physicochemical and biological processes: a meta-analysis of litterfall-manipulation experiments[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2013, **10**(3): 5245-5272.
- [5] Kim H, Hirano T, Koike T, *et al.* Contribution of litter CO_2 production to total soil respiration in two different deciduous forests[J]. *Phyton-Annales Rei Botanicae*, 2005, **45**(4): 385-388.
- [6] Liang N, Hirano T, Zheng Z M, *et al.* Soil CO_2 efflux of a larch forest in northern Japan [J]. *Biogeosciences*, 2010, **7**(11): 3447-3457.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Zhang Y J, Gan Z T, Li R J, *et al.* Litter production rates and soil moisture influences interannual variability in litter respiration in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, **125**: 43-51.
- [10] Wang Y D, Wang H M, Ma Z Q, *et al.* Contribution of aboveground litter decomposition to soil respiration in a subtropical coniferous plantation in Southern China [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, **45**(2): 137-147.
- [11] Zimmermann M, Meir P, Bird M, *et al.* Litter contribution to diurnal and annual soil respiration in a tropical montane cloud forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(6): 1338-1340.
- [12] 邓琦, 刘世忠, 刘菊秀, 等. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素[J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(9): 976-986.
- [13] Deng Q, Liu S Z, Liu J X, *et al.* Contributions of litter-fall to soil respiration and its affecting factors in southern subtropical forests of China[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, **22**(9): 976-986.
- [14] 赵昕, 张万军, 沈会涛, 等. 针阔树种人工林地凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. *中国生态农业学报*, 2014, **22**(11): 1318-1325.
- [15] Zhao X, Zhang W J, Shen H T, *et al.* Contributions of aboveground litter to soil respiration in coniferous and deciduous plantations[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, **22**(11): 1318-1325.
- [16] 周小刚, 郭胜利, 车升国, 等. 黄土高原刺槐人工林地凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. *生态学报*, 2012, **32**(7): 2150-2157.
- [17] Zhou X G, Guo S L, Che S G, *et al.* Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(7): 2150-2157.
- [18] 王丽丽, 宋长春, 郭跃东, 等. 三江平原不同土地利用方式下凋落物对土壤呼吸的贡献[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3130-3135.
- [19] Wang L L, Song C C, Guo Y D, *et al.* Contribution of litter to

- soil respiration under different land-use types in Sanjiang plain [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(11): 3130-3135.
- [16] Zhang Y J, Guo S L, Liu Q F, *et al.* Influence of soil moisture on litter respiration in the semiarid Loess Plateau [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(12): e114558.
- [17] 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.
- Tian X Y, Tu L H, Hu T X, *et al.* Characteristics of soil respiration components and their temperature sensitivity in a *Pleuroblastus amarus* plantation in rainy area of west China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(2): 293-300.
- [18] 范少辉, 唐晓鹿, 漆良华, 等. 不同经营措施对毛竹林土壤呼吸温度敏感性的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2012, **30**(3): 300-307.
- Fan S H, Tang X L, Qi L H, *et al.* Effects of different managements on temperature sensitivity of soil respiration of *Phyllostachy edulis* forest [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2012, **30**(3): 300-307.
- [19] 武传胜, 沙丽清, 张一平. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林凋落物对土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2012, **40**(6): 37-40.
- Wu C S, Sha L Q, Zhang Y P. Effect of litter on soil respiration and its temperature sensitivity in a montane evergreen broad-leaved forest in Ailao mountains, Yunnan [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, **40**(6): 37-40.
- [20] 苏爱玲. 气候变化对高寒草甸枯落物分解特性的影响及温度敏感性研究[D]. 西宁: 中国科学院西北高原生物研究所, 2010.
- Su A L. Effect of climate change on litter decomposition and temperature sensitivity in Alpine Meadow on Qinghai-Tibetan Plateau [D]. Xi'ning: Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [21] Austin A T. Differential effects of precipitation on production and decomposition along a rainfall gradient in Hawaii [J]. *Ecology*, 2002, **83**(2): 328-338.
- [22] Travers S K, Eldridge D J. Increased rainfall frequency triggers an increase in litter fall rates of reproductive structures in an arid eucalypt woodland [J]. *Austral Ecology*, 2013, **38**(7): 820-830.
- [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] Karhu K, Fritze H, Hämäläinen K, *et al.* Temperature sensitivity of soil carbon fractions in boreal forest soil [J]. *Ecology*, 2010, **91**(2): 370-376.
- [25] Zhang Y J, Guo S L, Liu Q F, *et al.* Responses of soil respiration to land use conversions in degraded ecosystem of the semi-arid Loess Plateau [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **74**: 196-205.
- [26] Shi W Y, Zhang J G, Yan M J, *et al.* Seasonal and diurnal dynamics of soil respiration fluxes in two typical forests on the semiarid Loess Plateau of China: temperature sensitivities of autotrophs and heterotrophs and analyses of integrated driving factors [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **52**: 99-107.
- [27] Yan W D, Chen X Y, Tian D L, *et al.* Impacts of changed litter inputs on soil CO₂ efflux in three forest types in central south China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(7): 750-757.
- [28] Valentini C M A, Sanches L, de Paula S R, *et al.* Soil respiration and aboveground litter dynamics of a tropical transitional forest in northwest Mato Grosso, Brazil [J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2008, **113**(G1): G00B10.
- [29] 高会议, 郭胜利, 刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子[J]. *生态学报*, 2011, **31**(18): 5217-5224.
- Gao H Y, Guo S L, Liu W Z. Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(18): 5217-5224.
- [30] 周洪华, 李卫红, 杨余辉, 等. 干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素[J]. *地理科学*, 2011, **31**(2): 190-196.
- Zhou H H, Li W H, Yang Y H, *et al.* Soil respiration variant and its effecting factors at different land use in Arid land [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, **31**(2): 190-196.
- [31] Berryman E M, Marshall J D, Kavanagh K. Decoupling litter respiration from whole-soil respiration along an elevation gradient in a Rocky Mountain mixed-conifer forest [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, **44**(5): 432-440.
- [32] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux—a modified model [J]. *Plant and Soil*, 2005, **268**(1): 21-33.
- [33] Wang B, Zha T S, Jia X, *et al.* Soil moisture modifies the response of soil respiration to temperature in a desert shrub ecosystem [J]. *Biogeosciences*, 2014, **11**(2): 259-268.
- [34] Bowden R D, Newkirk K M, Rullo G M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(12): 1591-1597.
- [35] Zhang Y J, Guo S L, Zhao M, *et al.* Soil moisture influence on the interannual variation in temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization in the Loess Plateau [J]. *Biogeosciences*, 2015, **12**(11): 3655-3664.
- [36] Lawrence D, Foster D. Changes in forest biomass, litter dynamics and soils following shifting cultivation in southern Mexico: an overview [J]. *Interciencia*, 2002, **27**(8): 400-408.
- [37] Fekete I, Varga C, Biró B, *et al.* The effects of litter production and litter depth on soil microclimate in a central european deciduous forest [J]. *Plant and Soil*, 2016, **398**(1-2): 291-300.
- [38] 郭胜利, 马玉红, 车升国, 等. 黄土区人工与天然植被对凋落物量和土壤有机碳变化的影响[J]. *林业科学*, 2009, **45**(10): 14-18.
- Guo S L, Ma Y H, Che S G, *et al.* Effects of artificial and natural vegetations on litter production and soil organic carbon change in loess hilly areas [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, **45**(10): 14-18.
- [39] Conant R T, Drijber R A, Haddix M L, *et al.* Sensitivity of organic matter decomposition to warming varies with its quality [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(4): 868-877.
- [40] Wetterstedt J Å M, Persson T, Ågren G I. Temperature sensitivity and substrate quality in soil organic matter decomposition: results of an incubation study with three substrates [J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(6): 1806-1819.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)