

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

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

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)

上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征 高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)

京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估 吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)

北京冬季 PM_{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)

2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析 路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)

利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染源 刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)

南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析 迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)

喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性 张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)

生物滴滤塔净化含硫混合废气 叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)

西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析 房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)

城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)

三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征 王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)

隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素 赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)

白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析 王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)

唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价 吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)

三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征 邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)

电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)

九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)

厦门筶箕湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价 杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)

龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价 李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)

碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村镇高铁锰地下水效能与机制 孙楠, 谌燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)

高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势 张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)

预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验 杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)

Cu-Al₂O₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物 徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)

过硫酸钾氧化去除 Cu(CN)₂ 中的氰污染物 王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)

微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能 全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)

桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征 李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)

基于 A²/O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)

污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)

全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性 齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)

饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响 李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曜 (1109)

快速启动厌氧氨氧化工艺 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)

一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式 完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)

侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响 马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)

厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究 陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)

有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响 戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)

过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制 白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)

不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果 董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)

全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤 杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)

纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应 衣俊, 程金平 (1173)

血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征 李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)

纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)

利用 *in vitro* 方法研究不同铁矿对土壤微生物可给性的影响 钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)

不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制 温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)

施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变 刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)

施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)

模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)

土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应 刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)

岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)

板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响 宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)

酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响 姜继超, 尧倩 (1272)

《环境科学》征稿简则(1092) 《环境科学》征订启事(1158) 信息(1166,1261,1271)

模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响

陈书涛^{1,2}, 孙鹭², 桑琳², 胡正华²

(1. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 为研究模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响, 进行野外定位试验. 设置裂区试验, 分 4 个区组, 每个区组中主区为不断根和挖沟断根小区, 每个主区内设置对照 (CK)、pH 4.0 (A1)、pH 3.0 (A2)、pH 2.0 (A3) 共 4 个模拟酸雨处理水平. 观测不断根小区的土壤呼吸和断根小区的异养呼吸, 同时观测土壤温度、土壤湿度. 结果表明, 在不断根小区, CK、A1、A2、A3 处理的土壤呼吸均表现出明显的季节变异趋势; 与不断根小区类似, 断根小区的异养呼吸也具有明显的季节变异趋势. 断根小区的异养呼吸明显低于不断根小区的土壤呼吸. CK、A1、A2、A3 处理的年平均土壤呼吸速率分别为 (2.47 ± 0.31) 、 (2.52 ± 0.22) 、 (2.38 ± 0.17) 、 (2.43 ± 0.22) $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; 断根小区 CK、A1、A2、A3 处理的年平均异养呼吸速率分别为 (1.55 ± 0.10) 、 (1.65 ± 0.22) 、 (1.77 ± 0.08) 、 (1.78 ± 0.27) $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 单因素方差分析表明, 不断根小区不同模拟酸雨处理之间的土壤呼吸速率以及断根小区不同模拟酸雨处理的异养呼吸速率均无显著差异. 回归分析表明, 不断根小区的土壤呼吸与断根小区的异养呼吸之间存在极显著 ($P < 0.001$) 的正比例函数关系, 模拟酸雨的添加降低了土壤呼吸与异养呼吸之比. 土壤温度是决定不断根小区土壤呼吸和断根小区异养呼吸季节变异的最主要的因素, 而土壤湿度对土壤呼吸和异养呼吸的季节变异无显著的影响.

关键词: 模拟酸雨; 次生林; 土壤呼吸; 异养呼吸; 土壤温度

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1235-10 DOI: 10.13227/j.hjx.201608206

Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest

CHEN Shu-tao^{1,2}, SUN Lu², SANG Lin², HU Zheng-hua²

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAEET), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to investigate the effects of simulated acid rain on soil respiration and heterotrophic respiration in a secondary forest, a field experiment was carried out. A split-plot experiment was arranged in field. There were 4 blocks; each block had two main plots which were trenched and un-trenched plots. In each main plot, 4 simulated acid rain treatments of control (CK), pH 4.0 (A1), pH 3.0 (A2), and pH 2.0 (A3) were randomly assigned. Soil respiration in the un-trenched plots and heterotrophic respiration in the trenched plots were measured weekly. Soil temperature and moisture at a depth of 5 cm were measured during the respiration measurements. The results indicated that different simulated acid rain treatments exhibited similar seasonal patterns of soil respiration and heterotrophic respiration. Heterotrophic respiration in the trenched plots was significantly lower than soil respiration in the un-trenched plots. The annual mean soil respiration rates for the CK, A1, A2, and A3 treatments in the un-trenched plots were (2.47 ± 0.31) , (2.52 ± 0.22) , (2.38 ± 0.17) , and (2.43 ± 0.22) $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, respectively, while the annual mean heterotrophic respiration rates for the 4 treatments in the trenched plots were (1.55 ± 0.10) , (1.65 ± 0.22) , (1.77 ± 0.08) , and (1.78 ± 0.27) $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, respectively. ANOVA showed that simulated acid rain had no significant effects on soil respiration in the un-trenched plots and heterotrophic respiration in the trenched plots. Regression analysis suggested that there was a significant linear regression relationship between soil respiration and heterotrophic respiration. Simulated acid rain significantly ($P < 0.001$) decreased the ratio of soil respiration to heterotrophic respiration. Soil temperature was the main controlling factor regulating the seasonal patterns of soil respiration and heterotrophic respiration for each of the SAR treatment, while soil moisture had no significant effects on the seasonal variability in soil respiration and heterotrophic respiration.

Key words: simulated acid rain; secondary forest; soil respiration; heterotrophic respiration; soil temperature

由温室气体造成的温室效应是全球性的环境问题之一, CO_2 是最主要的温室气体. 温室效应的最直接结果是全球变暖, 全球变暖对生态系统会产生一系列的不良影响. 酸雨是另一个全球性的环境问

收稿日期: 2016-08-31; 修订日期: 2016-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41375006); 江苏省“青蓝工程”项目(2014); 江苏省“六大人才高峰”项目(2015-NY-012)

作者简介: 陈书涛(1978~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为生态系统碳氮循环与全球变化, E-mail: chenstyf@aliyun.com

题,我国是受酸雨污染较为严重的国家,特别是南方地区,酸雨问题更为严重^[1~3]。

酸雨对生态系统会产生一系列的影响。酸雨会破坏叶片中的细胞器,破坏植物细胞的膜系统,腐蚀叶肉组织,从而会对植物的光合作用产生影响^[4,5]。Reich 等^[6]和 Wright 等^[7]发现酸雨会改变叶片氮素含量,影响土壤微生物群落结构和活性^[8],酸雨对土壤微生物及土壤理化性质也会产生影响^[8],并加速土壤表层盐基离子的淋溶^[9,10],酸雨还会加速植物凋落物和土壤中养分的淋失^[11~14]。

土壤呼吸是陆地生态系统中最重要碳通量过程之一,是陆地生态系统向大气排放 CO₂ 的一种重要途径,土壤呼吸的量值仅次于全球陆地总初级生产力以及总生态系统呼吸^[15]。陆地生态系统中的土壤呼吸主要由异养呼吸和自养呼吸(根呼吸)构成^[16]。森林生态系统的土壤呼吸占陆地生态系统总土壤呼吸量的比例很大,是碳循环研究中的重要领域,特别是土壤呼吸组分的区分更是人们研究的热点。

森林土壤呼吸的大小取决于土壤微生物活性、根生物量及活性、凋落物数量等因素^[17],而酸雨对土壤微生物活性、植物根系及凋落物性质会产生一定影响^[8],因而酸雨可能会对森林土壤呼吸产生影响。然而,以往关于模拟酸雨对森林土壤呼吸的影响的研究结果具有较大的争议,这主要是由于以往关于酸雨对森林土壤呼吸的影响的研究相对较少,特别是缺乏关于酸雨如何影响土壤呼吸组分的野外定位试验研究。

本研究设置模拟酸雨长期定位试验,探究在长期模拟酸雨添加后次生林土壤呼吸及异养呼吸的变异规律,以期分析未来酸雨加重条件下森林土壤碳循环的变异规律和进行合理的森林管理提供基础数据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验地点位于南京市北郊的龙王山森林,试验地坐标为 118.70°E、32.18°N。该地区在气候带划分上属于北亚热带北缘地区,气候类型为亚热带湿润季风气候,具有四季分明、雨热同季的特点。该地区的多年(1971~2000年)平均气温为 15.5℃,多年(1971~2000年)平均降水量 1062 mm。样地树木的树龄大多在 20~50 a 之间,植被郁闭度约为 0.9。样地树木为针阔混交林,林冠层树种

主要有白栎(*Quercus fabri* L.)、朴树(*Celtis sinensis* L.)、马尾松(*Pinus massoniana* L.)等,草本层有苔草(*Carex* spp.)、天门冬(*Asparagus cochinchinensis* L.)、繁缕(*Stellaria media* L.)等植物。在试验前,样地 0~20 cm 土壤的初始 pH 为 5.6,0~4、4~10、10~20 cm 土壤的初始有机碳含量分别为 62.7、62.1、60.2 g·kg⁻¹,0~4、4~10、10~20 cm 土壤的初始全氮含量分别为 3.0、2.7、2.6 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

本研究为一项模拟酸雨长期定位试验的一部分,该长期定位试验于 2010-02-15 开始设置。采用裂区试验进行模拟酸雨处理和土壤呼吸组分的划分。在林地设置 4 个区组(即 4 个重复),每个区组划分为断根区和不断根区,每个断根区和不断根区各自划分为 4 个模拟酸雨处理。以往的模拟酸雨研究中,设置的模拟酸雨强度一般在 pH 4.0 到 pH 2.0 之间^[18,19],本研究中设置较高的浓度梯度为 pH 4.0 处理,设置较低的浓度梯度 pH 2.0 处理,设置中间梯度为 pH 3.0 处理,并以去离子水为对照(CK)。各处理记为 CK、A1(pH 4.0)、A2(pH 3.0)、A3(pH 2.0)。小区个数共计 32 个,每个小区面积为 1 m²。

采用 Lavigne 等^[20]和 Mäkiranta 等^[21]的方法进行断根小区的设置,在每个断根小区四周挖不小于 30 cm 深的沟,以阻断植物根系进入断根小区,断根小区的草本植物连根去除掉,仅保留小区内的植物凋落物,这样可保证在断根小区内测定的呼吸作用仅为异养呼吸。不断根小区的四周不挖沟,小区内植物保持原状,仅测定土壤呼吸的底座内的植物被人工清除掉,这样可保证不断根小区内测定的呼吸作用为土壤呼吸。

在 CK 处理中喷洒去离子水,在 A1、A2、A3 小区中喷洒模拟酸雨。以试验地多年(2001~2006年)酸雨平均氢离子量 $1 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 为基准值^[22],设定本研究中模拟酸雨强度的增加值,其效应以酸雨中氢离子、硫、氮的总量来体现。根据我国酸雨成分以硫酸根为主,硝酸根为辅的规律,并参照当地以往的常规酸雨监测资料^[22],按照硫酸:硝酸为 4.5:1 的摩尔比配置模拟酸雨的母液^[13],再用母液与去离子水配成 pH 为 4.0、3.0、2.0 的模拟酸雨,A1、A2、A3 小区中对应的酸雨的 pH 分别为 pH 4.0、pH 3.0、pH 2.0。自 2010-02-15 开始进行模拟酸雨处理,每 2 周喷洒一次模拟酸雨,每小区每次喷洒量为 1 L。喷洒时以小喷壶均匀地喷洒到

各个对应的小区中.

1.3 呼吸速率及温湿度测定

于 2015-06-02 开始进行为期 1 a 的土壤呼吸和异养呼吸观测试验. 在每个小区中央埋设直径 20 cm, 高 10 cm 的 PVC 底座, 埋入 PVC 底座后, 将底座周围土壤压紧, 防止漏气. 于每个观测日的 08:00 ~ 10:00 采用 Li-8100 土壤碳通量观测系统 (Li-COR 公司, 美国) 测定不断根小区的土壤呼吸速率和断根小区的异养呼吸速率, 观测频率为每周观测 1 次. 试验期间, 定期除去底座内的植物以保证观测的呼吸速率中无植株的呼吸作用.

在观测土壤呼吸和异养呼吸的同时, 采用 Li-8100 土壤碳通量观测系统自带的温度探头和湿度探头测定 5 cm 深处的土壤温度和土壤湿度 (体积分数).

1.4 数据分析

采用加权累积法估算年土壤呼吸和异养呼吸总量, 然后除以土壤呼吸或异养呼吸的观测天数得到加权平均呼吸速率. 以 EXCEL 软件制作土壤温度、土壤湿度、土壤呼吸及异养呼吸的季节动态变化图和季节平均呼吸速率图, 以 EXCEL 作图分析土壤呼吸 (或异养呼吸) 与土壤温度、土壤湿度的关系, 并分析异养呼吸与土壤呼吸的正比例函数关系. 利用 SPSS 软件中的 t 检验分析不同处理间土壤温度、土壤湿度的差异, 利用单因素方差分析来分析不同处

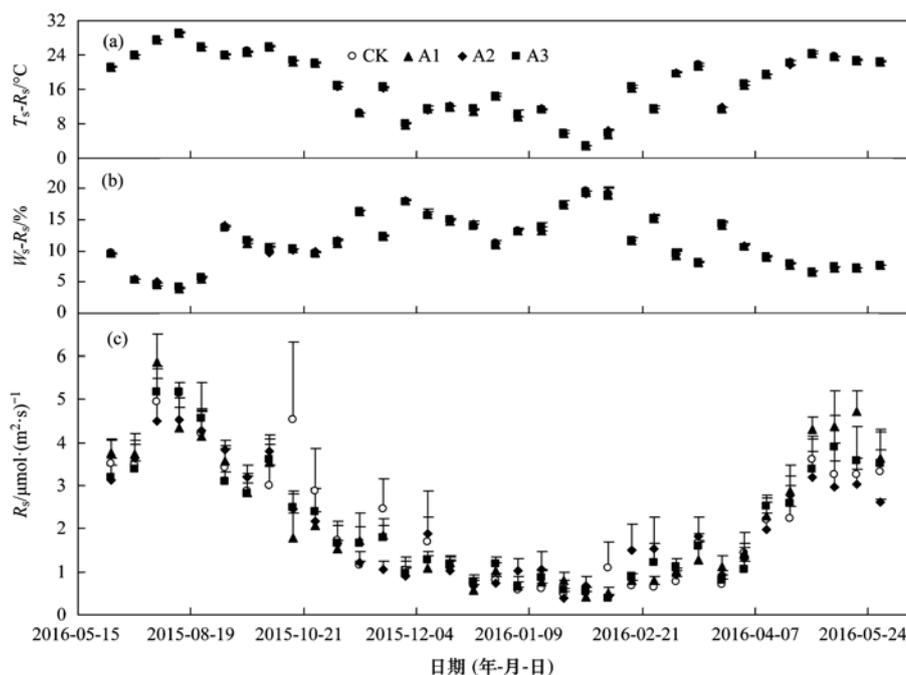
理间土壤呼吸和异养呼吸的差异.

2 结果与分析

2.1 土壤温度、土壤湿度、土壤呼吸、异养呼吸的季节变异

不同模拟酸雨处理的土壤温度具有相同的季节变异趋势, 在夏季最高, 而在冬季最低 [图 1(a)]. 在不断根小区, CK、A1、A2、A3 处理的土壤温度分别介于 2.7 ~ 29.1、2.7 ~ 29.3、2.7 ~ 29.2、2.8 ~ 29.3 °C 之间, t 检验结果表明不同处理间的土壤温度无显著差异 ($P > 0.05$). 不同模拟酸雨处理的土壤湿度也具有相同的季节变异趋势 [图 1(b)], 在不断根小区, CK、A1、A2、A3 处理的土壤湿度分别介于 3.8% ~ 19.6%、3.9% ~ 19.3%、3.9% ~ 19.3%、4.1% ~ 19.3% 之间, t 检验结果表明不同处理间的土壤湿度无显著差异 ($P > 0.05$). 在断根小区, 不同模拟酸雨处理的土壤温度和土壤湿度均无显著差异 [图 2(a)、2(b)], CK、A1、A2、A3 处理的季节平均土壤温度分别为 17.4、17.4、17.3、17.3 °C, 这 4 个处理的季节平均土壤湿度分别为 11.5%、11.6%、11.5%、11.6%. 配对 t 检验表明断根和不断根小区间的土壤温度存在显著差异 ($P < 0.05$), 断根和不断根小区间的土壤湿度亦存在显著差异 ($P < 0.05$).

在不断根小区, CK、A1、A2、A3 处理的土壤呼



图中 CK、A1、A2、A3 分别代表对照、pH 4.0、pH 3.0、pH 2.0 处理, 误差线为标准误差 (SE), 下同

图 1 不断根小区土壤温度 (T_s-R_s)、土壤湿度 (W_s-R_s)、土壤呼吸 (R_s) 的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil temperature, soil moisture, and soil respiration in the un-trenched plots

吸均表现出明显的季节变异趋势,在冬季低,在夏季高,从冬季到夏季土壤呼吸逐渐增加[图 1(c)],这与土壤温度的季节变异趋势一致. 这 4 个处理的土壤呼吸速率的季节变异范围分别为 0.48 ~ 5.13、0.42 ~ 5.88、0.40 ~ 4.54、0.38 ~ 5.18 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,其年平均土壤呼吸速率分别为 (2.47 ± 0.31) 、 (2.52 ± 0.22) 、 (2.38 ± 0.17) 、 (2.43 ± 0.22) $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ [图 3(a)]. 单因素方差分析表明,不断根小区不同模拟酸雨处理之间

的土壤呼吸速率无显著差异($P > 0.05$). 与不断根小区类似,断根小区的异养呼吸也具有明显的季节变异趋势[图 2(c)],断根小区的异养呼吸速率极显著($P < 0.001$)低于不断根小区的土壤呼吸速率[图 1(c)、图 2(c)],断根小区 CK、A1、A2、A3 处理的年平均异养呼吸速率分别为 (1.55 ± 0.10) 、 (1.65 ± 0.22) 、 (1.77 ± 0.08) 、 (1.78 ± 0.27) $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ [图 3(b)],不同模拟酸雨处理的异养呼吸速率无显著差异($P > 0.05$).

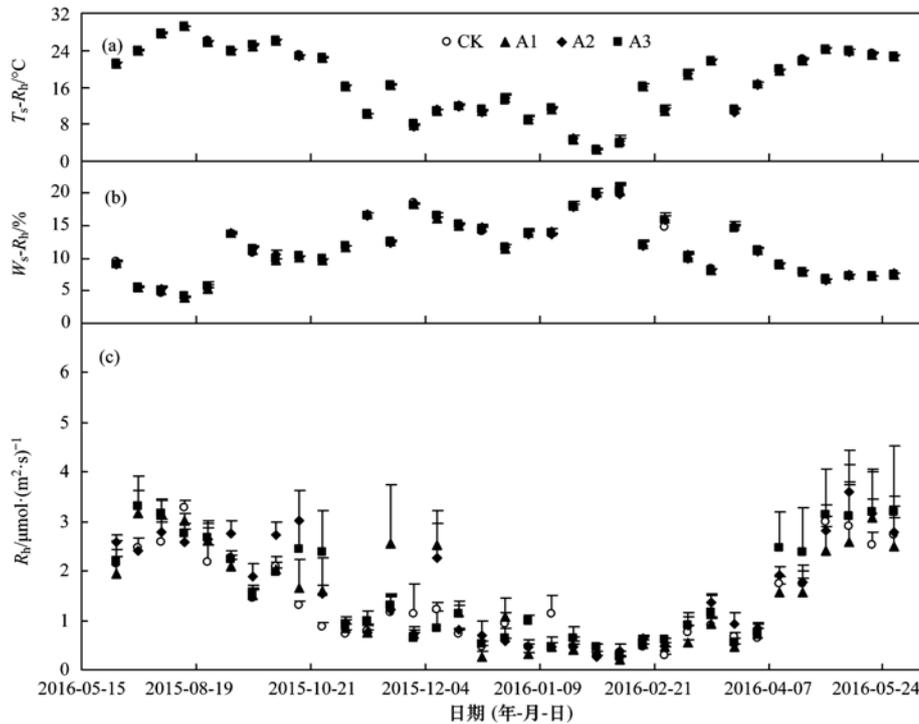


图 2 断根小区土壤温度 (T_s-R_h)、土壤湿度 (W_s-R_h)、异养呼吸 (R_h) 的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of soil temperature, soil moisture, and heterotrophic respiration in the trenched plots

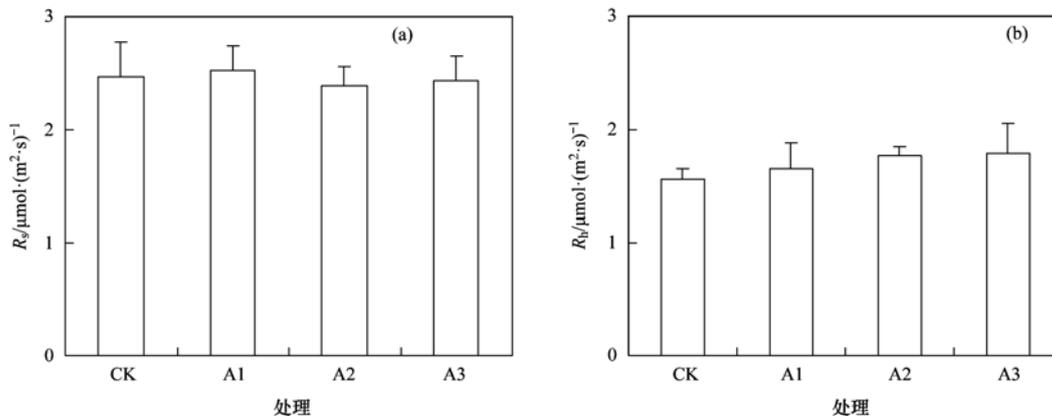


图 3 不同处理的年平均土壤呼吸 (R_s) 及异养呼吸 (R_h) 速率

Fig. 3 Annual mean soil respiration and heterotrophic respiration rate for different treatments

2.2 土壤呼吸与异养呼吸的比例

回归分析表明,不断根小区的土壤呼吸与断根小

区的异养呼吸之间存在极显著($P < 0.001$)的正比例函数关系(图 4). CK、A1、A2、A3 处理的正比例函

数的 R^2 分别为 0.720、0.768、0.722、0.813, 这表明异养呼吸可以分别解释土壤呼吸 72.0%、76.8%、72.2%、81.3% 的变异. CK、A1、A2、A3 处理的正比例函数的斜率分别为 1.490、1.458、1.233、1.302, 这表明这 4 个处理中土壤呼吸分别是异养呼吸的

1.490 倍、1.458 倍、1.233 倍、1.302 倍. 模拟酸雨的添加降低了土壤呼吸与异养呼吸之比, 与对照相比, A1、A2、A3 处理分别比对照降低了 2.1%、17.2%、12.6%, 由此推断, 模拟酸雨对自养呼吸(根呼吸)具有抑制作用.

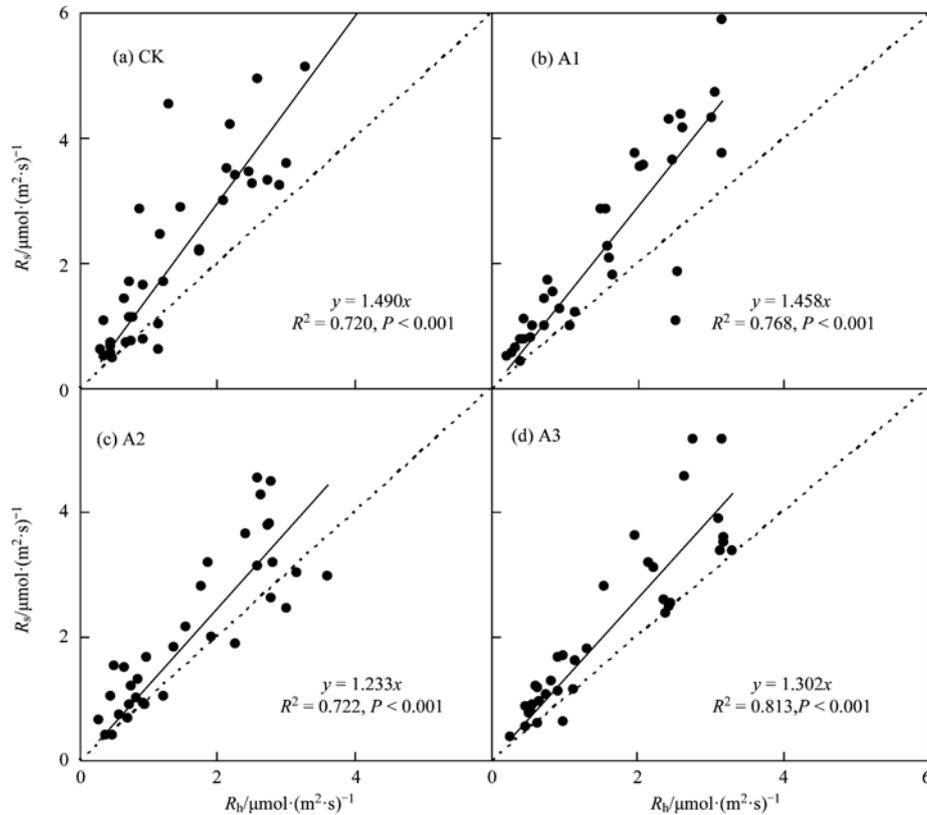


图 4 土壤呼吸 (R_s) 与异养呼吸 (R_h) 的关系

Fig. 4 Relationship between soil respiration and heterotrophic respiration

2.3 土壤呼吸、异养呼吸的季节变异与土壤温度、土壤湿度的关系

回归分析表明, 不断根小区 CK、A1、A2、A3 处理的土壤呼吸与该小区的土壤温度之间呈极显著的指数回归关系(图 5), 这 4 个小区的回归方程的决定系数 R^2 分别为 0.757、0.794、0.816、0.849, 这表明土壤温度可分别解释这 4 个小区土壤呼吸 75.7%、79.4%、81.6%、84.9% 的季节变异. 根据指数回归方程估算得到的 CK、A1、A2、A3 处理的土壤呼吸的温度敏感系数(温度每升高 10°C , 土壤呼吸改变为原来的倍数)分别为 2.54、2.55、2.43、2.56. 断根小区 CK、A1、A2、A3 处理的异养呼吸与该小区的土壤温度之间也表现为极显著的指数回归关系(图 6), 土壤温度可分别解释这 4 个断根小区异养呼吸 68.1%、66.6%、78.1%、76.3% 的季节变异. 根据指数回归方程估算得到的 CK、A1、A2、A3 处理的异养呼吸的温度敏感系数(温度每升

高 10°C , 土壤呼吸改变为原来的倍数)分别为 2.22、2.48、2.46、2.39. 除 A2 处理外, 土壤呼吸的温度敏感系数均高于异养呼吸, 这可能是由于土壤呼吸中的根呼吸组分的温度敏感性较高所致.

根据土壤呼吸、异养呼吸与土壤温度的指数回归关系, 可计算得到土壤呼吸、异养呼吸相对于回归方程模拟值的残差值. 将土壤呼吸、异养呼吸的残差与土壤湿度因子作散点图, 可见土壤呼吸、异养呼吸的残差值与土壤湿度之间不存在显著的回归关系(图 7、图 8), 这表明土壤湿度对土壤呼吸、异养呼吸的季节动态变化总体上无显著影响.

3 讨论

3.1 模拟酸雨对土壤呼吸及异养呼吸的影响

以往关于模拟酸雨对土壤呼吸的影响的研究结果具有较大的争议, 在添加模拟酸雨的条件下, 土壤呼吸减少、增加、不受影响的结果均有报道^[23, 24],

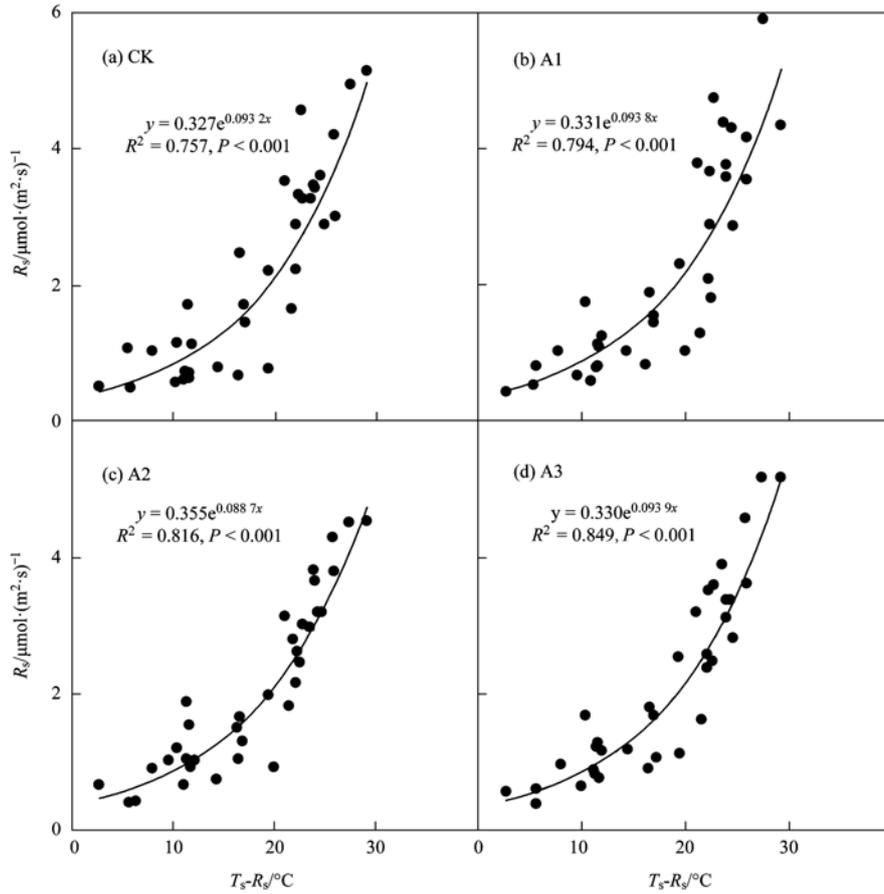


图5 土壤呼吸(R_s)与土壤温度(T_s-R_s)的关系

Fig. 5 Relationship between soil respiration and soil temperature

例如,Will 等^[25]发现土壤呼吸不受模拟酸雨的影响;一项针对酸性灰化土的研究表明,模拟酸雨抑制了土壤呼吸^[26],这种抑制作用可能是由于高氢离子载荷对土壤微生物产生的毒性所致;Salonius 报道^[27],低模拟酸雨强度反而促进了土壤呼吸.另外,在以往的研究中,关于土壤呼吸如何影响异养呼吸的结果尚未见报道.在本研究中,模拟酸雨对土壤呼吸和异养呼吸均无明显的影响.

以往的研究以及本研究中发现的这些不一致的研究结果可能与以下几方面的原因有关.首先,土壤是一个巨大的缓冲体系,对酸性物质的输入具有很强的缓冲作用,那么酸性物质对土壤微生物的影响作用被抵消掉一部分,因而模拟酸雨对土壤呼吸的影响就表现得不明显.第二,模拟酸雨对土壤各组分的影响表现为不同的规律,模拟酸雨增大了异养呼吸在土壤呼吸中的百分比,由此表明模拟酸雨减小了根呼吸(自养呼吸)占土壤呼吸的比例.第三,在长期模拟酸雨作用下,土壤微生物可能对酸雨的添加产生了适应性,因而从宏观层面上土壤呼吸和异养呼吸对模拟酸雨则无明显的响应规律.第

四,模拟酸雨的影响效应取决于土壤生物区系和微环境. Vanhala 等指出^[23],亚寒带土壤中的微生物对酸雨的响应比温带土壤的微生物更强,他们还发现,贫营养森林土壤呼吸比养分更为丰富的森林土壤呼吸对酸雨的响应更为敏感.

3.2 土壤呼吸与异养呼吸之比

断根法是区分森林土壤呼吸组分的最常见的方法之一,由于其较为简单、可靠,因而得到了广泛应用^[28].本研究表明,不同酸雨处理下土壤呼吸与异养呼吸的关系均可用正比例函数表达,CK、A1、A2、A3 处理的土壤呼吸与异养呼吸之比分别为 1.490、1.458、1.233、1.302,则反之可见,CK、A1、A2、A3 处理的异养呼吸占土壤呼吸的比例分别为 61.6%、63.6%、75.2%、72.7%,本研究中异养呼吸占土壤呼吸的比例与以往的研究具有一致性.本研究中 CK 处理异养呼吸占土壤呼吸的比例在以往报道的范围之内,Bond-Lamberty 等^[29]的研究表明,就全球尺度而言,异养呼吸与土壤呼吸存在内在的联系,土壤呼吸中异养呼吸所占的比例在 50%~70% 的范围之内^[30, 31];中国陆地生态系统土壤呼

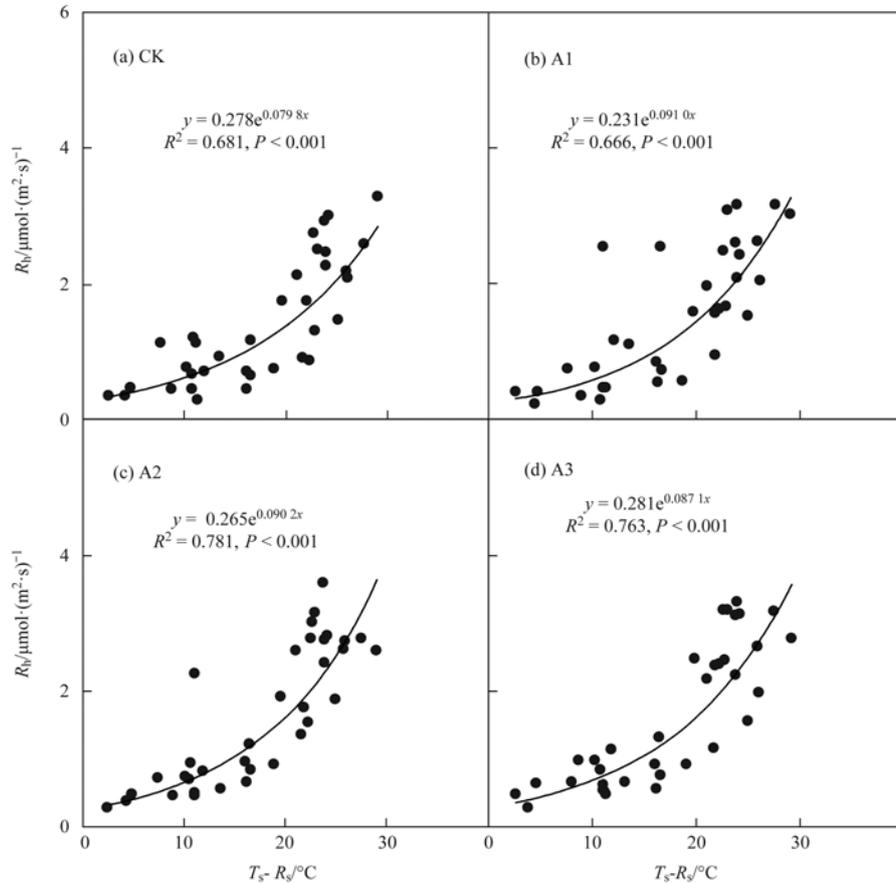


图6 异养呼吸(R_h)与土壤温度($T_s - R_h$)的关系

Fig. 6 Relationship between heterotrophic respiration and soil temperature

吸中异养呼吸所占比例为 34% ~ 94%, 其平均值为 65% [32], 这些结果与本研究结果较为接近。

3.3 土壤水热条件对呼吸的影响

土壤温度是影响土壤呼吸和异养呼吸季节性动态变化的最主要的因素, 土壤呼吸和异养呼吸均为酶促反应, 而土壤温度是影响酶促反应的重要因素, 温度升高往往会导致酶促反应加快, 从而促进土壤呼吸和异养呼吸 [33, 34]。本研究中土壤呼吸及异养呼吸的温度敏感系数与 Raich 等 [30] 关于全球土壤呼吸的温度敏感系数的结果 ($Q_{10} = 2.4$) 非常接近, 但高于 Liang 等 [35] 在鼎湖山亚热带森林观测得到的土壤呼吸的温度敏感系数。Peng 等 [36] 的数据集成研究表明, 中国针阔混交林的土壤呼吸温度敏感系数在 1.82 ~ 3.74 之间变异, 本研究中的温度敏感系数在该范围之内, 接近于其均值。Hamdi 等认为 [37], 就全球范围的森林而言, 土壤呼吸的温度敏感系数的均值为 2.5, 这也与本研究结果一致。

除 A2 处理外, 土壤呼吸的温度敏感系数均高于异养呼吸, 土壤呼吸既包含异养呼吸组分, 还包含根呼吸(自养呼吸)组分, 大量研究表明, 根呼吸比

异养呼吸具有更高的温度敏感系数 [38~40], 因而异养呼吸的温度敏感系数低于土壤呼吸的温度敏感系数。

本研究未发现土壤湿度与土壤呼吸和异养呼吸残差值的直接回归关系, 这说明土壤湿度对土壤呼吸和异养呼吸无显著影响, 这一方面是由于观测期间土壤湿度的季节变异性较小(土壤湿度的变异范围为 3.8% ~ 20.3%), 且在观测期间未出现土壤湿度的极端低值和极端高值; 另一方面是由于土壤湿度这一因子已经可解释土壤呼吸和异养呼吸大部分的季节性变异, 因而湿度因子的作用相对减小。

4 结论

(1) 在本研究阶段内, 断根小区的异养呼吸速率显著低于不断根小区的土壤呼吸速率。模拟酸雨对土壤呼吸及异养呼吸无显著的促进或抑制作用。

(2) CK、A1、A2、A3 处理中土壤呼吸与异养呼吸的比例分别为 1.490、1.458、1.233、1.302。模拟酸雨降低了土壤呼吸与异养呼吸之比。

(3) 土壤温度是影响土壤呼吸及异养呼吸季节

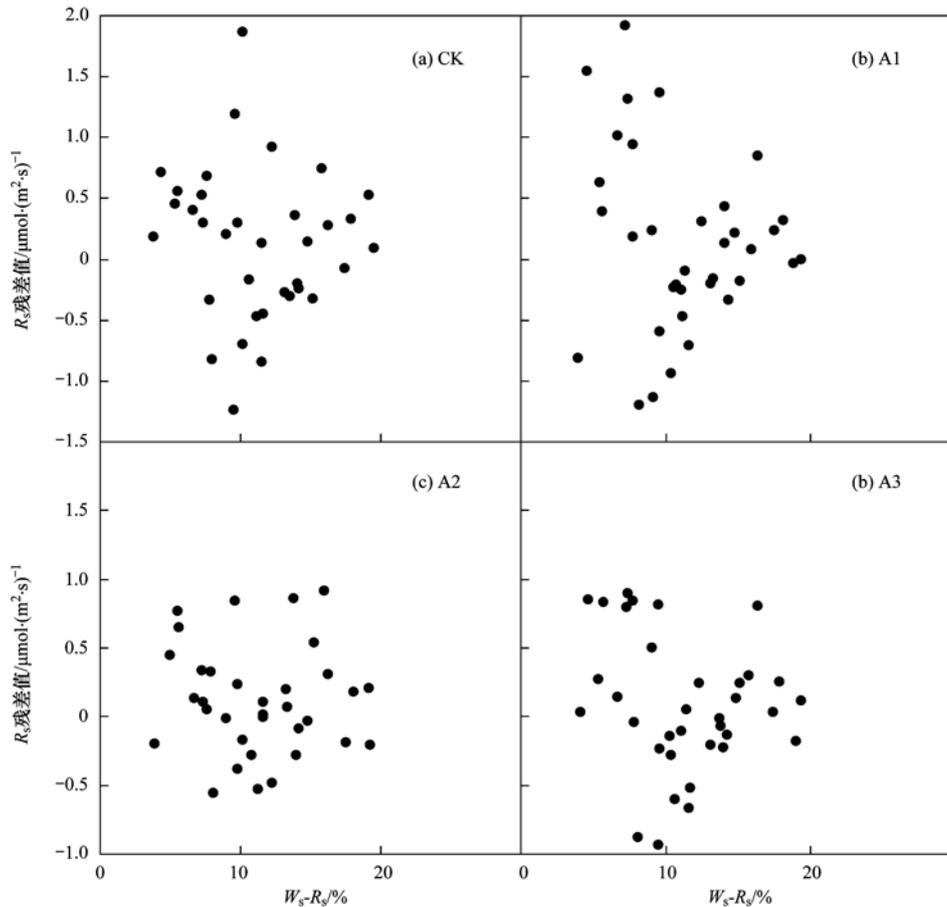


图7 土壤呼吸(R_s)的残差值与土壤湿度(W_s-R_s)的关系

Fig. 7 Relationship between the residual value of soil respiration and soil moisture

性变异的最关键因子,其关系可用指数回归方程描述;土壤湿度对土壤呼吸及异养呼吸均无显著影响.此外,模拟酸雨对土壤呼吸及异养呼吸的温度敏感性亦无显著影响.

参考文献:

- [1] 王文兴, 许鹏举. 中国大气降水化学研究进展[J]. 化学进展, 2009, **21**(2-3): 266-281.
Wang W X, Xu P J. Research progress in precipitation chemistry in China[J]. Progress in Chemistry, 2009, **21**(2-3): 266-281.
- [2] Zhang X Y, Jiang H, Jin J X, *et al.* Analysis of acid rain patterns in northeastern China using a decision tree method[J]. Atmospheric Environment, 2012, **46**: 590-596.
- [3] 赵艳霞, 侯青. 1993-2006年中国区域酸雨变化特征及成因分析[J]. 气象学报, 2008, **66**(6): 1032-1042.
Zhao Y X, Hou Q. An analysis on spatial/temporal evolution of acid rain in China (1993-2006) and its causes [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, **66**(6): 1032-1042.
- [4] 童贯和, 程滨, 胡云虎. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗生物量和某些生理活动的影响[J]. 作物学报, 2005, **31**(9): 1207-1214.
Tong G H, Cheng B, Hu Y H. Effect of simulated acid rain and its acidified soil on the biomass and some physiological activities of wheat seedlings[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, **31**(9): 1207-1214.
- [5] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 等. 臭氧和模拟酸雨对冬小麦气体交换、生长和产量的复合影响[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(9): 1542-1548.
Zhang Q W, Wang X K, Feng Z Z, *et al.* Combined impact of ozone and simulated acid rain on gas exchange, growth and yield of field-grown winter wheat[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, **27**(9): 1542-1548.
- [6] Reich P B, Schoettle A W, Stroo H F, *et al.* Effects of ozone and acid rain on white pine (*Pinus strobus*) seedlings grown in five soils. III. Nutrient relations [J]. Canadian Journal of Botany, 1988, **66**(8): 1517-1531.
- [7] Wright L M, Lockaby L B G, Meldahl R, *et al.* The influence of acid precipitation and ozone on nitrogen nutrition of young loblolly pine[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1990, **54**(1): 135-142.
- [8] Penman T, Fritze H, Vanhala P, *et al.* Structure of a microbial community in soil after prolonged addition of low levels of simulated acid rain [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**(6): 2173-2180.
- [9] Hans M S, Zhao D W, Xiong T L, *et al.* Acidic deposition and its effects in southwestern China [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1995, **85**(4): 2301-2306.
- [10] De Vries W, Posch M, Kämäri J. Simulation of the long-term soil response to acid deposition in various buffer ranges [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1989, **48**(3-4): 349-390.

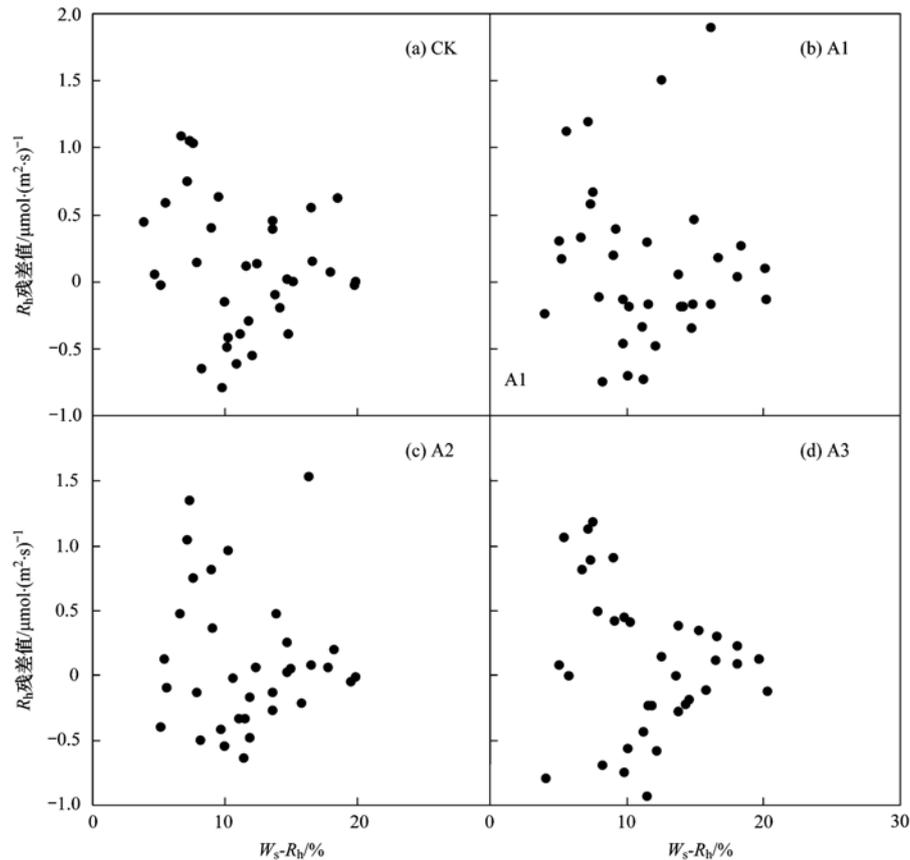


图 8 异养呼吸 (R_h) 的残差值与土壤湿度 ($W_s - R_h$) 的关系

Fig. 8 Relationship between the residual value of heterotrophic respiration and soil moisture

- [11] Turner D P, Tingey D T. Foliar leaching and root uptake of Ca, Mg and K in relation to acid fog effects on Douglas-fir [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1990, **49** (1-2): 205-214.
- [12] Reddy G B, Reinert R A, Eason G. Enzymatic changes in the rhizosphere of loblolly pine exposed to ozone and acid rain [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, **23** (12): 1115-1119.
- [13] Zhang J E, Ouyang Y, Ling D J. Impacts of simulated acid rain on cation leaching from the Latosol in south China [J]. *Chemosphere*, 2007, **67** (11): 2131-2137.
- [14] 张新明, 张俊平, 刘素萍, 等. 模拟酸雨对荔枝园土壤氮素迁移和土壤酸化的影响 [J]. *水土保持学报*, 2006, **20** (6): 18-21.
- Zhang X M, Zhang J P, Liu S P, *et al.* Effects of simulated acid rain on nitrogen transplant and acidifying potential in litchi orchard soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, **20** (6): 18-21.
- [15] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. *Nature*, 2010, **464** (7288): 579-582.
- [16] Hashimoto S, Carvalhais N, Ito A, *et al.* Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database [J]. *Biogeosciences*, 2015, **12** (13): 4121-4132.
- [17] Chen S T, Zou J W, Hu Z H, *et al.* Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics; summary of available data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **198-199**: 335-346.
- [18] Qiu D L, Liu X H, Guo S Z. Effects of simulated acid rain on fertility of litchi [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, **17** (6): 1034-1037.
- [19] Liang G H, Hui D F, Wu X Y, *et al.* Effects of simulated acid rain on soil respiration and its components in a subtropical mixed conifer and broadleaf forest in southern China [J]. *Environmental Sciences; Processes & Impacts*, 2016, **18** (2): 246-255.
- [20] Lavigne M B, Boutin R, Foster R J, *et al.* Soil respiration responses to temperature are controlled more by roots than by decomposition in balsam fir ecosystems [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, **33** (9): 1744-1753.
- [21] Mäkiranta P, Riutta T, Penttilä T, *et al.* Dynamics of net ecosystem CO_2 exchange and heterotrophic soil respiration following clearfelling in a drained peatland forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150** (12): 1585-1596.
- [22] 梁骏, 郑有飞, 唐信英, 等. 南京江北酸雨分布特征及其与气象条件的关系 [J]. *环境科学与技术*, 2009, **32** (6): 96-100.
- Liang J, Zheng Y F, Tang X Y, *et al.* Distribution characteristics of acid rain and its relation with meteorological conditions in north bank of Yangtze river, Nanjing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **32** (6): 96-100.
- [23] Vanhala P, Fritze H, Neuvonen S. Prolonged simulated acid rain treatment in the subarctic; effect on the soil respiration rate and microbial biomass [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, **23** (1): 7-14.

- [24] Vanhala P. Seasonal variation in the soil respiration rate in coniferous forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(9): 1375-1379.
- [25] Will M E, Graetz D A, Roof B S. Effect of simulated acid precipitation on soil microbial activity in a typic quartzipsamment [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1986, **15**(4): 399-403.
- [26] Zelles L, Scheunert I, Kreutzer K. Effect of artificial irrigation, acid precipitation and liming on the microbial activity in soil of a spruce forest[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1987, **4**(3): 137-143.
- [27] Saloniemi P O. Respiration rates in forest soil organic horizon materials treated with simulated acid rain[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, **20**(7): 910-913.
- [28] Bond-Lamberty B, Bronson D, Bladyka E, *et al.* A comparison of trenched plot techniques for partitioning soil respiration [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(10): 2108-2114.
- [29] Bond-Lamberty B, Wang C K, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(10): 1756-1766.
- [30] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B*, 1992, **44**(2): 81-99.
- [31] 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.
- [32] 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.
- Xie W, Chen S T, Hu Z H. Factors influencing the variability in soil heterotrophic respiration from terrestrial ecosystem in China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 334-340.
- [33] Guntiñas M E, Gil-Sotres F, Leirós M C, *et al.* Sensitivity of soil respiration to moisture and temperature [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, **13**(2): 445-461.
- [34] Liu Y C, Liu S R, Wan S Q, *et al.* Differential responses of soil respiration to soil warming and experimental throughfall reduction in a transitional oak forest in central China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, **226-227**: 186-198.
- [35] Liang G H, Liu X Z, Chen X M, *et al.* Response of soil respiration to acid rain in forests of different maturity in southern china[J]. *PLoS One*, 2013, **8**(4): e62207.
- [36] Peng S S, Piao S L, Wang T, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(5): 1008-1014.
- [37] Hamdi S, Moyano F, Sall S, *et al.* Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **58**: 115-126.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Conant R T, Ryan M G, Ågren G I, *et al.* Temperature and soil organic matter decomposition rates-synthesis of current knowledge and a way forward[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(11): 3392-3404.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-ru, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)