

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析	刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)
杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征	陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)
气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响	杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)
龙凤山本底站大气 CO ₂ 数据筛分及浓度特征研究	栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)
区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响	苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)
天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究	张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)
铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征	梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)
KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究	沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)
污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)
基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究	白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)
1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应	张柏发, 陈丁江 (2911)
南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究	蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)
三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)
岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)
亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究	张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)
藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究	肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)
广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究	刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)
铜陵相思河流域重金属分布特征研究	陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)
不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究	王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)
酸性条件下Ti(IV)催化 O ₃ /H ₂ O ₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯	高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)
无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响	施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)
羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究	方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)
不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀	鲍国栋, 左剑恶, 王雅娟, 千里里 (3002)
微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究	王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)
不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究	张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)
SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究	刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)
SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究	张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)
曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响	陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)
限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究	刘文如, 阴芳芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)
UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究	李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)
开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用	陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)
北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险	段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)
珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险	朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娴 (3066)
温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应	齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)
不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响	刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)
低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响	黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)
EDTA 与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究	尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)
不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N ₂ O 排放的关系	陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)
黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N ₂ O 产生的不同过程及贡献	孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)
猪粪化肥配施对双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放及其全球增温潜势的影响	王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)
我国北方两地区环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响	袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)
丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应	王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)
丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响	李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)
含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响	雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)
重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准	王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)
维生素 B ₁₂ 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究	刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)
己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性	徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)
多溴联苯醚在市場鲫鱼体内分布和食鱼暴露量	王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)
稀有鮐鲫 HMGR 基因全长克隆及雌鱼经五氯酚暴露基因表达的分析	邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)
藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响	何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)
多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制	李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)
生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响	崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)
经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例	李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)
中国铅流改变原因分析	马兰, 毛建素 (3219)
放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨	汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)
中国水体硝酸盐氮双稳定同位素溯源研究进展	徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)
《环境科学》征稿简则 (2936) 《环境科学》征订启事 (3051) 信息 (2882, 2927, 3059, 3218)	

不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N_2O 排放的关系

陈玲, 范会, 蒋静艳*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 通过室内培养实验, 研究了不同生态系统土壤生化特征及其对土壤呼吸和 N_2O 排放的影响. 结果表明, 不同生态系统土壤的生化特征不同, 土壤呼吸和 N_2O 排放也不相同. 一般果园细菌数量最多, 草地放线菌数量最多, 林地真菌数量最多, 而竹园细菌放线菌数量最少, 果园真菌最少; 微生物碳氮含量一般果园 > 林地 > 农田. 相关分析表明细菌数量与微生物碳氮呈显著正相关, 放线菌数量与土壤有机碳和全氮含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而真菌数量仅与全氮含量呈显著正相关 ($P < 0.05$). 土壤呼吸累积排放量从高到低为果园 > 竹林 > 农田 > 林地 > 草地. N_2O 累积排放量为农田 > 果园 > 草地 > 林地 > 竹林. 土壤呼吸与细菌、微生物碳氮呈显著正相关 ($P < 0.05$); 土壤的 N_2O 排放与三大微生物、铵态氮呈显著正相关 ($P < 0.05$). 逐步回归分析表明土壤呼吸主要取决于土壤细菌数量和 pH 的变化; 土壤 N_2O 排放主要取决于土壤细菌数量和铵态氮含量的变化.

关键词: 土壤理化特性; 土壤微生物; 土壤呼吸; N_2O 排放

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3102-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.08.038

Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N_2O Emission

CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan

(College of Resource and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The biochemical characteristics of soil in different ecological system and their effects on soil respiration (CO_2) and nitrous oxide (N_2O) emission were investigated by an indoor incubation method. The results showed that the biochemical characteristics of soils in the different ecosystems and CO_2 and N_2O emissions from different soils greatly varied with each other. In general, the highest abundance of bacteria was found in the orchard soil, the highest abundance of actinomycetes occurred in the meadows and the highest abundance of fungi appeared in the woodlands. The abundance of bacteria or actinomycetes in the bamboo soil was the lowest among all soils, and the orchard soil had the lowest content of fungi. The contents of soil microbial biomass carbon and nitrogen generally followed the order of orchard soil > woodland > cropland. Moreover, cumulative CO_2 and N_2O emissions from the different soils followed the order of orchard soil > bamboo soil > farmland > woodland > grassland and farmland > orchard > grassland > woodland > bamboo soil, respectively. Correlation analysis indicated that there was positive correlations between the abundance of soil bacteria and the contents of microbial biomass carbon and nitrogen, as well as between the abundance of soil fungi and the soil total nitrogen content ($P < 0.05$), while the abundance of soil actinomycosis was positively correlated with soil organic carbon and total nitrogen contents ($P < 0.01$). The soil bacteria, microbial carbon and nitrogen had a significant positive impact on soil respiration ($P < 0.05$), and soil bacteria, actinomycetes, fungi and ammonium nitrogen had the same impact on N_2O emissions ($P < 0.05$). Stepwise regression analysis suggested that soil respiration could be quantitatively determined by a linear combination of soil bacteria and soil pH, while N_2O emission was mainly dependent on the values of soil bacteria and ammonium nitrogen.

Key words: soil properties; soil microorganism; soil respiration; N_2O emission

土壤呼吸主要指生物氧化有机物和根系呼吸产生的二氧化碳向大气释放的过程, 是土壤碳以气体形式进入大气的主要途径, 是全球碳循环的一个重要组成部分. N_2O 是重要的温室气体之一, 不仅能直接导致温室效应, 还能在平流层中参与光化学反应, 破坏臭氧层^[1]. N_2O 主要产生于土壤微生物硝化和反硝化过程, 其排放占人为 N_2O 排放的 60%^[2]. 植物根系密度、土壤微生物、土壤类型、土壤温度、水分含量、种植制度和耕作措施等因素都会影响土

壤呼吸和 N_2O 的排放^[3~7]. 土壤呼吸和 N_2O 排放都是生物过程尤其是微生物过程占主导作用, 不同生态系统土壤中的微生物种类、数量及活性碳氮都有很大差异^[8~10]. 李世清等^[8] 分别采取森林、草原、

收稿日期: 2013-12-18; 修订日期: 2014-03-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2010CB950604); 国家自然科学基金项目 (41375150)

作者简介: 陈玲 (1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染与全球变化, E-mail: lingling8997@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lilacjy@njau.edu.cn

草甸和农田土壤,测定其微生物氮,发现不同生态系统土壤中的微生物氮存在显著差异,表现为森林土壤 > 草甸土壤 > 草原土壤 > 农田土壤,自然植被土壤远高于农田土壤. 目前国内外关于土壤性质对土壤呼吸和 N_2O 排放影响的研究多见于单一生态系统,而且以研究土壤理化性质与 N_2O 排放关系为主^[11~14],如徐华等^[12]通过对不同土壤质地的小麦和棉花田的研究得出, N_2O 排放强度依次为壤土 > 砂土 > 黏土;黄耀等^[11]发现麦田土壤 N_2O 排放与有机碳、C/N 呈极显著负相关,与 pH 呈极显著正相关; Pilegaard 等^[13]通过对欧洲不同国家包括针叶林和阔叶林等 15 个站点的林地土壤 N_2O 排放测定,也发现 N_2O 排放与土壤 C/N 比呈显著负相关. 关于土壤理化性质与 CO_2 排放关系的报道较少,La Scala 等^[15]的研究结果得出巴西热带裸土 CO_2 排放与土壤碳含量和阳离子交换量呈正相关,与游离铁含量呈负相关. 另外, Gødde 等^[16]分别采集德国不同地点包括森林、农田和草地三大生态系统类型共 20 个土壤,在恒温恒湿培养条件下研究其 NO 和 N_2O 变化情况,并找出土壤 pH、有效氮、土壤质地等为影响 NO 和 N_2O 排放的重要因子,据此将土壤分成了三大类型,分别代表 NO 和 N_2O 排放高、中、低水平. 但关于不同生态系统土壤生化特征对土壤呼吸和 N_2O 排放同步影响的研究尚不多见. Butterbach-Bahl 等^[17]的最新综述也认为获取不同生态系统的 N_2O 排放数据及了解其主要控制因子并建立生物地球化学模型非常重要. 本研究主要是通过室内培养实验,分析不同生态系统土壤理化性质及微生物特征差异,找出影响土壤呼吸和 N_2O 排放的主要驱动因子,以期了解不同生态系统土壤生化特征、正确评价和估算不同生态系统土壤呼吸和 N_2O 的排放提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样地概况

江苏省位于中国大陆东部沿海,介于东经 $116^{\circ}18' \sim 121^{\circ}57'$,北纬 $30^{\circ}45' \sim 35^{\circ}20'$ 之间. 江苏地处中国东部,地形以平原为主,绝大部分地区在海拔 50 m 以下,境内降雨年径流深在 150 ~ 400 mm 之间,平均气温介于 $13 \sim 16^{\circ}C$,最冷月为 1 月,平均气温 $-1.0 \sim 3.3^{\circ}C$,7 月份为最热月,平均气温 $26.0 \sim 28.8^{\circ}C$. 地理上跨越南北,气候、植被也同样同时具有南方和北方的特征. 生态系统主要分为自然生态系统和人工生态系统,江苏省常见的自然生态

系统以陆地生态系统为主,包括林地、草地和湿地,而常见的人工生态系统以农田、果园和竹林为主.

1.2 供试材料

考虑温度对土壤微生物指标的影响,笔者选择 2013 年 1 月(江苏省最冷月)采集了 12 个供试土壤,分别代表江苏省境内不同生态系统下的土壤,采样地点如图 1 所示,其中徐州 1 个,土壤样品代码分别为 A1; 连云港 2 个,样品代码分别为 B1 和 B2; 涟水 3 个,样品代码分别为 C1、C2 和 C3; 盐城 1 个,样品代码为 D1; 南京 3 个,样品代码分别为 E1、E2 和 E3; 宜兴 1 个,样品代码为 F1; 洪泽 1 个,样品代码为 G1. 根据生态系统的不同,这些土壤中包括了林地、农田、草地、果园及竹林等具体土壤类型及地表植被见表 1.



图 1 采样地点示意

Fig. 1 Locations of the 12 sampling sites

土壤采自表层 0 ~ 20 cm,从野外采回后,立即除去植物残体等杂物,取一部分新鲜土样,置于 $4^{\circ}C$ 冰箱中冷藏,供土壤微生物、有效态 N 指标的测定,另取一部分土样风干后过筛,供土壤 pH 值、质地、有机碳、全氮的测定. 供试土壤基本理化性质见表 1. 其中各参数的变异系数范围为 19.0% ~ 136.7%,变化范围较宽,说明各供试土壤理化性质差异较大,具有较广泛的代表性.

1.3 实验方法

1.3.1 土壤理化性质及微生物特征的测定

土壤理化性质按照文献[18]测定:pH 值用电位法(水土比 2.5:1)测定;土壤质地用吸管法测定;土壤有机碳(SOC)用重铬酸钾氧化-容量法测定;全氮(TN)用开氏消煮法测定;铵态氮用靛酚蓝

表 1 供试土壤理化特性

Table 1 Physical and chemical properties of the air-dried soil samples										
样品号	土壤类型	利用方式 (植被)	pH(H ₂ O)	<0.01 mm 土粒/%	有机碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	C/N	NH ₄ ⁺ -N含量 /mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N含量 /mg·kg ⁻¹	有效氮 /mg·kg ⁻¹
A1	褐土	农田(甘薯)	8.58	63.6	4.69	0.49	9.5	3.5	3.2	6.7
B1	棕壤	农田(小麦)	5.54	57.5	8.81	1.28	6.9	8.3	17.2	25.6
B2	棕壤	林地(松树)	5.14	13.9	13.66	0.89	15.3	9.5	2.5	12.1
C1	潮土	果园(梨)	8.71	14.1	6.31	0.60	10.5	6.8	5.7	12.5
C2	潮土	农田(蔬菜)	8.97	14.4	3.77	0.30	12.4	15.1	2.0	17.1
C3	潮土	果园(苹果)	8.44	26.0	8.20	0.82	10.0	12.3	18.5	30.8
D1	滨海盐土	草地(杂草)	8.20	31.2	3.97	0.74	5.4	16.0	48.5	64.5
E1	黄棕壤	林地(松树)	7.03	60.2	18.17	1.54	11.8	16.5	6.4	22.9
E2	黄褐土	林地(槐树)	6.82	64.0	6.62	0.52	12.6	2.0	2.6	4.6
E3	黄棕壤	农田(水稻)	7.32	67.8	22.09	2.09	10.6	64.2	7.8	72.0
F1	棕红壤	竹林(竹)	5.25	55.1	12.58	0.92	13.6	14.6	0.6	15.2
G1	草甸土	草地(杂草)	8.09	72.6	22.99	2.27	10.1	17.9	3.3	21.1
平均值			7.34	45.0	10.99	1.04	10.7	15.5	9.9	25.4
变异系数 CV/%			19.0	51.4	62.7	60.8	25.5	104.1	136.7	84.4

比色法测定;硝态氮用紫外分光光度法测定^[19].

土壤微生物碳氮的测定,称取过 2 mm 孔筛的新鲜土壤 25.00 g,于抽真空干燥器中熏蒸 24 h,加 100 mL 0.5 mol·L⁻¹的硫酸钾溶液振荡 30 min 后过滤.同时做未熏蒸对照与空白对照,3 次重复.浸提液立即测定或在 -18℃ 下保存.微生物碳(MC)用重铬酸钾外加热法测定,微生物碳计算公式为: $C_{mic} = E_c/0.38$ ^[18].微生物氮(MN)用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定^[20,21],微生物氮计算公式为: $N_{mic} = E_N/0.45$ ^[18].土壤微生物计数采用稀释平板涂布法^[22,23],每个土样稀释至合适浓度,3 次重复.细菌用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,放线菌用高氏一号培养基,真菌用马丁-孟加拉红培养基.

1.3.2 室内培养实验

本实验为室内培养实验,将供试土样过 1 mm 孔筛后称取 100 g(以烘干土重计)置于 590 mL 的玻璃瓶内,调节并保持土壤水分为 0.30 g·g⁻¹,置于 25℃ 培养箱中培养.每种土样 3 个重复,恒温(25℃)恒湿(重量法调节)培养,至每种土样的 CO₂ 和 N₂O 气体连续 3 次排放速率无差异为止,共培养了 20 d.

N₂O 的排放速率和土壤呼吸速率测定采用间歇密闭培养-气相色谱法.每天采样 1 次,每次取样前抽取背景样品,并用胶塞封口,密闭培养 2~4 h,通过 60 mL 的注射器外接三通开关从培养瓶上部空间抽取气体样品 20 mL 后,移掉瓶塞,重新敞口培养,直至下一次测定.气体样品用改装的 Agilent 4890D 气相色谱仪同步测定 N₂O 和 CO₂ 的浓度^[24].N₂O 测定所用载气为 99.999% 高纯氩甲烷(Ar₂:CH₄ = 95

:5),检测器为电子捕获检测器(ECD),检测温度为 330℃.CO₂ 测定所用载气为 99.999% 高纯氮,检测器为氢火焰检测器(FID),检测温度为 200℃.根据气体分子量、培养温度、培养容器内气体的有效空间、培养时间内气体浓度差及培养容器内的烘干土质量计算各气体排放速率,具体计算公式如下:

$$F = \Delta m / (W \cdot \Delta t) = \rho \cdot V \cdot \Delta c / (W \cdot \Delta t)$$

式中, F 为气体排放速率; ρ 为气体密度(g·L⁻¹), $\rho = (\text{气体分子量} \times 273) / [22.4 \times (273 + T)]$; V 为培养容器内气体的有效空间(L); Δt 为培养时间(h); Δc 为 Δt 时间内的气体浓度差; W 为培养容器内的烘干土质量(g); T 为培养温度(℃).

CO₂ 和 N₂O 的累积排放量由其每天平均排放速率和培养时间累积计算得出.

1.4 数据处理

实验结果表示为重复的平均值 ± 标准误.图表制作采用 EXCEL 软件,用 SPSS 16.0 进行方差分析和相关分析,用 Duncan 法进行处理间多重比较.

2 结果与分析

2.1 不同土壤微生物数量及微生物碳氮含量的差异

图 2 所示的是 12 种不同土壤各微生物数量及微生物碳氮含量.方差分析表明,不同土壤的微生物数量及碳氮含量具有极显著性差异($P < 0.001$).细菌数量 C3 最多,B2 最少;放线菌数量 G1 最多,B2 最少;真菌数量 E3 最多,C2 最少.而微生物碳氮含量 C3 最高,E2 最低. C3 为苹果园,微生物碳氮及细菌数量较高可能与土壤肥力较高有关. E2 为槐树林,土壤肥力可能较低.对于同一种土壤类

型, 植被不同, 不同微生物数量及微生物碳氮不同. 如 C1、C2 和 C3 同为潮土, 但苹果园与梨园的微生物碳氮及真菌数量均显著高于农田, 而细菌、放线菌、真菌三者之和是苹果园 > 农田 > 梨园 ($P < 0.05$). 根据植被的不同, 进一步计算各生态系统的不同微生物数量及微生物碳氮含量的平均值. 细菌、放线菌和真菌平均数量分别为果园、草地和林地最多, 细菌和放线菌皆是竹林最少, 真菌为果园最少. 微生物碳平均含量是果园 > 竹林 > 林地 > 农田 > 草地. 微生物氮平均含量为果园 > 草地 > 林地 > 竹林 > 农田. 除了草地和竹林以外, 不同生态系统土壤的微生物碳氮含量的高低趋势相同, 都是果园 > 林地 > 农田, 这与汪文霞等^[25]的研究结果林地 > 农田相类似. 从总体上看, 微生物碳氮含量略低于其他研究者的一些报道^[25,26], 这可能与采样时间为江苏省最冷的时间 1 月有关, 这个时期微生物活性小, 导致微生物碳氮含量较低.

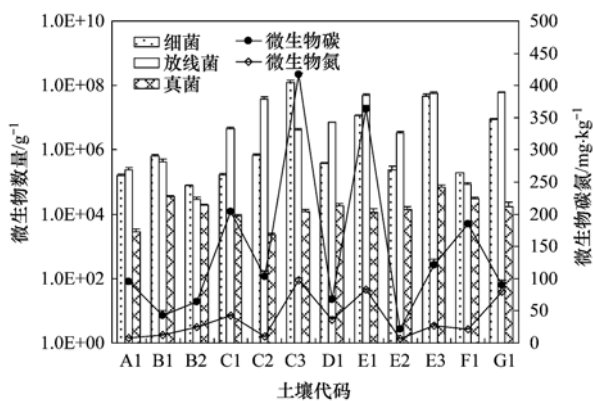


图2 不同土壤的细菌、放线菌、真菌数量及微生物碳氮含量变化

Fig. 2 Variations in the abundances of bacteria, actinomycetes, fungi and microbial carbon and nitrogen contents in different soils

2.2 不同土壤间土壤呼吸和 N_2O 排放的差异分析

图3所示的是3种代表性土壤的土壤呼吸和 N_2O 排放随培养时间的动态变化趋势. C3、E3 和 E2 分别作为土壤呼吸高、中、低3个水平的代表, 而 E3、G1 和 E2 分别作为 N_2O 排放速率高、中、低3个水平的代表. 从中可以看出, C3 和 E3 的土壤呼吸及 E3 和 G1 的 N_2O 排放速率随培养时间的动态变化趋势基本一致, 土壤呼吸速率高峰出现在培养后的第1~2 d, 然后呈现逐渐下降的趋势; N_2O 排放峰值出现在培养的第8~9 d, 然后呈现逐渐下降的趋势; E2 土壤呼吸和 N_2O 排放速率在培养时间内变化幅度不大, 没有出现明显的排放高峰. 在培养15 d之后, 各处理土壤呼吸和 N_2O 排放速率达到恒定值, 基本没有变化.

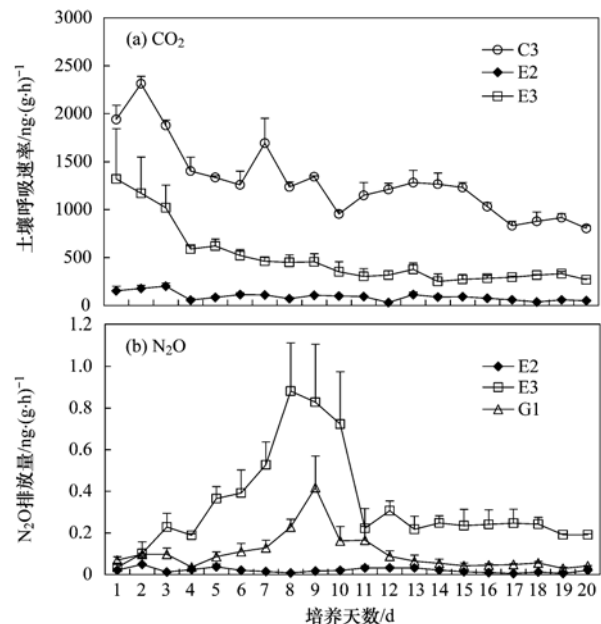


图3 代表性土壤 CO_2 和 N_2O 排放速率的动态变化

Fig. 3 Variations in CO_2 and N_2O emission rates of typical soils under simulated incubation conditions

进一步计算不同土壤的土壤呼吸和 N_2O 累积排放量(表2). 由表2可以看出, 不同土壤的土壤呼吸和 N_2O 累积排放量各不相同. C3 的土壤呼吸累积排放显著高于其他土壤 ($P < 0.05$), A1、D1、E2 的土壤呼吸累积排放显著低于其他土壤 ($P < 0.05$). E3 的土壤 N_2O 累积排放显著高于 C3 ($P < 0.05$), 其他各土壤 N_2O 累积排放之间没有显著差异 ($P > 0.05$). 根据生态系统的不同, 进一步计算, 得到不同生态系统的土壤呼吸和 N_2O 累积排放量的平均值. 土壤呼吸平均累积排放量从高到低是: 果园 [$(371.95 \pm 240.97) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$], 竹林 [$(221.22 \pm 12.64) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$], 农田 [$(156.48 \pm 35.96) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$], 林地 [$(147.13 \pm 52.84) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$], 草地 [$(93.53 \pm 50.45) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$]. N_2O 平均累积排放量从高到低是: 农田 [$(62.86 \pm 31.68) \text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$], 果园 [$(51.23 \pm 28.72) \text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$], 草地 [$(29.91 \pm 19.05) \text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$], 林地 [$(28.35 \pm 9.47) \text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$], 竹林 [$(10.63 \pm 0.57) \text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$].

2.3 不同土壤生化特征与土壤呼吸和 N_2O 排放的相关关系

表3所示的是土壤生化特征、土壤呼吸和 N_2O 排放之间的相关性. 从中可以看出, 细菌数量与微生物碳氮呈显著正相关, 放线菌数量则与土壤有机碳和全氮含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 真菌数量则与全氮含量呈显著正相关 ($P < 0.05$). 文都日乐等^[27]也报道过草地细菌数量对土壤微生物量碳

的贡献较大,本研究与之一致. 另外,有机碳与全氮含量,微生物碳与微生物氮含量呈极显著正相关($P < 0.01$),这与刘秉儒^[28]、吴建国等^[29]的研究结果相一致.

表 2 不同土壤的 CO_2 和 N_2O 累积排放量¹⁾

样品号	土壤呼吸累积排放量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	N_2O 累积排放量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$
A1	69.59 ± 6.89 (f)	20.95 ± 1.18 (c)
B1	188.69 ± 4.30 (bcd)	26.70 ± 6.25 (c)
B2	219.26 ± 11.31 (bc)	38.52 ± 12.85 (c)
C1	130.98 ± 14.40 (e)	22.51 ± 1.07 (c)
C2	131.68 ± 14.84 (e)	47.41 ± 6.57 (bc)
C3	612.93 ± 13.38 (a)	79.94 ± 7.91 (b)
D1	43.09 ± 2.60 (f)	10.85 ± 1.37 (c)
E1	177.95 ± 15.09 (cde)	37.10 ± 13.05 (c)
E2	44.19 ± 3.89 (f)	9.42 ± 1.90 (c)
E3	235.95 ± 41.71 (b)	156.37 ± 36.68 (a)
F1	221.22 ± 12.64 (bc)	10.63 ± 0.57 (c)
G1	143.98 ± 26.12 (de)	48.96 ± 6.06 (bc)

1) 表中纵栏的括号内不同小写字母表示土样间有显著差异 ($P < 0.05$)

由表 3 可以看出,土壤呼吸与细菌数量、微生物总数及微生物碳呈极显著正相关($P < 0.01$),与微生物氮呈显著正相关($P < 0.05$),与 pH、土壤黏粒含量、有机碳、全氮、C/N、硝态氮、铵态氮、有效氮、MC/MN、放线菌、真菌无明显相关关系. 利用逐步回归方法进一步拟合,其回归方程为 $F_{\text{CO}_2} = 3.94 \times 10^{-6} \times \text{细菌} - 29.32 \times \text{pH} + 335.44$ ($R^2 = 0.872, P = 0.000, n = 12$). 结果表明,在本研究 $0.30 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的水分条件下,87.2% 的土壤呼吸空间差异主要是由土壤细菌数量和 pH 的差异造成的. 土壤放线菌数量的对数与土壤 pH 正相关,而土壤真菌数量的对数与土壤 pH 负相关($P < 0.05$, 图 4). 熊鸿焰等^[30]也报道过农田土壤水作时,真菌数量与土壤 pH 极显著负相关,放线菌数量与土壤 pH 有极显著正相关关系,这与大多数真菌类群嗜酸 (pH 5~6),而多数放线菌类群嗜碱一致^[31]. 同时也说明本研究中的土壤呼吸最终是由土壤微生物决定的,且细菌和真菌为主要贡献者. 徐洪灵等^[32]、孙秩等^[33]的研究结果是土壤呼吸与有机碳、全氮、C/N 呈极显著正相关,与 pH 呈显著负相关,本研究的结果与之不太一致. 可能是他们的研究针对的是单一生态系统的土壤且包括根系呼吸的土壤呼吸,而本研究针对的却是各种不同生态系统的土壤呼吸且不包括根系呼吸. 从本研究结果可以看出,土壤呼吸主要取决于细菌数量,而细菌数量与微生物碳呈显著正相关,所以微生物碳氮含量对土壤呼吸

速率也有显著影响. 由此可以看出,不是所有的有机碳都直接贡献于土壤呼吸作用,即使土壤的有机碳含量很高,但如果微生物不能利用,那么土壤呼吸速率也可能很小.

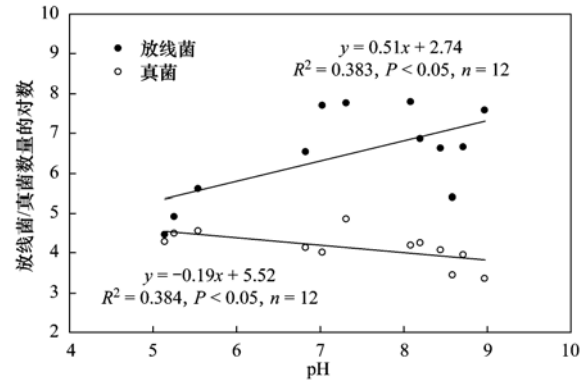


图 4 土壤放线菌和真菌与 pH 的相关关系

Fig. 4 Correlation of the log-transformed abundances of actinomycetes or fungi against pH in all soils

由表 3 还可以看出,土壤的 N_2O 排放与微生物总数和铵态氮含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与细菌、放线菌、真菌数量和有效氮呈显著正相关($P < 0.05$),与 pH、土壤黏粒含量、有机碳、全氮、C/N、硝态氮、微生物碳、微生物氮、MC/MN 无明显相关关系. 葛灿等^[34]对土壤中放线菌参与土壤反硝化可能性进行了初步研究,结果表明 10 个放线菌菌株在纯培养条件下都能将 NO_3^- 还原成 N_2O , N_2O 形成与放线菌生物量成正比. Crenshaw 等^[35]的研究结果表明半干旱草地土壤真菌硝化反硝化和细菌自养硝化主导 N 素转化过程,是 N_2O 产生的主要途径. 本研究也表明放线菌和真菌与 N_2O 的产生有关. 黄耀等^[11]的研究结果是麦田土壤 N_2O 排放与有机碳、C/N 呈极显著负相关,与 pH 呈极显著正相关,与土壤粘粒含量没有显著相关,然而本研究的结果与之不太一致,这可能是因为黄耀等人研究的对象是土壤-小麦作物系统 N_2O 的排放,而本研究的对象却是纯土壤且没有加任何外源碳氮物质. 利用逐步回归方法进一步拟合,其回归方程为 $F_{\text{N}_2\text{O}} = 4.15 \times 10^{-7} \times \text{细菌} + 1.97 \times \text{NH}_4^+ - \text{N} + 4.99$ ($R^2 = 0.884, P = 0.000, n = 12$). 结果表明,在本研究 $0.30 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的水分条件下,88.4% 的土壤 N_2O 排放空间差异主要是由土壤细菌数量和铵态氮含量的差异造成. 土壤 N_2O 主要由土壤微生物硝化和反硝化过程中产生,本研究中 N_2O 排放主要取决于细菌数量和铵态氮含量. 这可能与本研究土壤的含水量为 $0.30 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$,土壤处于充氧条件,硝化作用占主导地位,铵

表3 土壤生化特征、土壤呼吸和N₂O累积排放量的相关系数¹⁾ (n = 12)

Table 3 Pearson correlation coefficients of CO₂ and N₂O emissions against soil biochemical parameters (n = 12)

	N ₂ O	CO ₂	pH	<0.01 mm 土粒	SOC	TN	C/N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	有效氮	MC	MN	MC/MN	细菌	放线菌	真菌	微生物 总数
N ₂ O	1																
CO ₂	0.479	1															
pH	0.146	-0.030	1														
<0.01 mm 土粒	0.139	-0.220	-0.203	1													
SOC	0.554	0.171	-0.299	0.522	1												
TN	0.561	0.132	-0.189	0.599*	0.933**	1											
C/N	-0.031	0.111	-0.368	-0.154	0.247	-0.104	1										
NO ₃ ⁻ -N	-0.086	0.012	0.184	-0.190	-0.316	-0.073	-0.784**	1									
NH ₄ ⁺ -N	0.881**	0.167	0.018	0.275	0.618*	0.642*	-0.044	0.036	1								
有效氮	0.611*	0.134	0.129	0.089	0.268	0.439	-0.527	0.656*	0.778**	1							
MC	0.225	0.710**	0.219	-0.157	0.144	0.067	0.095	-0.011	0.043	0.026	1						
MN	0.243	0.589*	0.269	-0.004	0.433	0.444	-0.095	0.155	0.080	0.158	0.770**	1					
MC/MN	-0.097	-0.085	0.233	-0.052	-0.399	-0.491	0.212	-0.396	-0.117	-0.337	0.065	-0.425	1				
细菌	0.598*	0.909**	0.248	-0.098	0.125	0.147	-0.083	0.164	0.288	0.321	0.674*	0.611*	-0.123	1			
放线菌	0.587*	-0.046	0.278	0.368	0.717**	0.727*±0.041	-0.195	0.195	0.651*	0.369	0.123	0.381	-0.153	0.069	1		
真菌	0.676*	0.145	-0.417	0.403	0.567	0.627*-0.090	0.061	0.833**	0.668*-0.167	0.668*	-0.167	-0.136	-0.262	0.165	0.298	1	
微生物总数	0.797*	0.712**	0.349	0.117	0.483	0.506	-0.046	0.029	0.581*	0.457	0.612*	0.698*	-0.181	0.847**	0.588*	0.293	1

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

态氮是硝化反应的底物,且没有外加氮源, N_2O 的产生主要受铵态氮浓度的制约有关. Conen 等^[36]的研究也表明,在没有外加氮源的情况下,若土壤的有效氮含量比较低,有效氮含量就会成为主要限制因子,而土壤其他因素导致的 N_2O 排放差异便难以反映出来. Gödde 等^[16]将包括森林、农田和草地三大生态系统类型的 20 个土壤根据 pH、有效氮、土壤质地等因子分成了三大类,第一类是无机碳、全氮含量低的酸性土壤, N_2O 排放与有效氮含量呈显著正相关;第二类是全氮、 NH_4^+-N 含量高的酸性森林土壤, N_2O 排放与 NO_2^--N 和 pH 呈显著正相关;第三类是 NO_2^--N 、 NO_3^--N 含量高的中性农田土壤, N_2O 排放与土壤质地呈显著正相关. 然而本研究的结果与之不太一致,一方面可能是两研究测定指标有差异导致的,另一方面也可能与 Gödde 等^[16]培养时的水分条件是 $0.60 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 有关,硝化作用和反硝化作用同时进行,导致影响 N_2O 排放的显著因子不同. 尽管已有较多报道表明土壤 CO_2 的排放与 N_2O 排放有显著正相关关系^[37~39],但本研究未发现 N_2O 排放和土壤呼吸具有显著相关关系($P>0.05$,表 3).

3 结论

(1)不同土壤的生化特征不同. 细菌数量为果园最多竹林最少,放线菌数量草地最多竹林最少,真菌数量为林地最多果园最少;微生物碳氮含量一般果园>林地>农田. 细菌数量与微生物碳氮呈显著正相关,放线菌数量与土壤有机碳和全氮含量呈极显著正相关,真菌数量则与全氮含量呈显著正相关.

(2)不同土壤的 CO_2 和 N_2O 累积排放量不同. 土壤呼吸累积 CO_2 排放量为果园>竹林>农田>林地>草地,主要取决于土壤细菌数量和 pH 的变化; N_2O 累积排放量为农田>果园>草地>林地>竹林,主要取决于土壤细菌数量和铵态氮含量的变化.

致谢:感谢资源与环境科学学院硕士研究生石坤在采样时的辛勤工作,同时也感谢资源与环境科学学院杨秀琳老师、陈林梅、桑蒙蒙等硕士研究生在实验过程中给予的帮助!

参考文献:

- [1] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N_2O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. Science, 2009, **326**(5949): 123-125.
- [2] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, et al. Soil temperature and biotic factors drive the seasonal variation of soil respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural ecosystem[J]. Plant and Soil, 2007, **291**(1-2): 15-26.
- [4] 王改玲, 陈德立, 李勇. 土壤温度、水分和 NH_4^+-N 浓度对土壤硝化反应速度及 N_2O 排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(1): 1-6.
- [5] Park S, Bae W, Chung J, et al. Empirical model of the pH dependence of the maximum specific nitrification rate[J]. Process Biochemistry, 2007, **42**(12): 1671-1676.
- [6] 于亚军, 高美荣, 朱波. 小麦-玉米轮作田与菜地 N_2O 排放的对比研究[J]. 土壤学报, 2012, **49**(1): 96-103.
- [7] 刘爽, 严昌荣, 何文清, 等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素[J]. 生态学报, 2010, **30**(11): 2919-2924.
- [8] 李世清, 李生秀, 张兴昌. 不同生态系统土壤微生物体氮的差异[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, **5**(1): 69-73.
- [9] Dilly O, Blume H P, Schy U, et al. Variation of stabilised, microbial and biologically active carbon and nitrogen in soil under contrasting land use and agricultural management practices[J]. Chemosphere, 2003, **52**(3): 557-569.
- [10] Fierer N, Bradford M A, Jackson R B. Toward an ecological classification of soil bacteria[J]. Ecology, 2007, **88**(6): 1354-1364.
- [11] 黄耀, 焦燕, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对麦田 N_2O 排放影响的研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(5): 598-602.
- [12] 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤质地对小麦和棉花田 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境保护, 2000, **19**(1): 1-3.
- [13] Pilegaard K, Skiba U, Ambus P, et al. Factors controlling regional differences in forest soil emission of nitrogen oxides (NO and N_2O)[J]. Biogeosciences, 2006, **3**(4): 651-661.
- [14] Lark R M, Milne A E, Addiscott T M, et al. Scale- and location-dependent correlation of nitrous oxide emissions with soil properties: an analysis using wavelets[J]. European Journal of Soil Science, 2004, **55**(3): 611-627.
- [15] La Scala N Jr, Marques J Jr, Pereira G T, et al. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(10): 1469-1473.
- [16] Gödde M, Conrad R. Influence of soil properties on the turnover of nitric oxide and nitrous oxide by nitrification and denitrification at constant temperature and moisture[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, **32**(2): 120-128.
- [17] Butterbach-Bahl K, Baggs E M, Dannenmann M, et al. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? [EB/OL]. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0122>, 2013-05-27.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 12-290.
- [19] 黄玉芳, 叶优良, 杨素勤. 双波长分光光度法测定土壤硝态氮的可行性研究[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(2): 43-45.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 254-257.

- [21] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, **19**(6): 703-707.
- [22] 李阜棣, 喻子牛, 何绍江. 农业微生物学实验技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996. 305-307.
- [23] 石鹤. 微生物学实验 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010. 17-19.
- [24] 王跃思, 刘广仁, 王迎红, 等. 一台气相色谱仪同时测定陆地生态系统 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, **4**(10): 84-90.
- [25] 汪文霞, 周建斌, 严德翼, 等. 黄土区不同类型土壤微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮的含量及其关系 [J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(6): 103-106, 132.
- [26] 王小利, 苏以荣, 黄道友, 等. 土地利用对亚热带红壤低山区土壤有机碳和微生物碳的影响 [J]. *中国农业科学*, 2006, **39**(4): 750-757.
- [27] 文都日乐, 李刚, 张静妮, 等. 呼伦贝尔不同草地类型土壤微生物量及土壤酶活性研究 [J]. *草业学报*, 2010, **19**(5): 94-102.
- [28] 刘秉儒. 贺兰山东坡典型植物群落土壤微生物量碳、氮沿海拔梯度的变化特征 [J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(4): 883-888.
- [29] 吴建国, 艾丽. 祁连山 3 种典型生态系统土壤微生物活性和生物量碳氮含量 [J]. *植物生态学报*, 2008, **32**(2): 465-476.
- [30] 熊鸿焰, 李廷轩, 余海英. 水旱轮作条件下不同免耕年限土壤微生物数量及影响因素 [J]. *武汉大学学报 (理学版)*, 2008, **54**(2): 244-248.
- [31] 王岳坤, 洪葵. 红树林土壤因子对土壤微生物数量的影响 [J]. *热带作物学报*, 2005, **26**(3): 109-114.
- [32] 徐洪灵, 张宏, 张伟. 川西北高寒草甸土壤理化性质对土壤呼吸速率影响研究 [J]. *四川师范大学学报 (自然科学版)*, 2012, **35**(6): 835-841.
- [33] 孙轶, 魏晶, 吴钢, 等. 长白山高山冻原土壤呼吸及其影响因素分析 [J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(6): 603-606.
- [34] 葛灿, 石竹南, 颜志民, 等. 土壤中放线菌参与反硝化可能性研究 [J]. *土壤学报*, 2004, **41**(1): 108-112.
- [35] Crenshaw C L, Lauber C, Sinsabaugh R L, *et al.* Fungal control of nitrous oxide production in semiarid grassland [J]. *Biogeochemistry*, 2008, **87**(1): 17-27.
- [36] Conen F, Dobbie K E, Smith K A. Predicting N_2O emissions from agriculture land through related soil parameters [J]. *Global Change Biology*, 2000, **6**(4): 417-426.
- [37] Dorsh P, Palojarvi A, Mommertz S. Overwinter greenhouse gas fluxes in two contrasting agricultural habitats [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, **70**(2): 117-133.
- [38] Xu X F, Tian H Q, Hui D F. Convergence in the relationship of CO_2 and N_2O exchanges between soil and atmosphere within terrestrial ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(7): 1651-1660.
- [39] Chen G C, Tam N F Y, Ye Y. Spatial and seasonal variations of atmospheric N_2O and CO_2 fluxes from a subtropical mangrove swamp and their relationships with soil characteristics [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **48**: 175-181.

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPC Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yang (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行