

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



# 目次

|                                                              |                                                                   |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM <sub>2.5</sub> 的源贡献分析····· | 李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)                                               |
| 华北地区乡村站点(曲周)夏季PM <sub>2.5</sub> 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····       | 陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)                                          |
| 成都市大气PM <sub>2.5</sub> 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····                  | 印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)                               |
| 不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····                               | 黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)                                     |
| 北京地区大气消光特征及参数化研究·····                                        | 陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)                                 |
| 光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····                                         | 郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)                                |
| 遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····                                       | 尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)                     |
| 我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····                                    | 张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)                              |
| 太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····                                        | 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)                             |
| 基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····                                   | 王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)                                           |
| 河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····                           | 杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)                                      |
| 石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····                                    | 陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)                                       |
| 长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····                             | 白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)                                      |
| 三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····                              | 王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)                                 |
| 湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····                               | 王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)                                      |
| 水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····                                      | 李邵龙, 陈道毅 (3683)                                                   |
| 城市道路径流的排污特征·····                                             | 武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)                               |
| 杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····                                      | 段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)                            |
| 海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····                               | 杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)                                           |
| 天然有机物和电解质对水中C <sub>60</sub> 凝聚行为的影响·····                     | 方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)                                           |
| 铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····                              | 王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)                                      |
| 污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····                                        | 金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)                                               |
| 微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····                                   | 朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)                           |
| 倒置A <sup>2</sup> /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····               | 王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)                                |
| 高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····                            | 李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)                                    |
| 苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····                                  | 李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)                                         |
| 驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····                        | 宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)                           |
| 苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····                                     | 杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)                                  |
| 连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····                          | 鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)                                   |
| FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····                                  | 马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)                                 |
| 污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····                              | 刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)                                 |
| 残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····                           | 贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)                                          |
| 大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····                                      | 丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)                                |
| 缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····                              | 祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)                                          |
| 三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····                                    | 吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)                                          |
| 坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····                              | 冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)                                     |
| 不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····                                   | 沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)                     |
| 有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····                                    | 纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)                                       |
| 改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····                           | 陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)                                     |
| 菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定·····                                   | 孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)                                     |
| 血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····                             | 李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)                       |
| 生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····                         | 唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)                             |
| 虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····                     | 高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878) |
| 纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····                                        | 刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)                                |
| 黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····                                      | 陈亚楠, 袁玲 (3892)                                                    |
| 发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····                                  | 谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)                   |
| 搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····                            | 高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)                                           |
| COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····                                    | 李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)                                       |
| 养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····                     | 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)                            |
| 土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····                                     | 邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)                                          |
| 《环境科学》征订启事 (3553)                                            |                                                                   |
| 《环境科学》征稿简则 (3589)                                            |                                                                   |
| 信息 (3705, 3755, 3763, 3800)                                  |                                                                   |

# 坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响

冯书珍<sup>1,2,3</sup>, 苏以荣<sup>1,3</sup>, 张伟<sup>1,3</sup>, 陈香碧<sup>1,3</sup>, 何寻阳<sup>1,3\*</sup>

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100)

**摘要:** 运用氯仿熏蒸法和实时荧光定量 PCR (Real-time PCR) 法, 检测喀斯特峰丛洼地原生林上、中、下坡位各土层 (淋溶层: A 层 0~10 cm; 过渡层: AB 层 30~50 cm; 淀积层: B 层 70~100 cm) 中土壤微生物生物量碳、氮 (SMBC、SMBN) 及微生物 (细菌和真菌) 丰度的变化, 揭示坡位和土层对土壤微生物生物量和丰度的影响。结果表明, 坡位和土层及其交互作用均对土壤微生物生物量及丰度具有显著影响 ( $P < 0.05$ )。具体表现为, 土壤微生物生物量与丰度均随土层深度的增加而降低; A 层 SMBC 在下坡位表现最高, 均高于上坡位 ( $P < 0.05$ ), AB 层、B 层 SMBC 在中坡位最高; SMBN 均在下坡位表现为最高, 显著高于上坡位 ( $P < 0.05$ ); 除 B 层细菌丰度、AB 层真菌丰度在各坡位间无显著差异外, 均表现为中坡位最高 ( $P < 0.05$ )。逐步回归分析结果表明, 在坡位和土层的影响下, 有机碳、碱解氮与 pH、碱解氮与速效磷、速效钾分别是 SMBC、SMBN、细菌丰度、真菌丰度的主要影响因子。

**关键词:** 喀斯特; 坡位; 土层; 土壤微生物生物量; 实时荧光定量 PCR

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3832-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.10.036

## Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China

FENG Shu-zhen<sup>1,2,3</sup>, SU Yi-rong<sup>1,3</sup>, ZHANG Wei<sup>1,3</sup>, CHEN Xiang-bi<sup>1,3</sup>, HE Xun-yang<sup>1,3\*</sup>

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China)

**Abstract:** To explore the effects of slope position and soil horizon on soil microbial biomass and abundance, chloroform fumigation extraction methods and real-time fluorescence-based quantitative PCR (Real-time PCR) were adopted to quantify the changes of soil microbial biomass C, N and abundance of bacteria and fungi, respectively. Soil samples were harvested from three horizons along profile, i. e., leaching horizon (A, 0-10 cm), transitional horizon (AB, 30-50 cm) and alluvial horizon (B, 70-100 cm), which were collected from the upper, middle and lower slope positions of a karst primary forest ecosystem. The results showed that slope position, soil horizon and their interaction significantly influenced the soil microbial biomass and abundance ( $P < 0.05$ ). Different from A horizon, where SMBC was greater in lower than in upper slope position ( $P < 0.05$ ), SMBC in AB and B horizons were highest in middle slope position. Similarly, SMBN was greater in lower than in upper slope position for A, AB and B horizons. Besides soil bacterial abundance in B horizon and fungal abundance in AB layer, the middle slope position had the highest value for all the three soil horizons ( $P < 0.05$ ). Stepwise regression analysis showed that soil organic carbon, available nitrogen and pH were the key factors responsible for SMBC and SMBN variation, respectively, while the important factors responsible for the variation of bacteria abundance were available nitrogen and available phosphorus, and that for fungi abundance variation were available potassium.

**Key words:** karst primary forest; slope position; soil horizon; soil microbial biomass; real-time PCR

土壤微生物量在养分循环与平衡、土壤理化性质的改善中起着重要作用, 指示着生态系统功能的变化<sup>[1]</sup>。坡位是重要的地形因子, 它可以通过影响土壤微环境、土壤理化性质、地上植被的生长及地下碳输入等途径间接影响土壤微生物量<sup>[2,3]</sup>。研究显示, 由于长期地表径流侵蚀和淋溶作用, 我国大部分地区表层土壤养分和微生物量存在着明显的“注积效应”, 即随着坡位的升高, 土壤养分及微生物量

会逐渐降低<sup>[4~6]</sup>, 但由于受土地利用方式及干扰程度的影响, 上坡位土壤微生物量显著高于下坡位<sup>[7]</sup>。但是, 对四川寿竹林地的深层土壤的研究结

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-05-29

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05070403); 国家自然科学基金项目 (30970538, 31270551, 31270555)

作者简介: 冯书珍 (1987~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤环境生态和微生物分子生态学, E-mail: fengshuzhenbest@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: hbbpjhn@isa.ac.cn

果表明,微生物量对坡位的响应与表层不同<sup>[8]</sup>,这说明不同地质背景土壤的坡位和土层可能对土壤微生物的影响不同. 喀斯特地区土层浅薄、土壤总量少<sup>[9]</sup>、土壤剖面缺乏 C 层<sup>[10]</sup>等特点决定其养分及微生物量受土层的影响可能具有自身的独特特征. 土壤微生物直接驱动土壤碳循环过程,且深层土壤碳周转对于碳循环具有重要的作用<sup>[11]</sup>. 认识喀斯特地区不同坡位深层土壤微生物量,对理解该区深层土壤碳固定及完善土壤碳周转模型具有重要的意义.

目前指征土壤微生物量的测定方法主要包括氯仿熏蒸的土壤微生物生物量、传统培养的微生物计数、以及分子生物学的土壤微生物丰度<sup>[12,13]</sup>. 已有研究多集中于将土壤微生物生物量碳、氮来指征土壤微生物量,并重点研究其与土壤肥力以及有关环境因素的关系<sup>[14]</sup>;由于土壤中可分离培养的微生物不足 1%<sup>[15]</sup>,微生物计数的方法已不能表征土壤微生物量的研究<sup>[16]</sup>,而用土壤微生物丰度指征微生物量的研究少. 细菌、真菌作为土壤微生物的两大类群,其丰度对外界环境的响应有助于反映土壤微生物质量状况<sup>[17]</sup>. 喀斯特地区地上和地下二元水土过程的独特性,必然影响土壤养分对坡位与土层的响应具有特殊性,而揭示这种特殊性,是制订喀斯特退化土地植被恢复措施和深入认识土壤碳周转的特征的前提. 以喀斯特峰丛洼地的原生林生态系统为对象,利用氯仿熏蒸法和实时定量 PCR 技术分别指示土壤微生物生物量与丰度,阐明喀斯特这一独特地质地貌条件下,水土地上与地下二元流失过程是否影响土壤微生物生物量及丰度对坡位和土层的响应,明确以下两个问题:①坡位和土层对土壤养

分和土壤微生物生物量及丰度的影响;②坡位和土层导致的土壤理化性质变化与土壤微生物生物量及丰度间的关系,旨在为合理利用该区有限的土地资源和制订生态恢复及重建措施提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 样地选择及样品采集

研究区位于广西环江木论国家自然保护区(107°53′~108°05′ E, 25°06′~25°12′ N),属典型喀斯特峰丛洼地景观以及亚热带季风气候区. 海拔 400~1 000 m,年平均气温 15.0~18.7℃,极端高温 36℃,极端低温 -5℃;年均降雨量 1 530~1 820 mm,林内相对湿度一般在 80%~90%,夏季可接近饱和;林区土壤类型简单,主要为石灰土和零星分布的硅质土,均属非地带性土壤;该区几无人类活动干扰,尤其是没有受到翻耕等农业活动的影响.

于 2008 年 12 月至 2009 年 1 月,在研究区从山顶到山脚共设置 3 条样带,分别在每条样带的上、中、下坡位各设置一个样方(20 m×30 m),海拔高度分别为 615、509、416 m. 上、中、下坡位共有的优势物种有平阳厚壳桂(*Cryptocarya chingii*)、野独活(*Milium chunii*)、九里香(*Murraya exotica*)、茜树(*Aidia cochinchinensis*);另外上坡位主要优势物种还包括楠木(*Phoebe zhennan*)、灰岩捧柄花(*Cleidion bracteosum*)等,中坡位为珠子木(*Phyllanthodendron anthopotamicum*)、棕木(*Cleidion bracteosum*)等,下坡位为卵果海桐(*Pittosporum ovoideum* Gowda)、山小桔(*Glycosmis citrifolia*)等,具体的植被多样性信息见表 1. 在样方内采集淋溶层(A 层,0~10 cm)、过

表 1 样地植被物种多样性信息<sup>1)</sup>

Table 1 Diversity index of vegetation in study area

| 层次  | 坡位  | S 值        | D 值        | H 值        | E 值        |
|-----|-----|------------|------------|------------|------------|
| 草本层 | 下坡位 | 1.39±0.50  | 0.80±0.03  | 2.72±0.16B | 0.89±0.02  |
|     | 中坡位 | 2.47±0.42  | 0.80±0.13  | 3.40±0.10A | 0.84±0.13  |
|     | 上坡位 | 1.52±0.17  | 0.82±0.03  | 2.92±0.21B | 0.88±0.03  |
| 灌木层 | 下坡位 | 2.87±0.92B | 0.75±0.08B | 2.86±0.51B | 0.79±0.07B |
|     | 中坡位 | 5.59±0.37A | 0.92±0.01A | 4.28±0.07A | 0.94±0.01A |
|     | 上坡位 | 5.52±0.75A | 0.92±0.02A | 4.32±0.29A | 0.95±0.01A |
| 乔木层 | 下坡位 | 5.44±1.04  | 0.85±0.05  | 3.62±0.39  | 0.89±0.05  |
|     | 中坡位 | 5.44±0.77  | 0.89±0.03  | 3.92±0.39  | 0.93±0.03  |
|     | 上坡位 | 7.47±1.84  | 0.92±0.03  | 4.42±0.46  | 0.95±0.02  |

1) S 值为丰富度指数 = 植被中的总物种数; D 值为 Simpson 指数 =  $1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$ , 式中,  $P_i$  为第  $i$  物种个体数占群落中所有物种个体总数的比例, 即  $P_i = N_i/N$ ; H 值为 Shannon-Wiener 指数 =  $-\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$ ; E 值为 Pielou 均匀度指数 =  $H/\ln S$ ; 不同标识的大写字母代表不同坡位间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

渡层(AB层, 30~50 cm)、淀积层(B层, 70~100 cm)土壤样品。去除土壤中可见的动植物残体, 采用四分法取约 50 g 左右新鲜土壤置于灭菌自封袋中, 封口后立即置于液氮中带回, 保存在 -80℃ 冰箱中供土壤微生物丰度分析; 另分取两份: 一份保存在 4℃ 冰箱中供土壤微生物生物量分析, 一份经自然风干后用于土壤理化性质分析。同时, 采用环刀法测定土壤容重。

## 1.2 土壤理化性质的测定

pH 采用 pH 计测定(土水比为 1:2.5); 有机质用重铬酸钾容量法-外加热法测定; 全氮用半微量开氏法测定; 全磷用 NaOH 碱熔-钼锑抗比色法测定; 全钾用 NaOH 熔融-火焰光度法测定; 碱解氮用碱解扩散法测定; 速效磷用 0.5 mmol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 提取-钼锑抗比色法(Olsen 法)测定; 速效钾用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定<sup>[18]</sup>。

## 1.3 土壤微生物生物量的测定

土壤微生物生物量碳(SMBC)采用氯仿熏蒸浸提-碳分析仪器法, 土壤微生物生物量氮(SMBN)采用氯仿熏蒸浸提-全氮测定法测定<sup>[12]</sup>。相关计算公式:

$$\text{SMBC} = E_C/k_{EC}$$

式中,  $E_C$  为熏蒸土壤提取的有机碳-未熏蒸土壤提取的有机碳,  $k_{EC}$  为转换系数, 取值 0.45;

$$\text{SMBN} = E_N/k_{EN}$$

式中,  $E_N$  为熏蒸土壤提取的全氮-未熏蒸土壤提取的全氮,  $k_{EN}$  为转换系数, 取值 0.45。

## 1.4 样品 DNA 的提取

将 -80℃ 冰箱保存的土壤样品置于冷冻干燥器(Freezer Dryer, SIM, USA)抽真空 24 h 后迅速研磨, 用土壤 DNA 快速提取专用试剂盒(Fast DNA® SPIN Kit for Soil, MP)从 0.5 g 冷冻干燥土壤中提取总 DNA, 经 1.2% 琼脂糖凝胶电泳检测总 DNA 片段大小约为 20 kb; 用紫外分光光度计(Nanodrop, PeqLab, Germany)测定总 DNA 提取量为 80.60~584.62 μg·g<sup>-1</sup>,  $A_{260\text{nm}}/A_{280\text{nm}}$  比值为 1.7~1.9,  $A_{260\text{nm}}/A_{230\text{nm}}$  比值为 1.7~1.9, 说明所提取的土壤微生物总 DNA 产量和纯度均较高, 可用于进一步的分子生物学分析。

## 1.5 实时荧光定量 PCR 扩增

采用实时荧光定量 PCR(Real-time PCR)测定土壤细菌 16S rRNA、真菌 18S rRNA 基因拷贝数。引物分别为:

细菌<sup>[19]</sup> F1369: 5'-CGGTGAATACGTTTCYCGG-3', R1492: 5'-GGWTACCTTGTTACGACT T-3'; 真

菌<sup>[20]</sup> Fung: 5'-GTAGTCATATGCTTGTCTC-3', NSI: 5'-ATTCCCCGTTACCCGTTG-3'。按(Takara)试剂盒的操作说明进行两步法 SYBR I 荧光定量 PCR 扩增(PCR 反应液为 10 μL 体系), 定量分析喀斯特峰丛洼地原生林剖面土壤微生物丰度。实时荧光定量 PCR 仪: ABI 7900, Foster City, CA, USA。

标准曲线的制作: 分别将细菌、真菌测序获得的已知种属的阳性克隆子扩增培养后提取质粒 DNA, 紫外分光光度计检测浓度后, 进行 10~10<sup>8</sup> 倍梯度稀释, 作为 16S rRNA、18S rRNA 基因的荧光定量的标准样品。所有样品均 4 次重复。以初始模板 DNA 量  $C$  的对数为横坐标, 以 PCR 反应过程中每个稀释样品的 Ct 值为纵坐标, 绘制标准曲线。细菌和真菌 RT-PCR 扩增标准曲线分别为:

$$\text{Ct} = -3.372 \lg C + 60.703$$

$$(R^2 = 0.995, E = 0.975)$$

$$\text{Ct} = -3.325 \lg C + 50.692$$

$$(R^2 = 0.993, E = 0.999)$$

线性范围分别为 10<sup>4</sup>~10<sup>9</sup> 和 10<sup>2</sup>~10<sup>8</sup>, 扩增效率在 0.96~1.09 之间, 满足基因丰度定量实验要求, 且熔解曲线都是单峰型, 说明在 PCR 扩增过程中, 没有出现非特异性扩增, 由此推断定量 PCR 扩增所获得的数据是可靠的。

## 1.6 数据分析

以坡位和土层作为处理因子对土壤微生物生物量(SMBC, SMBN)及丰度(细菌、真菌)进行双因素方差分析, 处理间的多重比较用 S-N-K 法( $P < 0.05$ ); 坡位和土层导致的土壤理化性质变化与土壤微生物生物量、丰度间的关系采用 Pearson 相关性分析及逐步回归分析(Stepwise regression)。用 SPSS 20.0 和 Excel 2010 做统计分析和制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡位和土层对喀斯特原生林土壤理化性质的影响

不同坡位, 土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾等随土层加深而降低, 表现为 A 层显著高于 AB 层、B 层( $P < 0.05$ ); 同一土层, 土壤性质对坡位的响应不一, 具体表现为: A 层、AB 层、B 层土壤下坡位的有机质、全氮、全磷、全钾及碱解氮含量显著高于中坡位、上坡位( $P < 0.05$ ), A 层土壤的速效钾含量在上坡位表现为最高, 而 AB 层、B 层土壤的速效钾含量则表现为上坡位/下坡位显著高于中坡位( $P < 0.05$ ); 土壤容重整体表现

为下坡位最小；坡位对 pH 的剖面分异无显著影响，整体在 6.13 ~ 7.53 范围内(表 2)。

表 2 土壤理化性质在不同坡位不同土层间的比较<sup>1)</sup>

| Table 2 Comparison on soil physicochemical properties among different slope positions and soil horizons |     |                            |                           |                           |                           |                            |                             |                             |                           |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|
| 坡位                                                                                                      | 土层  | 有机质<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 全氮<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 全磷<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 全钾<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 碱解氮<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 速效磷<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 速效钾<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 容重<br>/g·cm <sup>-3</sup> | pH          |
| A 层                                                                                                     | 下坡位 | 106.83 ± 2.37Aa            | 10.97 ± 1.54Aa            | 2.08 ± 0.31Aa             | 0.76 ± 0.21               | 312.45 ± 21.65Aa           | 12.26 ± 0.78Aa              | 96.15 ± 7.47Ba              | 0.54 ± 0.04b              | 7.40 ± 0.24 |
|                                                                                                         | 中坡位 | 77.79 ± 3.28Ba             | 7.90 ± 0.74Ba             | 1.14 ± 0.11Bb             | 0.63 ± 0.00               | 159.28 ± 5.82Ba            | 12.41 ± 1.11Aa              | 99.15 ± 0.94Ba              | 0.76 ± 0.10b              | 7.00 ± 0.05 |
|                                                                                                         | 上坡位 | 54.78 ± 5.95Ca             | 4.91 ± 1.54Ba             | 0.86 ± 0.03Cc             | 0.79 ± 0.01               | 182.28 ± 8.97Ba            | 5.58 ± 0.93Ba               | 130.21 ± 0.06Aa             | 0.68 ± 0.13b              | 6.41 ± 0.22 |
| AB 层                                                                                                    | 下坡位 | 91.73 ± 1.55Ab             | 5.52 ± 0.59Ab             | 2.05 ± 0.18Aa             | 1.00 ± 0.02               | 168.75 ± 6.03Ab            | 7.19 ± 0.19Ab               | 40.52 ± 0.50b               | 0.89 ± 0.09ab             | 7.23 ± 0.10 |
|                                                                                                         | 中坡位 | 25.83 ± 3.40Bb             | 2.94 ± 0.94Bb             | 0.91 ± 0.12Bb             | 0.76 ± 0.05               | 59.21 ± 14.16Bb            | 2.85 ± 0.56Bb               | 35.20 ± 5.29b               | 1.09 ± 0.10ab             | 7.26 ± 0.39 |
|                                                                                                         | 上坡位 | 24.62 ± 5.62Bb             | 2.69 ± 0.59Bb             | 0.73 ± 0.06Bc             | 0.81 ± 0.01               | 110.54 ± 6.81Ab            | 1.98 ± 0.27Bb               | 41.40 ± 0.72b               | 1.17 ± 0.06a              | 6.13 ± 0.18 |
| B 层                                                                                                     | 下坡位 | 17.83 ± 2.70c              | 2.15 ± 0.69c              | 1.10 ± 0.03Ba             | 1.10 ± 0.04A              | 73.46 ± 2.65Ac             | 6.43 ± 0.13Ab               | 48.97 ± 2.39Ab              | 1.10 ± 0.06a              | 7.24 ± 0.05 |
|                                                                                                         | 中坡位 | 13.13 ± 4.10c              | 1.51 ± 0.75b              | 0.42 ± 0.11Cc             | 0.67 ± 0.10B              | 44.01 ± 8.44Bb             | 1.29 ± 0.23Bb               | 33.67 ± 2.09Bb              | 1.35 ± 0.17a              | 7.53 ± 0.18 |
|                                                                                                         | 上坡位 | 15.17 ± 3.14c              | 1.81 ± 0.31b              | 0.59 ± 0.15Cb             | 0.88 ± 0.00B              | 71.10 ± 4.53Ac             | 1.89 ± 0.11Bb               | 49.72 ± 1.32Ab              | 1.15 ± 0.06a              | 6.27 ± 0.33 |

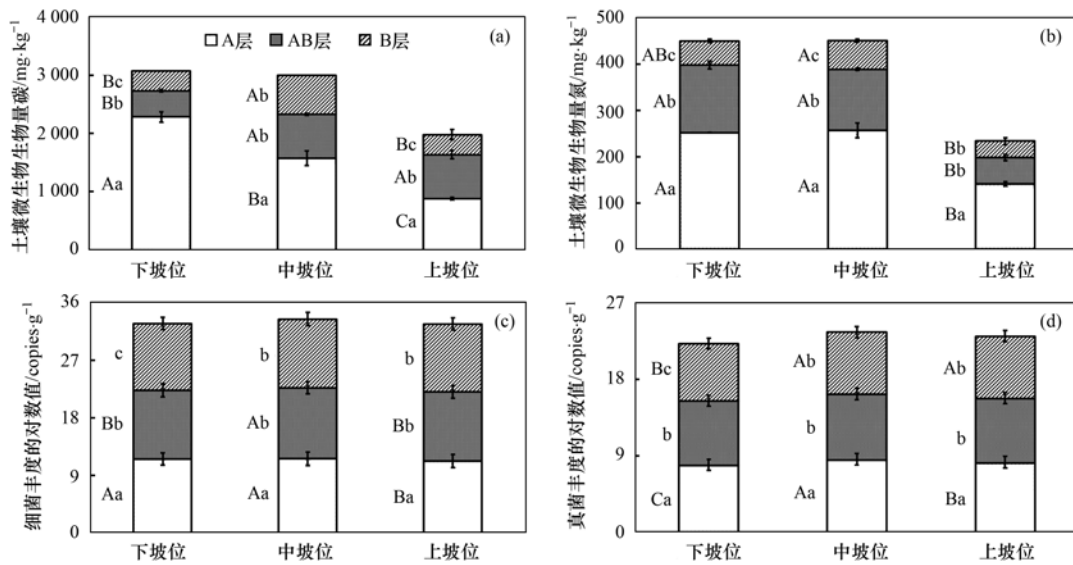
1) 表中数据为 3 个重复样品的平均值,同一列中不同标识的小写字母代表同一坡位、不同土层间有显著性差异( $P < 0.05$ );不同标识的大写字母代表同一土层、不同坡位间有显著性差异( $P < 0.05$ );下同

2.2 坡位和土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量的影响

土层对土壤微生物生物量的影响显著,同一坡位,A 层、AB 层、B 层间存在明显差异,均表现为 A 层最高( $P < 0.05$ )(图 1)。坡位对土壤微生物生物量的影响不一。土壤微生物生物量碳: A 层 SMBC 在下坡位表现最高,均显著高于中、上坡位( $P < 0.05$ );AB 层在中、上坡位间无显著差异,均高于下坡位;B 层则在中坡位最高,上、下坡位间无显著差异[图 1(a)]。土壤微生物生物量氮: A 层、AB 层、B 层均在下坡位表现为最高,显著高于上坡位( $P < 0.05$ )[图 1(b)]。

2.3 坡位和土层对喀斯特原生林土壤微生物丰度的影响

细菌 16S rRNA 基因丰度在各坡位各土层的分布(以干土计,下同)为  $2.61 \times 10^{10} \sim 4.15 \times 10^{11}$  copies·g<sup>-1</sup> [图 1(c)]。其中,同一坡位,沿土层深度的增加,细菌丰度显著减少( $P < 0.05$ );A 层中坡位/下坡位 > 上坡位,AB 层中坡位 > 上坡位/下坡位( $P < 0.05$ ),B 层坡位间无显著差异( $P > 0.05$ )。真菌 18S rRNA 基因丰度在各坡位各土层的分布为  $5.81 \times 10^6 \sim 3.58 \times 10^8$  copies·g<sup>-1</sup> [图 1(d)],显著低于细菌丰度。其中,同一坡位,真菌丰度均表现为 A 层 > AB 层 > B 层;在 3 种坡面地形下,A 层表现



(a) 土壤微生物生物量碳; (b) 土壤微生物生物量氮; (c) 细菌丰度; (d) 真菌丰度

图 1 土壤微生物生物量和微生物丰度在坡位与土层间的比较

Fig. 1 Comparison on soil microbial biomass and abundance among different slope positions and soil horizons

为中坡位 > 上坡位 > 下坡位、AB 层无显著差异、B 层表现为中坡位/上坡位 > 下坡位。

#### 2.4 喀斯特原生林土壤微生物量生物量与丰度的影响因素

双因素方差分析结果(表 3)表明,坡位和土层对土壤微生物生物量碳、氮以及细菌、真菌丰度具有不同程度的显著影响,同时存在显著的坡位和土壤发生层位交互作用( $P < 0.01$ );从  $F$  值来看,土层对土壤微生物量的影响略大于坡位。

相关分析结果表明,除土壤全磷含量与细菌和真菌丰度、全钾含量与土壤微生物量碳、微生物量氮和细菌丰度无显著相关性之外,其它土壤性质与土壤微生物生物量与丰度之间均存在显著的正相关

关系(真菌丰度分别与全钾显著负相关除外),但值得注意的是,细菌、真菌丰与速效磷显著正相关( $P < 0.01$ ),土壤微生物生物量和丰度与速效钾显著正相关( $P < 0.01$ )。

进一步采用逐步回归分析获得主要因子(表 4),结果表明:有机质为影响土壤微生物生物量碳的主要因子,偏回归系数为 0.632 ( $P < 0.01$ ),随着有机质含量的增加,SMBC 也显著增加;碱解氮为影响土壤微生物生物量氮的正因子,而 pH 为负影响因子,标准回归系数分别为 0.684、-0.526 ( $P < 0.01$ );碱解氮、速效磷为影响细菌丰度的主要因子,且决定系数  $R^2$  高达 0.718;速效钾为影响真菌丰度的主要因子 ( $P < 0.05$ )。

表 3 坡位及土层对土壤微生物生物量、丰度的双因素方差分析结果<sup>1)</sup>

Table 3 Effect of slope position, soil horizon and their interaction on the soil microbial biomass and abundance by two-way ANOVA

| 项目      | 土壤微生物生物量碳 |            | 土壤微生物生物量氮 |            | 细菌丰度 |            | 真菌丰度 |            |
|---------|-----------|------------|-----------|------------|------|------------|------|------------|
|         | df        | F          | df        | F          | df   | F          | df   | F          |
| 坡位      | 2         | 72.156 **  | 2         | 93.261 **  | 2    | 15.532 **  | 2    | 33.972 **  |
| 土层      | 2         | 303.691 ** | 2         | 382.026 ** | 2    | 146.602 ** | 2    | 135.456 ** |
| 坡位 × 土层 | 4         | 42.306 **  | 4         | 13.533 **  | 4    | 8.178 **   | 4    | 24.594 **  |

1) 显著性水平: \*\*,  $P < 0.01$ ; \*,  $P < 0.05$ ; 下同

表 4 土壤理化性质对微生物量的逐步回归分析<sup>1)</sup>

Table 4 Key factors among soil physicochemical properties on microbial biomass and abundance by stepwise regression analysis ( $N = 27$ )

| 因变量       | 预测变量(标准回归系数)                 | 决定系数 $R^2$ |
|-----------|------------------------------|------------|
| 土壤微生物生物量碳 | 有机质(0.632 **), 碱解氮(0.684 **) | 0.399      |
| 土壤微生物生物量氮 | pH(-0.526 **)                | 0.475      |
| 细菌丰度      | 碱解氮(0.720 **), 速效磷(0.278 *)  | 0.718      |
| 真菌丰度      | 速效钾(0.646 **)                | 0.417      |

1) 已排除的预测变量没有显示

### 3 讨论

作为重要的地形因子,坡位可以通过影响土壤的微气候、土壤的理化性质、植被的生长以及地下碳输入等途径影响土壤微生物的生长及生物量<sup>[2]</sup>。在本研究中,A 层土壤微生物生物量碳存在与养分类似的“洼积效应”,均表现为下坡位最高[图 1(a)],与张地等对东灵山栎树<sup>[2]</sup>、秦华军等对喀斯特山区寿竹林地<sup>[8]</sup>的研究一致,表明土壤微生物生物量碳在表层与同一及其他地貌均有相似的变化规律,而 AB 层,B 层则表现为中坡位最高,说明土壤微生物生物量碳是不同坡位上多重影响因素多方面综合作用的结果。与土壤微生物生物量碳不同,A 层、AB 层、B 层的土壤微生物生物量氮均在下坡位最高,显著高于上坡位[图 1(b)],但成毅等<sup>[6]</sup>在宁夏固原黄土丘陵区天然草地研究结果则显示土壤微

生物生物量氮在坡底较低,分析原因可能是由于土壤微生物生物量氮受制于氮素,本研究中全氮、碱解氮在下坡位显著高于上、下坡位(表 2),而黄土丘陵区则表现上\中坡位显著高于下坡位<sup>[6]</sup>。

坡位对细菌丰度、真菌丰度的影响目前研究还较少,结果表明除 B 层细菌丰度,AB 层真菌丰度在各坡位间无显著差异外,均表现为中坡位最高,分析可能的原因:一方面中坡位既有上坡位冲积物的补充,又有进一步的向下流失<sup>[21]</sup>,使其具有较高的细粒和黏粒含量,加之相对较好的水热条件<sup>[22]</sup>;另一方面调查发现中坡位植被草本层 Shannon-Wiener 指数显著高于上、下坡位(表 1),而草本层凋落物是土壤异养微生物代谢底物的重要来源,并对土壤微生物数量及组成产生明显的影响<sup>[23]</sup>。

喀斯特区具有独特的水土二元流失特征,其所引发的土壤养分及其驱动的土壤微生物量表现特征

与非喀斯特地区既有共性,也具其特殊性。结果表明,同一坡位,A层,AB层,B层土壤微生物生物量碳、氮均存在明显差异,表现为A层最高( $P < 0.05$ ),与前人研究结果<sup>[2,8]</sup>一致,说明喀斯特峰丛洼地土壤微生物较为集中的分布于营养状况较好的表层土壤;同一坡位,细菌、真菌丰度均随土层深度的加深而显著降低,与Fierer等<sup>[24]</sup>对加利福尼亚圣塔阳兹山谷的研究结果不同,该研究表明革兰氏阳性菌相对丰度随土层深度的加深而降低,革兰氏阴性菌与真菌则趋势相反,其主要原因可能是喀斯特地区土壤养分的垂直渗漏较非喀斯特区更严重<sup>[25]</sup>(表2),且底层土壤养分更加贫瘠,因此,底物依赖的异养细菌与真菌丰度显著降低。

土壤微生物生物量指征土壤微生物的生物总质量(以细菌、真菌为主,还包括放线菌及原生动物等),避免了由于测定土壤微生物的个体和种类数量的技术难度所造成的确定其种群大小的不确定性<sup>[16]</sup>;但也忽略了功能各异的微生物所带来的生态效应<sup>[26,27]</sup>,细菌、真菌丰度的指征在一定程度上进行了补充与说明。本研究结果表明,利用土壤微生物生物量及微生物丰度表征土壤微生物量,二者受坡位及土层的影响均比较敏感(表3),均能作为喀斯特峰丛洼地土壤微环境监测的生物学指标,尽管揭示的主控因子不同(表4),但可以相互补充。在坡位和土层的共同影响下,土壤微生物生物量碳的高低主要受土壤中有有机碳源的制约,是土壤肥力高低及其变化的重要依据之一<sup>[14,28]</sup>;土壤微生物量氮主要受碱解氮及pH的共同制约,因为凡是影响土壤氮素矿化与固持过程的因素都会影响土壤微生物生物量氮的含量<sup>[27]</sup>,可作为土壤氮素的敏感指示因子。细菌丰度主要受碱解氮与速效磷的共同制约,真菌丰度则可能受制于速效钾;喀斯特区一方面全磷的含量并不低(表2),但是较高pH值和高钙镁含量的土壤具有很强的固磷作用,形成难溶的磷灰石导致磷的有效性降低<sup>[28]</sup>;另一方面钾素受成土母质制约较大,且容易随喀斯特地上与地下二元水分流失的影响<sup>[5]</sup>,是主要养分限制因子。因此可通过细菌丰度初步指征氮、磷胁迫,真菌丰度指征钾素,仍需通过单因素实验进行下一步的验证。

## 4 结论

(1)坡位和土层显著影响土壤微生物生物量及丰度,且土壤微生物生物量及丰度对土层的响应比坡位相对较强,说明喀斯特地区土壤养分的垂直渗

漏相对更应被关注。

(2)由于不同土壤微生物生物量与丰度等微生物指标指示喀斯特土壤养分的状况存在差异,且各指标的受制土壤环境因子不同,在养分胁迫的喀斯特退化生境的生态修复过程中,需要根据具体目标与立地(坡位)条件采用相应策略。

致谢:感谢中国科学院亚热带农业生态研究所李德军研究员对本文内容的指导。

## 参考文献:

- [1] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H Q, *et al.* Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by  $^{14}\text{C}$  labeling [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(2): 210-219.
- [2] 张地, 张育新, 曲来叶, 等. 海拔对辽东栎林地土壤微生物群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(8): 2041-2048.
- [3] 赵瑜, 钟宇, 张健, 等. 不同坡位下巨桉人工林土壤动物群落特征[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(9): 2367-2374.
- [4] 高雪松, 邓良基, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(2): 53-56, 60, 79.
- [5] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征[J]. *生态学报*, 2011, **31**(11): 3036-3043.
- [6] 成毅, 安韶山, 马云飞. 宁南山区不同坡位土壤微生物生物量和酶活性的分布特征[J]. *水土保持研究*, 2010, **17**(5): 148-153.
- [7] 邱梅, 张海, 张宇, 等. 黄土高原不同坡位苹果林土壤酶活性及微生物量动态变化研究[J]. *西北农业学报*, 2014, **23**(4): 152-159.
- [8] 秦华军, 何丙辉, 赵旋池, 等. 西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3580-3586.
- [9] 岳跃民, 王克林, 张伟, 等. 基于典范对应分析的喀斯特峰丛洼地土壤-环境关系研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1400-1405.
- [10] 朱明秋, 曹建华, 郭芳. 基于碳酸盐岩风化的碳源分析及土壤的影响作用机制[J]. *中国岩溶*, 2007, **26**(3): 202-206.
- [11] Fontaine S, Barot S, Barré P, *et al.* Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, **450**(7167): 277-280.
- [12] Wu J S, Joergensen R G, Pommerening B, *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**(8): 1167-1169.
- [13] Pfaffl M W. A new mathematical model for relative quantification in real-time RT-PCR [J]. *Nucleic Acids Research*, 2001, **29**(9): e45.
- [14] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 气象出版社, 2006.
- [15] 孙凯, 刘娟, 凌婉娟. 土壤微生物量测定方法及其利弊分析[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(4): 1010-1016.

- [16] 宋长青, 吴金水, 陆雅海, 等. 中国土壤微生物学研究十年回顾[J]. 地球科学进展, 2013, **28**(10): 1087-1105.
- [17] Beauregard M S, Hamel C, Atul-Nayyar, *et al.* Long-term phosphorus fertilization impacts soil fungal and bacterial diversity but not AM fungal community in alfalfa [J]. Microbial Ecology, 2010, **59**(2): 379-389.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [19] Manerkar M A, Seena S, Bärlocher F. Q-RT-PCR for assessing archaea, bacteria, and fungi during leaf decomposition in a stream[J]. Microbial Ecology, 2008, **56**(3): 467-473.
- [20] Li C G, Li X M, Kong W D, *et al.* Effect of monoculture soybean on soil microbial community in the Northeast China [J]. Plant and Soil, 2010, **330**(1-2): 423-433.
- [21] 王恒松, 熊康宁, 刘云. 喀斯特区地下水土流失机理研究[J]. 中国水土保持, 2009, (8): 11-14.
- [22] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(1): 7-12.
- [23] 蔡锡安, 夏汉平. 森林生态系统中草层植物的生态功能[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, **11**(1): 67-74.
- [24] Fierer N, Schimel J P, Holden P A. Variations in microbial community composition through two soil depth profiles[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(1): 167-176.
- [25] 陈洪松, 王克林. 西南喀斯特山区土壤水分研究[J]. 农业现代化研究, 2008, **29**(6): 734-738.
- [26] Blume E, Bischoff M, Reichert J M, *et al.* Surface and subsurface microbial biomass, community structure and metabolic activity as a function of soil depth and season[J]. Applied Soil Ecology, 2002, **20**(3): 171-181.
- [27] 付美云, 杨宁, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤微生物与养分的耦合关系[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(1): 41-48.
- [28] Zhang W, Zhao J, Pan F J, *et al.* Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China [J]. Plant and Soil, 2015, **391**(1-2): 77-91.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                    |                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology ..... | LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)                             |
| Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM <sub>2.5</sub> at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer .....               | CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)     |
| Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM <sub>2.5</sub> in Chengdu City .....                                                                       | YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)   |
| Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning .....                                                                 | HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)    |
| Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing .....                                                                                       | CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)           |
| Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction .....                                                                                                     | ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)     |
| Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors .....                                                                                                             | YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)     |
| Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China .....                                                                                | ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)    |
| Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors .....                                                                                     | CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)             |
| Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images .....                                                                           | WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)      |
| Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary .....                                                      | YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)     |
| Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City .....                                                                                                       | CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)           |
| Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir .....                                                                     | BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)    |
| Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR .....                                                       | WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)  |
| Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes .....                            | WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)      |
| Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance .....                                                                                                            | LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)                                 |
| Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater .....                                                                                                               | WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)     |
| Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou .....                                                                   | DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)     |
| Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination .....                           | YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)             |
| Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C <sub>60</sub> Nanoparticles in Aquatic Systems .....                                                     | FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)           |
| Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers .....                                 | WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)      |
| Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network .....                                                                                                        | JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)                      |
| Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater .....                                                                        | ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)       |
| Efficacy of A <sup>2</sup> /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling .....                                                       | WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)          |
| Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System .....                                                                   | LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)          |
| Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures .....                                                                                        | LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)     |
| 2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway .....                | SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)       |
| Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge .....                                                                                      | YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)       |
| Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage .....                                                           | LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)                   |
| Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge .....                                                          | MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)                |
| Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes .....                                                                            | LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)            |
| Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Alkaline Process .....                          | JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)     |
| Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain .....                                                                              | DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809) |
| Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain .....                                                                       | QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)     |
| Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area .....                                                                        | WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)        |
| Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China .....                                                | FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)       |
| Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils .....                                                                | SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839) |
| Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment .....                                                             | JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)          |
| Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants .....                              | CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)    |
| Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i> .....              | SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)    |
| Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence .....                                        | LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)      |
| Application of Whole-cell Biosensor ADPI <sub>p</sub> WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment .....                                                                | TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)            |
| Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring .....                                                                  | GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)             |
| Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish .....                                                                                                                               | LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)        |
| Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i> .....                                                                                        | CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)                                    |
| Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions .....                                                                                     | XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)       |
| Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater .....                                         | GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)         |
| Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components .....                                                                                                | LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)            |
| Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment .....                              | DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)            |
| Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications .....                                                         | DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)    |

# 《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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

|         |                                                                                                                                                               |                 |    |                                                                                                                                                                                                                   |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管     | 中国科学院                                                                                                                                                         | Superintended   | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                       |
| 主 办     | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                 | Sponsored       | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                       |
| 协 办     | (以参加先后为序)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                         | Co-Sponsored    | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees.ac.cn<br>http://www.hjkx.ac.cn | Edited          | by | The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE)<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees.ac.cn<br>http://www.hjkx.ac.cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                       | Published       | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@mail.sciencep.com                                                                                             | Distributed     | by | Science Press<br>Tel: 010-64017032<br>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<br>(北京399信箱)                                                                                                                                      | Foreign         |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行