

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

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

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,万金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗烜,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
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	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

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

秦华军¹, 何丙辉^{1*}, 赵旋池², 李源¹, 毛文韬¹, 曾清平¹

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 贵州省毕节市金沙县鼓场街道农业服务中心, 金沙 551800)

摘要: 以重庆市梁平县城东乡云佛村寿竹(Dip)林地为研究对象, 分析了不同坡位[上坡(US)、中坡(MS)、下坡(BS)]和剖面[表层(0~15 cm)、底层(15~30 cm)]土壤微生物量碳、氮(SMBC、SMBN)、微生物碳熵、氮熵($qMBC$ 、 $qMBN$)、土壤过氧化氢酶(CAT)、碱性磷酸酶(ALK)、脲酶(URE)、蔗糖酶(INV)之间的关系。结果表明, 在不同坡位下, 表层土壤 SMBC、SMBN、 $qMBC$ 、 $qMBN$ 、CAT 和 INV 表现为 BS>MS>US, ALK 呈 BS>US>MS, URE 呈 MS>US>BS; 底层土壤 SMBC 和 $qMBC$ 呈 MS>BS>US, SMBN、 $qMBN$ 、CAT、ALK、URE 和 INV 呈 BS>MS>US。在不同土壤层次下, SMBC、SMBN、CAT、ALK、URE 和 INV 均表现为表层>底层; $qMBC$ 和 $qMBN$ 表现为底层>表层。相关分析表明, 不同坡位和剖面层次土壤微生物碳氮与土壤酶活性、含水率之间均存在显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关。从回归分析得出的2个方程可知, SMBC 随着土壤 CAT 和 ALK 的增加而增加, 随着 pH 的增大而减小; SMBN 则随着 INV 和 ALK 的增加而增加。

关键词: 喀斯特山地; 寿竹林; 坡位; 土壤剖面层次; 土壤微生物量; 土壤酶活性

中图分类号: X144; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3580-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.09.046

Influence of Different Slope Position and Profile in *Disporopsis pernyi* Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China

QIN Hua-Jun¹, HE Bing-Hui¹, ZHAO Xuan-chi², LI Yuan¹, MAO Wen-tao¹, ZENG Qing-ping¹

(1. Key Laboratory of Three Gorges Region Eco-Environments, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Guchang Agricultural Service Center of Jinsha County, Jinsha 551800, China)

Abstract: Soil microbial biomass and enzyme activity are important parameters to evaluate the quality of the soil environment. The goal of this study was to determine the influence of different slope position and section in *Disporopsis pernyi* forest land on the soil microbial biomass and enzyme activity in southwest Karst Mountain. In this study, we chose the Dip forest land at Yunfo village Chengdong town Liangping country Chongqing Province as the study object, to analyze the influence of three different slope positions [Up Slope(US), Middle Slope(MS), Below Slope(BS)] and two different sections-upper layer(0-15 cm) and bottom layer(15-30 cm) on the soil microbial biomass carbon (SMBC), soil microbial biomass nitrogen (SMBN), microbial carbon entropy ($qMBC$), microbial nitrogen entropy ($qMBN$), catalase(CAT), alkaline phosphatase (ALK), urease(URE), and invertase(INV). The results showed that the same trend (BS>MS>US) was found for SMBC, SMBN, $qMBC$, $qMBN$, CAT and INV of upper soil layer, while a different trend (BS>US>MS) was observed for ALK. In addition, another trend (MS>US>BS) was observed for URE. The same trend (BS>MS>US) was observed for SMBN, $qMBN$, CAT, ALK, URE and INV in bottom layer, but a different trend (MS>BS>US) was observed for SMBC and $qMBC$. The SMBC, SMBN, CAT, ALK, URE and INV manifested as upper>bottom with reduction of the section, while $qMBC$ and $qMBN$ showed the opposite trend. Correlation analysis indicated that there were significant ($P<0.05$) or highly significant ($P<0.01$) positive correlations among SMBC in different slope position and section, soil enzyme activity and moisture. According to the two equations of regression analysis, SMBC tended to increase with the increasing CAT and ALK, while decreased with the increasing pH. Then SMBN tended to increase with the increasing URE and INV.

Key words: Karst mountain; *Disporopsis pernyi* forest; slope position; soil profile; soil microbial biomass; soil enzyme activity

西南喀斯特山区受地理条件严重制约, 使得生态环境相当脆弱。在高强度的人为活动下导致土壤质量的下降和石漠化的形成^[1]。其主要原因是人类对生态环境恢复原理认识不到位, 偏重视地上经济的发展, 忽视了对生态环境质量的维持和提升。地形因素可以通过调控植被的生长、土壤的理化性质、地下碳

收稿日期: 2014-02-16; 修订日期: 2014-03-19

基金项目: 公益性行业(林业)科研专项(201104043); 重庆市科技攻关重点项目(CSTC2009AB1115); 西南大学青年基金项目(SWU208048); 西南大学生态学重点学科“211工程”三期建设项目

作者简介: 秦华军(1986~), 男, 硕士, 主要研究方向为森林培育和森林生态, E-mail: gzcqinhj@126.com

* 通讯联系人, E-mail: hebingshui@swu.edu.cn

输入以及土壤的微气候等途径间接影响土壤微生物量^[2,3],即使很小的地形变化也会造成短距离内土壤条件的剧烈变化^[4]. 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^[5~7]. 土壤酶活性具有明显的时空变化^[8],并与土壤的温湿度、有机质、养分及微生物等密切相关^[9],是土壤肥力评价的重要指标之一,也是土壤质量和环境变化的生物活性指标^[10]. 目前土壤剖面对微生物量^[11]和酶活性^[12,13],坡位与微生物量^[14],微生物量与酶活性^[15~17],土壤肥力与酶活性^[18]的相关研究较多. 但涉及到坡位和剖面对土壤微生物量和酶活性的关系方面的研究极少,特别是有关我国喀斯特山区寿竹林地的土壤微生物量和酶活性变化特征的研究还未见报道.

寿竹(*Disporopsis pernyi*)是中国所特有的经济竹种,分布区域广,栽培面积大,利用价值高,在我国竹产业中占据着十分重要的地位. 本文以重庆市梁平县为研究基地,选择寿竹林地 3 种坡位[上坡(US)、中坡(MS)、下坡(BS)]的剖面层次土壤作为研究对象,分析土壤微生物量碳、氮、微生物熵、土壤酶活性的剖面分异特征,阐明土壤微生物量与酶活性对不同坡位和剖面层次的响应规律,揭示影响土壤微生物量和酶活性变化的主要因子,以深化对喀斯特山区寿竹林地土壤剖面微生物量与酶活性的认识,以期为该地区的可持续发展提供科学依据.

1 区域概况

本试验采集了重庆市梁平县城东乡云佛村寿

竹(Dip)林地土壤进行研究. 位于重庆市北部梁平县境内,东邻万州区,南接忠县、垫江县,西、北与四川省达州市的大竹县、达县、开江县接界;属于四川盆地东部暖湿亚热带气候区域. 试验地位于东经 107°50′、北纬 30°41′,常年平均气温 14~18℃,日照时数 1 336.4 h,年无霜期 250~300 d,年降雨量 1 000~1 500 mm. 研究区域自然植被以草丛群落为主,草本植物在寿竹林林地内按照上、中、下这 3 个坡位进行林地草本种类调查. 寿竹林地上坡主要草本植物有白茅(*Imperata cylindrica*)、铁线蕨(*Adiantum capillusveneris*)、鸡眼草(*Kummerowia striata*)、飞蓬(*Conyza canadensis*)、山胡萝卜(*Anthriscus aemula*)、叶过路黄(*Lysimachia phyllocephala*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、马兰(*Kalimeris indica*)等;中坡主要草本优势植物有白茅、鸡眼草、飞蓬、海金沙(*Lygodium japonicum*)、临时救(*Lysimachia congestiflora*)、山胡萝卜、野大豆(*Glycine soja*)、球果堇菜(*Viola collina*)、野菊(*Dendranthema indicum*)、小鱼仙草(*Mosla dianthera*)、风轮菜(*Clinopodium umbrosum*)、苔藓(*Bryophyta*)等;下坡主要草本优势植物有白茅、飞蓬、鸡眼草、铁线蕨、风轮菜(*Clinopodium umbrosum*)、球果堇菜、山胡萝卜、地耳草(*Hypericum japonicm*)、苘草(*Arthraxon hispidus*)、苔藓等. 样地土壤为细沙壤、坡向东南、林龄 5 a、坡度 62.3°、株行距 3 m×3 m. 样地基本情况见表 1.

表 1 不同坡位样地林分特征
Table 1 Description of *Disporopsis pernyi* and undergrowth vegetation in different slope position

坡位	寿竹林分特征					
	土深/cm	海拔/m	竹高/m	胸径/cm	寿竹林郁闭度/%	草本郁闭度/%
上	30	500	3.5~6.8	3.2~9.1	18	75
中	30	481	4.0~5.5	5.2~7.9	25	90
下	38	455	4.1~7.0	5.0~7.2	40	99

2 研究方法

2.1 土壤样品的采集

2013 年 8 月,在寿竹林地内,同一坡面的上坡、中坡和下坡分别在相同海拔按照“一”字型各设置 5 个 1 m×1 m 的样地,每一样地中随机选取 1 个采样点,去除表土上覆盖的枯枝落叶后挖掘剖面,测得寿竹林地土层平均深度为 30 cm,所以,用土钻取深度为 0~15 cm(表层)和 15~30 cm(底层)的土壤作为供

试土样,将采集的 5 个表层土样和 5 个底层土样各自混合均匀后,采用四分法取约 500 g 新鲜土壤置于灭菌后的自封袋中,封口后于随身携带的冰盒带回. 在实验室去除土壤中可见的动植物残体,过 2 mm 筛,每个土壤样品分为 2 份:一份在常温下风干,用于土壤常规性质分析;另一份保存于 4℃ 的冰箱中,用于土壤微生物量碳氮和土壤酶活性的测定.

2.2 土壤样品的测定和分析

采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定土壤微生物

生物量碳、氮^[19] (SMBC、SMBN); 高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶 (CAT), 磷酸苯二钠比色法测定碱性磷酸酶 (ALK), 靛酚蓝比色法测定脲酶活性 (URE), 二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性 (INV)^[20]. 土壤含水量采用 105℃ 连续烘干 24 h 后计算得出; pH 值用风干后过 2 mm 筛的土样采用酸度计进行测定 (土: 水 = 1: 2.5); 土壤有机碳用风干后过 100 目筛的土样采用重铬酸钾外加热氧化法测定; 土壤全氮用风干后过 100 目筛的土样采用元素分析仪测定^[19].

2.3 数据处理与统计分析

微生物碳熵 (氮熵):

$qMBC(qMBN) = \text{土壤微生物量碳(或氮)} / \text{土壤有机碳(全氮)} \times 100\%$

不同坡位和剖面层次间土壤因子、土壤酶活性及土壤微生物量的差异评价采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (least significant difference, LSD), 数据的变异用标准差 (standard deviation, SD) 表示, 以坡位 (上、中、下坡位) 和土壤剖面层次深度作为处理因子进行相关性

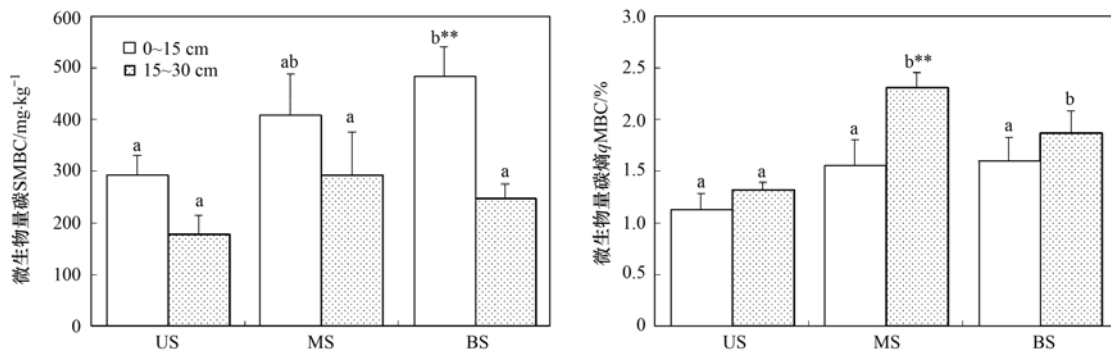
分析, 采用两变量相关分析 (bivariate correlations) 法. 土壤微生物量与土壤酶活性、土壤因子间的关系采用逐步回归法 (stepwise). 用 SPSS 13.0 和 Excel 2010 做统计分析和制图.

3 结果与分析

3.1 不同坡位与剖面层次中土壤微生物量的差异

3.1.1 土壤微生物量碳 (SMBC) 及碳熵 ($qMBC$) 对坡位和剖面层次的影响

寿竹林地同一坡位随着土壤剖面深度增加 SMBC 减少; 随着坡位的降低, SMBC 逐渐增加. 表层 (0 ~ 15 cm) 土下坡位 SMBC ($484.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 较上坡位 ($292.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著 ($P < 0.05$) 增加, 底层 (15 ~ 30 cm) SMBC 在坡中 ($291.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 最高; SMBC 在下坡表层 ($484.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 极显著 ($P < 0.01$) 高于下坡底层 ($247.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 表层 $qMBC$ 在 1.14% ~ 1.60% 之间; 底层 $qMBC$ 在 1.32% ~ 2.31% 之间. 表层土壤中 $qMBC$ 随着坡位降低逐渐增加, 底层 $qMBC$ 在中坡最高, 且极显著 ($P < 0.01$) 高于中坡表层 (图 1).



不同土壤剖面层次差异显著性水平: **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$ (LSD);

不同小写字母表示同一土壤剖面层次差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同坡位下土壤微生物量碳和微生物碳熵

Fig. 1 Comparisons of SMBC and $qMBC$ in different slope positions

3.1.2 土壤微生物量氮 (SMBN) 及氮熵 ($qMBN$) 对坡位和剖面层次的影响

寿竹林地不同土壤剖面层次中 SMBN 随着坡位的降低显著 ($P < 0.05$) 升高; 下坡中 SMBN 在表层 ($56.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 与底层 ($34.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 中均显著 ($P < 0.05$) 高于上坡和中坡; SMBN 在上坡和中坡的表层与底层间均无明显差异 ($P > 0.05$); 下坡表层 SMBN 极显著 ($P < 0.01$) 高于底层. 林地 $qMBN$ 随着坡位降低逐渐升高; 底层 $qMBN$ 均高于表层 $qMBN$, 仅在中坡位达显著水平 ($P < 0.05$), 见图 2.

3.2 不同坡位与剖面层次中土壤酶活性的差异

土壤 CAT 在寿竹林地中随着坡位的降低逐渐升高. 上坡位的土壤 CAT 表层 ($1.49 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$) 显著 ($P < 0.05$) 高于底层 ($0.76 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$); 表层土壤 CAT 在 3 个坡位中无明显差异 ($P > 0.05$), 底层土壤 CAT 在下坡 ($1.36 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$) 显著 ($P < 0.05$) 高于上坡 ($0.76 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$). 土壤 ALK 在不同土壤剖面层次中均表现为下坡 > 上坡 > 中坡. 表层和底层土壤 ALK 均为下坡显著 ($P < 0.05$) 高于上坡和中坡; 表层土壤 ALK 在上坡 ($0.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 和下坡 ($0.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 中均显著 ($P < 0.05$) 高于底层的上坡 (0.25

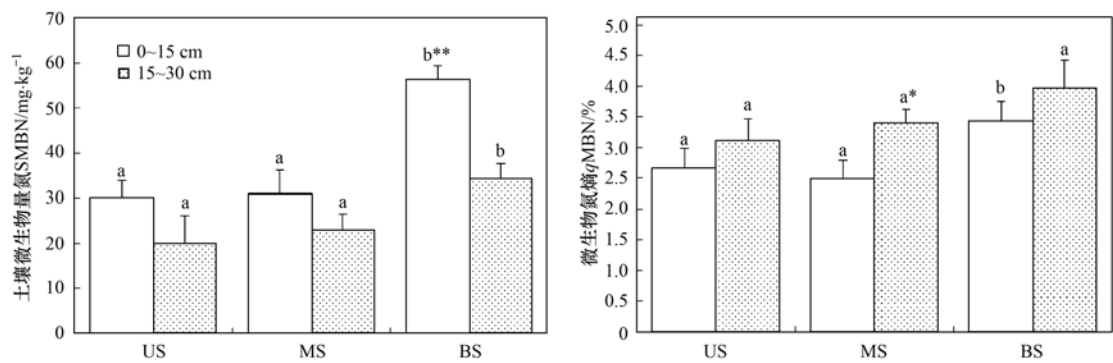


图2 不同坡位下土壤微生物量氮和微生物氮
Fig. 2 Comparisons of SMBN and qMBN in different slope positions

mg·g⁻¹)和下坡(0.39 mg·g⁻¹). 土壤 URE 在同一土壤剖面层次不同坡位间差异不显著($P>0.05$); 土壤 URE 在上坡(1.41 mg·g⁻¹)和中坡(1.57 mg·g⁻¹)表层均极显著($P<0.01$)高于上坡(0.71 mg·g⁻¹)和中坡(0.83 mg·g⁻¹)底层; 下坡表层(1.35 mg·g⁻¹)显著($P<0.05$)高于底层(0.98 mg·g⁻¹). 土壤 INV 在底层不同坡位间差异不显著($P>0.05$); INV 在下坡表层(8.14 mg·g⁻¹)显著($P<0.05$)高于上坡(5.06 mg·g⁻¹)和中坡(5.49 mg·g⁻¹); 在下坡的表层(8.14 mg·g⁻¹)与底层(5.03 mg·g⁻¹)间差异极显著($P<0.01$), 见图 3.

3.3 土壤微生物特性之间及其与土壤酶活性的相关性

土壤酶活性与土壤微生物特性的相关性分析结果表明(表 2), SMBC、qMBC 与含水率呈显著($P<0.05$)正相关, SMBN、INV 与含水率呈极显著($P<0.01$)正相关; SMBC 与 SMBN、CAT、URE 和 TNV 均呈极显著($P<0.01$)正相关, 与 ALK 呈显著($P<0.05$)正相关; qMBC 与 qMBN 呈显著($P<0.05$)正相关; SMBN 与 CAT、ALK 和 TNV 均呈极显著($P<0.01$)正相关, 与 URE 呈显著($P<0.05$)正相关; CAT 与 URE 和 INV 呈极显著($P<0.01$)正相关, 与 ALK 呈显著($P<0.05$)正相关; ALK 与 INV 呈极显著($P<0.01$)正相关.

表 2 土壤微生物特性之间及其与土壤酶活性的相关系数¹⁾

	SMBC	qMBC	SMBN	qMBN	CAT	ALK	URE	INV
SM	0.584 *	0.570 *	0.667 **	0.427	0.408	0.420	0.152	0.679 **
SMBC		0.152	0.691 **	-0.126	0.670 **	0.574 *	0.628 **	0.659 **
qMBC			-0.071	0.509 *	-0.054	-0.182	-0.377	0.015
SMBN				0.299	0.651 **	0.785 **	0.525 *	0.828 **
qMBN					0.038	0.135	-0.409	0.192
CAT						0.534 *	0.791 **	0.629 **
ALK							0.395	0.641 **
URE								0.440

1) 显著性水平: * 表示 $P<0.01$, * 表示 $P<0.05$ (Pearson); SM: soil moisture, 含水量; SMBC: soil microbial biomass carbon, 土壤微生物量碳; SMBN: soil microbial biomass nitrogen, 土壤微生物量氮; qMBC: ratio of SMBC to soil organic carbon, 碳氮比; qMBN: ratio of SMBN to soil total nitrogen, 氮氮比; CAT: catalase activity, 过氧化氢酶; ALK: alkaline phosphatase, 碱性磷酸酶; URE: urease, 脲酶; INV: invertase, 蔗糖酶

3.4 土壤微生物量与土壤酶活性、土壤含水量、pH 的回归分析

为了更好地说明土壤微生物量与土壤酶活性、土壤含水量、pH 之间的关系, 采用逐步回归分析所得最优回归方程:

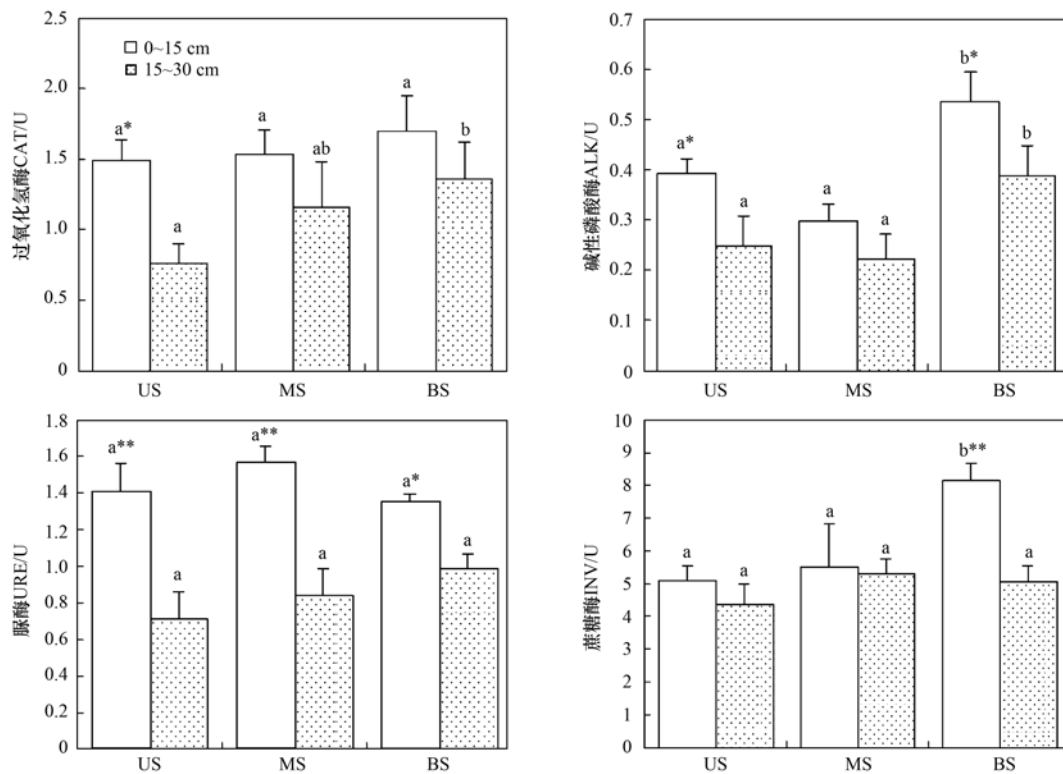
$$Y_1 = 5\,951.509 + 251.364X_1 - 871.639X_2 + 436.225X_3$$

式中, Y_1 : SMBC, X_1 : CAT, X_2 : pH, X_3 : ALK. CAT、

pH 和 ALK 对 SMBC 的偏相关系数分别为 0.807 ($P<0.01$)、-0.644 ($P<0.01$) 和 0.444 ($P<0.05$), 可知 CAT、pH 和 ALK 对 SMBC 的贡献较大, 随着 CAT 和 ALK 的增加, SMBC 也急剧增加, 而随着 pH 的增大 SMBC 则减小.

$$Y_2 = -10.876 + 4.939X_1 + 46.002X_2$$

式中, Y_2 : SMBN, X_1 : INV, X_2 : ALK. INV 和 ALK 对 SMBN 的偏相关系数分别为 0.551 ($P<0.01$)



过氧化氢酶活性以 1 g 干土 1 h 内消耗的 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ 体积 (mL) 数表示; 碱性磷酸酶活性以 1 g 干土 24 h 内释放出的酚的质量 (mg) 表示; 脲酶活性以 1 g 干土 24 h 内生成 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量 (mg) 表示; 蔗糖酶活性以 1 g 干土 24 h 内生成葡萄糖的质量 (mg) 表示

图 3 不同坡位下土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性

Fig. 3 Comparisons of CAT, ALK, URE and INV in different slope positions

和 0.432 ($P < 0.05$), 可知 INV 和 ALK 对 SMBN 的贡献较大, 随着 INV 和 ALK 的增加, SMBN 也增加。

4 讨论

4.1 土壤微生物量碳氮与微生物熵对坡位及其剖面层次的响应

土壤微生物量碳氮在土壤中仅占很小比例, 但它却是最活跃的部分之一, 特别是在土壤碳氮循环中, 是活性最强的部分^[21, 22]。一般情况下, 土壤微生物量碳氮含量除受到土壤中有有机碳源和氮源的影响外^[23], 还受到土壤质地、植被类型^[11]、气候因子等许多因素的影响, 且由于坡位和坡向的不同, 微生物量碳氮也会呈现规律性的变化, 土壤碳库和氮库表现为随土壤剖面层次的加深而减少^[24]。本研究表明, 随着坡位的降低, 底层 SMBC 表现出 $\text{MS} > \text{BS} > \text{US}$, 这与何容等^[11]在研究武夷山微生物量时得到的结论 ($\text{US} > \text{MS} > \text{BS}$) 不一致, 但与胡宗达等^[25]在川滇高山栎林中研究的结论相一致。表层 SMBC 由 US、MS、BS 依次递增, SMBN 在土壤表层中也呈现出类似的趋势, 这与许多^[11, 15, 26]研究不一致, 却与张

地等^[27]在对东灵山辽东栎林中不同坡位土壤微生物量的研究相一致, 这可能与地理位置有关。本研究中, 土壤微生物量的变化幅度很大, 可能与样点的空间异质性较大有关, 下坡与上坡间土壤微生物量碳氮的差异显著^[28] ($P < 0.05$)。在喀斯特地区, 土壤微生物量对土层深度的响应比坡位更为强烈 (图 1、2), 而土壤养分在各土地利用类型剖面层次中遵循表聚特征^[29], 致使寿竹林表层 SMBC 和 SMBN 在 BS 极显著 ($P < 0.01$) 高于底层。同时也表明土壤微生物量是不同坡位上多重影响因素多方面综合作用的结果。

$q\text{MBC}$ 的变化可反映出土壤有机碳的变化^[30], 在指示土壤过程或者健康状况时, 被用作土壤性质以及健康的指标^[31]。研究发现, 坡位和剖面层次对 $q\text{MBC}$ 有一定影响, $q\text{MBC}$ 在 3 种坡位底层中表现为下坡和中坡显著 ($P < 0.05$) 高于上坡, 表明下坡和中坡底层土壤结构性好, 沉淀富集, 土壤肥力水平比上坡高。 $q\text{MBN}$ 反映微生物对全氮的利用效率, 在两层土壤下均表现出 $\text{BS} > \text{MS} > \text{US}$, 且在表层土壤中下坡显著 ($P < 0.05$) 高于上坡和中坡, 这可能是由于下坡位是坡面养分的汇集处^[32]。

4.2 土壤酶活性对坡位和剖面层次的响应

土壤中一切生化反应都是在土壤酶的参与下完成的,土壤酶活性的高低能反映土壤生物活性和土壤生化反应强度,土壤酶活性常被作为土壤质量的重要指标来研究^[33],尤其是 CAT 活性常被用来反映土壤微生物活性高低^[34]. 本研究中,CAT、ALK、URE 和 INV 活性随土壤剖面层次的加深呈递减趋势,这与文献[14,16]的研究结论一致,主要原因是由于土壤表层累积了大量的枯枝落叶和腐殖质,加上光、水、热和通气状况等良好,为微生物和土壤动物生长提供良好环境,加速了有机物的分解,为土壤酶提供了更多的底物^[35,36]. 微生物在充足的营养环境中大量繁殖,使得微生物生长旺盛,代谢活跃,呼吸强度加大而使表层积聚了较高的土壤酶活性,随着土壤剖面层次的加深,土壤有机质含量减少,土壤通透性等因子也急剧下降,土壤酶活性也随着下降. 本研究亦表明在坡底处微生物量碳氮含量有所累积,但是酶的活性分布规律却不一,说明酶活性与土壤养分在坡面中的分布不同,土壤酶活性在坡地土壤的分布并没有在坡面流失和坡底富集的趋势,这与土壤酶的来源、生物学特征和微地形的变化有关. 结果显示,ALK 和 INV 在下坡含量显著大于中坡和上坡,原因应与下坡位土壤物理结构性能较好,养分含量较高,植被丰富等有关^[37]. 土壤表层 CAT 和 URE 在 3 个坡位间无明显差异,这应与植被长势和坡位差异有关^[12,38],URE 在剖面层次中存在极显著($P < 0.01$)差异^[14,16].

4.3 土壤微生物量与土壤酶活性的相关性

关于土壤微生物量和土壤酶关系的报道结果不相一致^[15,16,37,38],这可能和研究区域及土地利用方式的不同有关. 不同坡位与土壤剖面层次上土壤微生物量碳氮与土壤酶活性有着复杂的联系,不能简单地说土壤微生物碳氮的增加或减少有助于提高土壤中酶的活性. 文都日乐等^[16]在研究呼伦贝尔草地上土壤微生物量与土壤酶活性中也发现,CAT 与微生物量碳氮呈显著($P < 0.05$)正相关,却与 URE 呈负相关关系,后一点与本研究不一致,可能与坡位、地上植被、土壤质地等因子有关. 成毅等^[15]在研究宁南山区土壤微生物生物量和酶活性的分布特征时发现土壤微生物碳氮与 CAT、INV 和 ALK 均呈极显著($P < 0.01$)正相关关系,丁菡等^[37]在研究半干旱区土壤酶活性与其理化及微生物的关系时和王光华等^[13]在研究黑土土壤酶活性与微生物量之间关系中也得到相似结果,与本研究结论一致. 本研

究中,SMBC 和 SMBN 与 SM、CAT、URE、INV 和 ALK 均呈显著或极显著正相关关系,表明 SM、CAT、URE、INV 和 ALK 可能是调节土壤微生物量碳氮沿坡位梯度变化的主要生态因子.

5 结论

(1)西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量碳氮从上坡到下坡逐渐增加,每个坡位的表层土壤微生物量碳氮均大于底层.

(2)寿竹林地土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性随土壤剖面层次的加深而减少,碱性磷酸酶和蔗糖酶在下坡含量显著大于中坡和上坡.

(3)寿竹林地土壤微生物量碳氮与土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性均呈显著或极显著正相关.

参考文献:

- [1] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. 草业科学, 2008, **25**(9): 19-25.
- [2] 陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 等. 不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroRespTM 方法[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2375-2382.
- [3] 黄靖宇, 宋长春, 宋艳宇, 等. 湿地垦殖对土壤微生物量及土壤溶解有机碳、氮的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1380-1387.
- [4] Zak D R, Hairston A, Grigal D F. Topographic influences on nitrogen cycling within an upland Pin Oak Ecosystem[J]. Forest Science, 1991, **37**(9): 45-53.
- [5] 付融冰, 朱宜平, 杨海真, 等. 修复富营养化水体的潜流湿地中微生物生物量特征[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2754-2759.
- [6] 魏媛, 张金池, 余元春, 等. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤基础呼吸及代谢熵的变化[J]. 土壤通报, 2010, **41**(4): 797-801.
- [7] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H Q, *et al.* Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(2): 210-219.
- [8] 万忠梅, 宋长春. 三江平原小叶章湿地土壤酶活性的季节动态[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(5): 1215-1220.
- [9] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, *et al.* Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(3): 387-401.
- [10] 郑文教, 王良睦, 林鹏. 福建和溪亚热带雨林土壤酶活性的研究[J]. 生态学杂志, 1995, **14**(6): 16-20.
- [11] 何容, 汪家社, 施政, 等. 武夷山植被带土壤微生物量沿海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2009, **29**(9): 5138-5144.

- [12] 周玮, 周运超. 北盘江喀斯特峡谷区不同植被类型的土壤酶活性[J]. 林业科学, 2010, **46**(1): 136-141.
- [13] 王光华, 金剑, 韩晓增, 等. 不同土地管理方式对黑土土壤微生物量碳和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(6): 1275-1280.
- [14] 冯书珍, 苏以荣, 秦新民, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤剖面微生物特性对植被和坡位的响应[J]. 生态学报, 2013, **33**(10): 3148-3157.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 潘能, 侯振安, 陈卫平, 等. 绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4081-4087.
- [18] 王翔, 李晋川, 岳建英, 等. 安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3601-3606.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 42-48.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [21] Warder D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil [J]. Biological Reviews, 1992, **67**(3): 321-358.
- [22] 王启兰, 王长庭, 杜岩功, 等. 放牧对高寒嵩草草甸土壤微生物量碳的影响及其与土壤环境的关系[J]. 草业学报, 2008, **17**(2): 39-46.
- [23] Witter E, Mårtensson A M, Garcia F V. Size of the soil microbial biomass in a long-term field experiment as affected by different N-fertilizers and organic manures [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993, **25**(6): 659-669.
- [24] Agnelli A, Ascher J, Corti G, *et al.* Distribution of microbial communities in a forest soil profile investigated by microbial biomass, soil respiration and DGGE of total and extracellular DNA[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36**(5): 859-868.
- [25] 胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等. 川滇高山栎林土壤氮素和微生物量碳氮随海拔变化的特征[J]. 林业科学研究, 2012, **25**(3): 261-268.
- [26] 薛莲, 李鹏, 李占斌, 等. 不同海拔对干热河谷土壤微生物量及活性的影响[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(11): 1888-1895.
- [27] 张地, 张育新, 曲来叶, 等. 坡位对东灵山辽东栎林土壤微生物量的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(20): 6412-6421.
- [28] Khalili-Rad M, Nourbakhsh F, Jalalian A, *et al.* The effects of slope position on soil biological properties in an eroded toposequence[J]. Arid Land Research and Management, 2011, **25**(3): 308-312.
- [29] 魏兴平, 袁道先, 谢世友. 运用¹³⁷Cs与土壤营养元素探讨重庆岩溶槽谷区山坡土壤的流失和漏失[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(6): 16-23.
- [30] 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 等. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应[J]. 中国农业科学, 2006, **39**(7): 1411-1418.
- [31] 何寻阳, 王克林, 陈志辉, 等. 岩溶洼地土壤微生物指标对不同土地利用方式的响应[J]. 土壤通报, 2008, **39**(3): 509-513.
- [32] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, *et al.* Ecological linkages between aboveground and belowground biota [J]. Science, 2004, **304**(5677): 1629-1633.
- [33] de la Paz Jimenez M, de la Horra A, Pruzzo L, *et al.* Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **35**(4): 302-306.
- [34] von Mersi W, Schinner F. An improved and accurate method for determining the dehydrogenase activity of soils with iodonitrotetrazolium chloride[J]. Biology and Fertility of Soils, 1991, **11**(3): 216-220.
- [35] Kautz T, López-Fando C, Ellmer F. Abundance and biodiversity of soil microarthropods as influenced by different types of organic manure in a long-term field experiment in Central Spain [J]. Applied Soil Ecology, 2006, **33**(3): 278-285.
- [36] Marschner P, Kandeler E, Marschner B. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(3): 453-461.
- [37] 丁茜, 胡海波, 王人潮. 半干旱区土壤酶活性与其理化及微生物的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007, **31**(2): 13-18.
- [38] 赵汝东, 樊剑波, 何园球, 等. 坡位对马尾松林下土壤理化性质、酶活性及微生物特性影响[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(12): 2857-2862.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《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9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 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

国内外公开发行人