

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM ₁₀ 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM ₁₀ 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶花香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283)	
《环境科学》征稿简则 (1332)	
信息 (1350, 1509, 1582, 1644)	
专辑征稿通知 (1523)	

亚热带不同稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征

盛浩¹, 周萍², 袁红¹, 廖超林¹, 黄运湘¹, 周清¹, 张杨珠^{1*}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 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)

摘要: 土壤微生物生物量碳是稻田土壤有机质最具活性的组分之一, 可有效地指示土壤质量状况. 为探明亚热带地区不同类型稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征及其与土壤有机碳及养分的关系, 通过选取 5 种不同母质发育的稻田土壤, 采集土壤发生层次分层样品, 分析其有机碳、微生物生物量碳以及土壤养分的分布特点. 结果表明, 土壤有机碳和微生物生物量碳含量均随土壤深度的加深而急剧下降, 分别介于 $2.45 \sim 26.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.55 \sim 1691.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以耕作层和犁底层的含量最为丰富. 不同母质发育的稻田表层土壤微生物生物量碳含量存在显著差异, 以板岩风化物发育的黄泥田 I 最高, 河沙泥和红黄泥最低; 而有机碳含量却以红黄泥和河沙泥最高, 其余几种土壤之间并无明显差异. 尽管如此, 土壤微生物生物量碳依然受有机碳数量的限制, 两者呈显著的正相关关系. 土壤微生物商亦随土壤深度的增加而明显降低, 不同类型土壤耕作层微生物商以河沙泥 (2.11%) 和红黄泥 (1.37%) 相对最低, 而板岩风化物发育的黄泥田 I 最高 (8.24%), 说明河沙泥和红黄泥的底物有效性明显低于黄泥田, 这也是河沙泥和红黄泥有机碳含量最高而微生物生物量最低的原因之一. 土壤微生物生物量碳含量与土壤全氮、碱解氮和有效磷呈显著的正相关关系, 而与土壤速效钾的相关性不明显, 说明稻田土壤微生物生物量碳除受有机碳的限制外, 还与土壤养分存在较为复杂的关系.

关键词: 水稻土; 母质; 有机碳; 微生物生物量碳; 底物有效性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1576-07

Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils

SHENG Hao¹, ZHOU Ping², YUAN Hong¹, LIAO Chao-lin¹, HUANG Yun-xiang¹, ZHOU Qin¹, ZHANG Yang-zhu¹

(1. College of Resources & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: The soil microbial biomass carbon (C_{mic}), one of the most active components of soil organic carbon (C_{org}), is an effective indicator of soil quality. In the present study, five subtropical paddy soils developed from different parent materials were selected, and the distribution of C_{mic} through the profiles was studied, as well as the relationship of C_{mic} with C_{org} and soil nutrients. The results showed that the contents of C_{org} and C_{mic} decreased markedly with increasing soil depth, ranging from $2.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $26.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and from $4.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $1691.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. They mainly concentrated in the surface layer (plough horizon and plough pan). The content of C_{mic} varied significantly in paddy soils developed from different parent materials, with the highest one in yellow clayey soil, and the lowest ones in alluvial sandy soil and reddish yellow clayey soil. This was on the contrary to the distribution of C_{org} in the surface paddy soils, since the reddish yellow clayey soil and alluvial sandy soil showed higher contents while other types of paddy soils exhibited similar contents of C_{org} . Notwithstanding, C_{mic} was still controlled by the quantity of C_{org} and positively correlated with C_{org} . The ratio of C_{mic} to C_{org} ($C_{\text{mic}}/C_{\text{org}}$) decreased with increasing soil depth and differed in the plough horizon between different paddy soils, with lower values in alluvial sandy soil (2.11%) and reddish yellow clayey soil (1.37%) but higher value in reddish yellow clayey soil I (8.24%). It indicated that the microbial substrate availability in alluvial sandy soil and reddish yellow clayey soil was lower than those in reddish yellow clayey soils. The content of C_{mic} was significantly positively correlated with total nitrogen, alkali-hydrolyzable N and Olsen-P, but was irrelevant to available K. It is implied that the C_{mic} was not only controlled by C_{org} , but also complicatedly interacted with soil nutrients in paddy soils.

Key words: paddy soil; parent material; organic carbon; microbial biomass carbon; substrate availability

土壤微生物生物量通常指土壤中体积 $< 5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ 的生物总量 (包括细菌、真菌、放线菌和小型动物), 常以生物量碳含量的形式表示, 一般仅占土壤有机碳含量的约 1% ~ 8%, 但它在土壤形成和发育、有机质分解和养分释放、土壤质量和气候变化

收稿日期: 2012-07-13; 修订日期: 2012-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41001141, 31100381); “十二五”国家科技支撑计划项目 (2012BAD14B17)

作者简介: 盛浩 (1982 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为土壤碳过程. E-mail: shenghao82@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangyangzhu2006@163.com

方面都起着重要作用^[1,2]。土壤微生物生物量还对土地利用/覆被变化和农业管理措施(如耕作、施肥)的反应非常敏感,是土壤健康和环境变化最敏感的生命指标,对自然和人为干扰的响应快速且具有指示作用^[3~5]。因此,研究不同类型土壤的微生物生物量碳分布特征与差异对于提升土壤肥力、科学和可持续地利用土壤资源具有重要意义。

土壤微生物生物量碳主要受土壤母质、气候条件(温度和水分)、植被以及人类活动(如土地利用、耕作、施肥、火烧)等因素的影响^[6~8]。尽管目前有关稻田土壤微生物生物量碳已有一定的研究,但主要集中在施肥^[6,9~13]、种植制度^[14,15]、耕作^[16,17]和土地利用^[18,19]、重金属污染^[20,21]等对表层土壤微生物量碳的影响上。但是,目前对于不同类型稻田土壤底土层微生物生物量的研究相对较少,特别是稻田土壤微生物生物量沿土壤发生层的剖面分布特征仍缺乏充分的了解。本研究通过选取湖南省长沙市郊 5 种不同母质发育的稻田土壤,探

讨其土壤微生物生物量碳的剖面分布特征,分析不同母质稻田土壤微生物生物量碳剖面分布的差异,以及微生物生物量碳与土壤养分的相互关系,旨在为我国亚热带稻田土壤肥力的维持和提升提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤样品采自湖南省长沙市郊,属传统双季稻作区。该区域地处洞庭湖平原南端湘中丘陵盆地的过渡地带,地貌为湘江流域河谷平原、河流阶地。当地属湿润的亚热带季风气候,春夏冷暖气流交替频繁,夏秋晴热少雨,秋寒偏早,年均气温 16.8~17.3℃,年均降水量 1 358.6~1 552.5 mm。当地稻田排灌条件好,地面灌溉水以及地下水影响强烈,土层分异明显,多属潜育型水稻土,即普通铁聚水耕人为土。耕作以少免耕为主,当地习惯性施肥方式以化肥为主。采样地概况见表 1。

表 1 供试土壤采样地概况

Table 1 Basic information of the soil sampling sites							
土壤类型	母质	经度(E)	纬度(N)	海拔/m	地形部位	土体构型 ¹⁾	土层深度/cm
黄泥田 I	板岩风化物	112°04′	28°10′	250	三排田	A _a -A _p -P-W _c -C	0~13、13~18、18~34、34~67、>67
黄泥田 II	砂质板岩风化物	113°01′	28°20′	46	三排田	A-P-W _c -C	0~15、15~25、25~66、>66
麻砂泥	花岗岩风化物	113°02′	28°23′	57	三排田	A-P-W ₁ -W ₂	0~14、14~34、34~78、>78
河沙泥	近代河流冲积物	112°36′	28°17′	44	一级阶地	A _a -P-W ₁ -W ₂	0~12、12~19、19~32、32~42
红黄泥	第四纪红土	112°29′	28°18′	60	一排田	A _a -A _p -W-W _c -C	0~14、14~20、20~46、46~84、>84

1) 字母分别表示: A 耕作层、A_a 腐殖质良好的耕作层、A_p 犁底层、P 渗育层、W_c 有石块存在的潜育层、W_e 有渗育漂洗的潜育层、W 潜育层、W₁ 潜育层亚层、W₂ 潜育层亚层、C 母质层

1.2 样品采集

2010 年 12 月,选择 5 种典型母质类型的潜育型水稻土,每种土壤类型随机挖掘 3 个土壤剖面,按土壤发生层次采集土样。采集的新鲜土样,除去石砾、可见动植物残体后,过 2 mm 孔径的尼龙筛,混匀。将土样分成 2 份,一份调节土壤含水量约为田间饱和持水量的 45%,置于 25℃、100% 空气湿度和黑暗条件下预培养 7~10 d,用于测定土壤微生物生物量碳;另 1 份土样自然风干,磨碎过 0.15 mm 孔径的尼龙筛,用于测定土壤有机碳和养分含量。

1.3 分析方法

土壤微生物生物量碳的测定采用熏蒸提取-碳自动分析仪法^[22,23],即称取 6 份经预培养的土样,每份土壤 25.00 g(烘干基),其中 3 份用氯仿熏蒸(24 h),除去氯仿后立即用 0.5 mol·L⁻¹的 K₂SO₄ 溶液(土水比 1:4,质量浓度)浸提,过滤;另 3 份土样不熏蒸,浸提方法同上。浸提液中有机碳含量采用

碳自动分析仪(Phoenix 8000)测定。微生物生物量碳以熏蒸土样与不熏蒸土样提取的有机碳的差值乘以转换系数 K_C(2.22)计算得到。

土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定^[24]。土壤全氮采用流动注射仪(FIASTAR 5000)测定。碱解氮采用碱解扩散法测定。有效磷采用碳酸氢钠法测定。速效钾采用醋酸铵浸提,火焰光度计测定。

1.4 数据分析

所有的数据统计和分析均在 Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件平台实现。土壤微生物商通过微生物生物量碳占有机碳的百分比计算得到。回归方程的统计显著性水平平均设为 5%,极显著性水平设为 1%。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳的剖面分布特征

所选亚热带 5 种不同类型稻田土壤的有机碳含量均随土层的加深而明显降低(图 1)。耕作层(A/

A_a 层)的有机碳积累最为显著,其变幅为 $19.90 \sim 26.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 5 种稻田土壤中,仅红黄泥和板岩风化物发育的黄泥田 I 具有犁底层(A_p),其有机碳含量也相对较高,分别为 $14.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $21.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 而 P 层及其以下层次有机碳含量明显最低,仅为 $2.45 \sim 10.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 不同类型稻田土壤有机碳含量的差异主要表现在耕作层,以红黄泥显著最高,达到 $26.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其次为河沙泥,为 $22.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而其余几种稻田土壤之间有机碳含量并无明显差异.

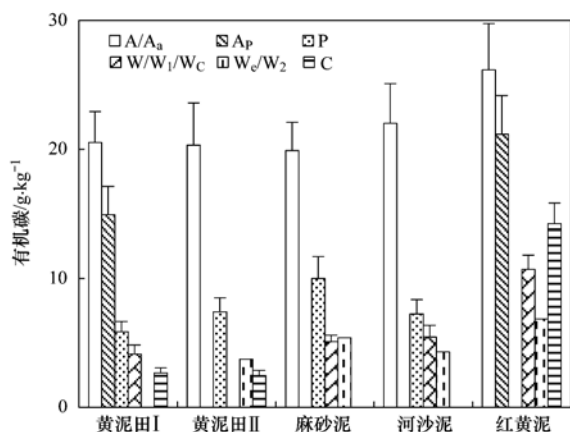


图 1 不同类型稻田土壤有机碳的剖面分布

Fig. 1 Profile distributions of soil organic carbon in different types of paddy soils

2.2 土壤微生物生物量碳的剖面分布特征

与土壤有机碳的剖面分布特征相似,微生物生物量碳含量也随土层的加深而明显降低(图 2),并以耕作层(A_a 或 A 层)的含量最为丰富,介于 $357.80 \sim 1691.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间. 红黄泥和板岩风化物发育的黄泥田 I 的犁底层(A_p),其微生物生物量碳含量与耕作层相比明显降低,分别为 $92.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $980.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占耕作层的比例分别

为 26% 和 58%. 渗育层(P)微生物生物量碳的下降幅度更为剧烈,含量仅介于 $22.56 \sim 159.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,而潜育层(W)和母质层(C)的微生物生物量碳含量最低,仅仅为 $4.55 \sim 18.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

耕作层土壤微生物生物量碳在不同类型稻田土壤之间差异明显,以板岩风化物发育的黄泥田 I 最高($1691.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其次为紫色砂质板岩风化物发育的黄泥田 II ($1351.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),而河沙泥和红黄泥明显较低,分别仅为 $464.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $357.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 但是,土壤剖面微生物生物量碳随深度的下降幅度却以河沙泥最高,其渗育层(P)仅占耕作层(A)的 5%;而板岩风化物发育的黄泥田 I 和红黄泥因犁底层(A_p)的阻隔,其下降幅度相对较低,犁底层(A_p)占耕作层(A_a)的比例分别为 58% 和 26%.

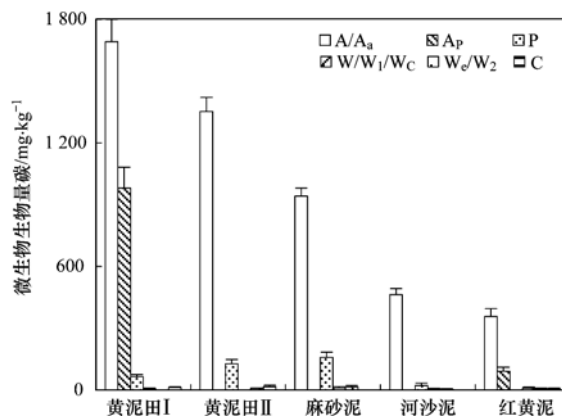


图 2 不同类型稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布

Fig. 2 Profile distributions of soil microbial biomass carbon in different types of paddy soils

2.3 土壤微生物生物量碳与土壤有机碳的关系

由图 3 可见,不同类型稻田土壤剖面的微生物生物量碳含量随土壤有机碳含量的升高而明显升

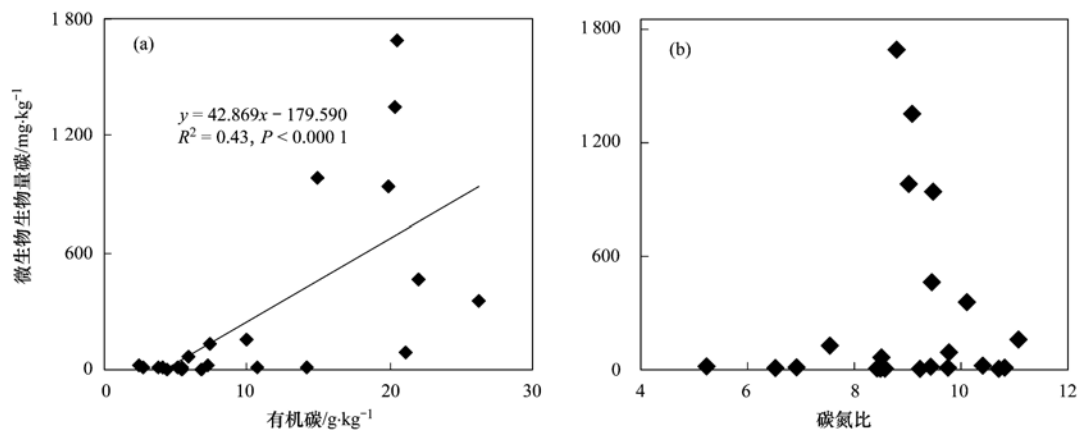


图 3 稻田土壤微生物生物量碳与土壤有机碳、碳氮比的关系

Fig. 3 Relationships of soil microbial biomass carbon to soil organic carbon and the ratio of carbon to nitrogen in paddy soils

高,两者呈极显著的线性正相关关系($P < 0.001$),而与土壤碳氮比之间的相关性并不明显。

所选 5 种稻田土壤微生物商的剖面分布特征与微生物生物量碳相似,即随土层的加深而明显降低(表 2),以耕作层明显最高,介于 1.37%~8.24%之间。但是,不同类型稻田土壤之间土壤微生物商随土层加深而降低的幅度存在较大差异,以红黄泥的降幅最大,其犁底层微生物商仅为耕层的 32.1%,而板岩风化物发育的黄泥田 I 的降幅较小,其犁底层微生物商占到耕层的 79.7%。虽然潴育层和母质层的微生物商较低(0.04%~0.74%),但仍不容忽视。在潴育层和母质层,微生物商似乎有升高的趋势(表 2),其原因可能是表层溶解性有机质淋溶迁移至底层,使得微生物可利用碳源有所增加所致。

不同类型稻田土壤耕作层微生物商以板岩风化物发育的黄泥田 I 最高,达到 8.24%,其次为黄泥田 II 和麻砂泥,分别为 6.66% 和 4.73%,而河沙泥和红黄泥的相对较低,分别仅为 2.11% 和 1.37%。

2.4 土壤微生物生物量碳与养分的关系

相关性分析表明,土壤微生物生物量碳含量与土壤全氮含量、碱解氮含量均呈极显著的指数正相关关系($P < 0.01$),与有效磷含量呈极显著的线性

正相关关系($P < 0.01$),但与速效钾含量之间并无显著相关关系(图 4)。由此可见,几种稻田土壤微生物种群的增长除了受有机底物的限制外,还受土壤养分,特别是氮、磷的限制。

表 2 不同类型稻田土壤微生物商的剖面分布/%
Table 2 Profile distributions of microbial quotient in different types of paddy soils/%

剖面层次	黄泥田 I	黄泥田 II	麻砂泥	河沙泥	红黄泥
A/A _a	8.24	6.66	4.73	2.11	1.37
A _p	6.57	—	—	—	0.44
P	1.13	1.72	1.60	0.31	—
W/W ₁ /W _c	0.16	—	0.23	0.09	0.10
W _c /W ₂	—	0.24	0.29	0.11	0.08
C	0.46	0.74	—	—	0.04

3 讨论

微生物生物量是土壤物质循环的“发动机”,亦是土壤肥力、健康状况早期变化的“指示器”。稻田土壤作为陆地最大的人为湿地,容纳着高出旱地、林地的微生物生物量。所选亚热带 5 种不同类型的稻田土壤剖面微生物生物量碳含量随着土层深度的增加而明显下降,不同发生层次之间差异异常明显。其中,耕作层(A/A_a层)维持了相当高的微生物生

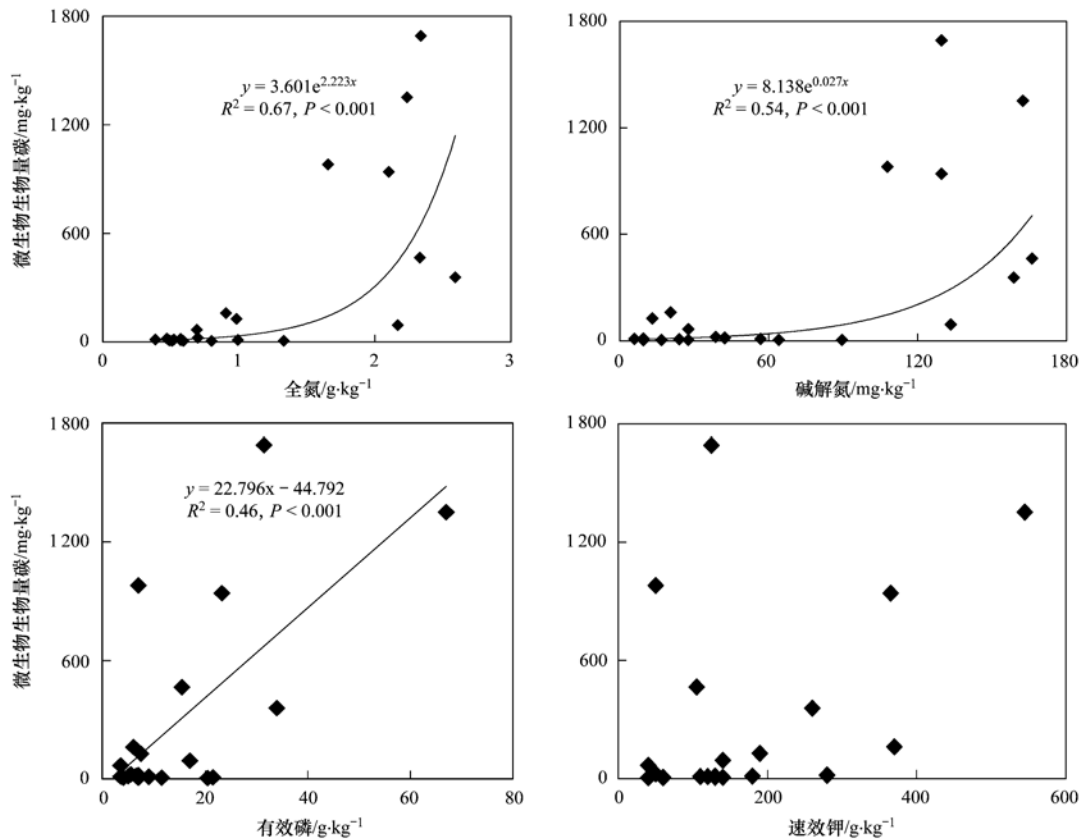


图 4 稻田土壤微生物生物量碳与和土壤养分的关系

Fig. 4 Relationships between soil microbial biomass carbon and total N, alkali-hydrolyzable N, Olsen-P and available K in paddy soils

物量碳,介于 $357.80 \sim 1691.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间(平均为 $961.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),这可能是因为作物残茬、地下死根、活根分泌物和脱落细胞、有机肥等新鲜有机物质集中在表层,导致耕作层土壤有机碳含量相对较高,且耕作层土壤结构、孔隙度、通气性、温度和湿度等物理性状比较适宜微生物种群的生长。犁底层由于土壤压实性增强,土壤环境条件相对较差,微生物生长受到一定的限制,但由于耕作层活性有机物质(特别是溶解性有机质)向下淋溶迁移,受犁底层阻隔后不易继续向下迁移,从而可被微生物利用,因此该层依然具有一定数量的微生物生物量碳。而渗育层、潴育层,以及母质层由于有机碳含量很低,且经常受地下水的影响,土壤通气性差,并不适宜于微生物生长。对于森林、草原、湿地等自然土壤而言,土壤微生物生物量碳含量随深度的增加而显著降低^[25,26]。然而,农业土壤常因频繁翻耕,打破了原有的土壤层次结构,也常在土壤剖面出现下层土壤(如 $15 \sim 30 \text{ cm}$)微生物生物量碳含量高于表层土壤(如 $0 \sim 15 \text{ cm}$)的现象^[13,26,27]。本研究中土壤微生物生物量碳的剖面分布趋势与自然土壤相一致,并未出现下层微生物生物量碳高于表层的现象。这可能跟当地耕作措施大多采用少免耕且耕层较浅有关,从而使得表层土壤减少了因频繁耕作而导致的土壤混合现象。

仅耕层土壤而言,其微生物生物量碳含量与区域内已有稻田土壤微生物生物量碳的报道值基本一致^[10,17,18,25,28],但高于岩溶区稻田土壤 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 的平均值($539 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[19],这可能与区域气候、母质、农业管理措施、采样深度(本研究中 A/A_0 层 $12 \sim 15 \text{ cm}$,表1)等的差异有关。不同类型稻田土壤微生物生物量碳含量的差异非常大,鉴于所选几种水稻土的气候、地形条件一致,农田管理措施相似,可以推断,这种差异主要与不同母质发育的稻田土壤的理化性质(土壤质地、pH、有机质含量及矿质养分水平)的差异有关(图3、图4)。尽管表层土壤(耕作层和犁底层)的土层较浅($12 \sim 20 \text{ cm}$,表1),但微生物生物量碳相对丰富。若了解短期、大范围尺度(景观或区域及以上)稻田土壤剖面微生物生物量碳的变动状况,仅仅采集表层 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 的土样似乎就可满足要求。鉴于所选稻田土壤的种类较少,这还有待于更多土壤类型的进一步验证。

土壤有机质作为微生物活动的重要碳源,其与微生物生物量碳之间的关系非常密切。本研究中土壤微生物生物量碳随土壤有机碳含量的增加而显著

增加(图3),表明稻田土壤微生物生物量受有机底物数量的限制。这与已有亚热带地区稻田土壤的相关报道相一致^[10,18,25,29]。Kaye 等^[30]的研究指出,当土壤碳氮比低于 $20 \sim 30$ 以下时,微生物生物量可能受到有机碳数量的限制。本研究中土壤碳氮比介于 $5.2 \sim 11.1$ 之间,按此标准,可以推断土壤微生物种群的生长仍旧受有机碳数量的限制。也有个别研究报道岩溶区不同稻田表层土壤的微生物生物量碳含量与土壤有机碳含量没有显著的相关关系^[19],这可能与当地的田块垦殖年限较短以及人为管理措施存在较大差异有关。土壤有机碳的质量,即底物有效性,亦是限制土壤微生物生物量的重要因子。本研究中红黄泥的有机碳含量($26.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)最高,但其微生物生物量碳含量($357.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)却最低,究其原因,可能跟红黄泥的底物有效性较低有关。这也可以从微生物商得到进一步的证实。微生物商是土壤微生物生物量碳与土壤有机碳的比值,可作为土壤碳动态和土壤质量的有效指标,该值越大,反映有机底物的生物有效性越高^[31]。所选亚热带5种不同类型的稻田土壤剖面微生物商介于 $0.04\% \sim 8.24\%$ 之间,随着土层的加深而降低,不同类型稻田土壤耕作层的微生物商以红黄泥的最低(1.37%)。也就是说,红黄泥耕作层土壤的底物有效性最低,其有机碳最不容易被微生物分解利用,从而有利于有机碳的积累和稳定。而黄泥田虽然有机碳含量较低,但其微生物商相对较高,底物有效性也高,可供微生物生长利用的碳源较为丰富,微生物生物量碳含量自然也最高。已有许多研究报道我国亚热带稻田表层土壤的微生物商差异较大,分别为 $1.69\% \sim 4.44\%$ ($0 \sim 20 \text{ cm}$)^[18]、 $0.45\% \sim 6.0\%$ ($0 \sim 20 \text{ cm}$)^[19]、 4.82% ($0 \sim 10 \text{ cm}$)^[25]、 $2.8\% \sim 8.4\%$ ($0 \sim 17 \text{ cm}$)^[28]、 $3.36\% \sim 4.92\%$ ($0 \sim 15 \text{ cm}$)^[32] 和 $1.3\% \sim 2.9\%$ ($0 \sim 20 \text{ cm}$)^[33],这可能也是与土壤母质不同而造成的土壤微生物的可利用碳源的差异有关。

虽然有关土壤养分对土壤微生物生物量影响的研究较多,但到目前为止尚未有一致的结论^[10,34]。本研究中,土壤微生物生物量碳含量与全氮、碱解氮和有效磷具有显著的正相关关系,表明氮、磷的亏缺可能直接或间接限制着稻田土壤微生物种群的生长。但据 Zhong 等^[10]的研究报道,有机碳含量比氮、磷对稻田土壤微生物生物量的限制作用更强。

4 结论

亚热带稻田土壤有机碳与微生物生物量碳含量

均随土层的加深而急剧降低, 主要分布在土壤表层(耕作层和犁底层, 0~20 cm)。不同类型稻田土壤有机碳和微生物生物量碳的差异也主要集中在表层, 其中有机碳含量红黄泥最高, 其次为河沙泥, 但是微生物生物量碳含量却以黄泥田最高, 红黄泥最低。这可能与不同类型稻田表层土壤新鲜底物的有效性有关。稻田土壤微生物生物量碳含量依然受到土壤有机碳的限制, 除此以外, 还受到氮、磷养分的限制作用, 但与钾素的关系并不明显。

参考文献:

- [1] Paul E A. Soil microbiology, ecology and biochemistry [M]. (3rd ed). New York: Academic Press, 2007.
- [2] Jenkinson D S, Brooks P C, Powlson D S. Measuring soil microbial biomass [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36** (1): 5-7.
- [3] Bucher A E, Lanyon L E. Evaluating soil management with microbial community-level physiological profiles [J]. Applied Soil Ecology, 2005, **29**(1): 59-71.
- [4] Steenwerth K L, Jackson L E, Calderón F J, *et al.* Soil microbial community composition and land use history in cultivated and grassland ecosystems of coastal California [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(11): 1599-1611.
- [5] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价 [J]. 生态学报, 2006, **26**(3): 901-913.
- [6] 吴金水. 土壤有机质及其周转动力学 [A]. 见: 何电源. 中国南方土壤肥力与栽培作物施肥 [M]. 北京: 科学出版社, 1994. 37-46.
- [7] Wagai R, Kitayama K, Satomura T, *et al.* Interactive influences of climate and parent material on soil microbial community structure in Bornean tropical forest ecosystems [J]. Ecological Research, 2011, **26**(3): 627-636.
- [8] Dooley S R, Treseder K K. The effect of fire on microbial biomass: a meta-analysis of field studies [J]. Biogeochemistry, 2012, **109**(1-3): 49-61.
- [9] Marumoto T. Mineralization of C and N from microbial biomass in paddy soil [J]. Plant and Soil, 1984, **76**(1-3): 165-173.
- [10] Zhong W H, Cai Z C. Long-term effects of inorganic fertilizers on microbial biomass and community functional diversity in a paddy soil derived from quaternary red clay [J]. Applied Soil Ecology, 2007, **36**(2-3): 84-91.
- [11] 周卫军, 曾希柏, 张杨珠, 等. 施肥措施对不同母质发育的稻田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响 [J]. 应用生态学报, 2007, **18**(5): 1043-1048.
- [12] 陈建国, 张杨珠, 曾希柏, 等. 不同配方施肥对长期缺施钾肥的红壤性水稻土微生物特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, **14**(6): 1200-1205.
- [13] Nakhro N, Dkhar M S. Impact of organic and inorganic fertilizers on microbial populations and biomass carbon in paddy field soil [J]. Journal of Agronomy, 2010, **9**(3): 102-110.
- [14] 张帆, 黄凤球, 肖小平, 等. 冬季作物对稻田土壤微生物量碳、氮和微生物熵的短期影响 [J]. 生态学报, 2009, **29**(2): 734-739.
- [15] 朱波, 胡跃高, 肖小平, 等. 冬种黑麦草对六种稻田土壤微生物量碳、氮的影响 [J]. 中国农学通报, 2009, **25**(3): 225-229.
- [16] 高明, 周保同, 魏朝富, 等. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究 [J]. 应用生态学报, 2004, **15**(7): 1177-1181.
- [17] 李辉, 张军科, 江长胜, 等. 耕作方式对紫色水稻土有机碳和微生物生物量碳的影响 [J]. 生态学报, 2012, **32**(1): 247-255.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Yao H Y, Xu J M, Huang C Y. Substrate utilization pattern, biomass and activity of microbial communities in a sequence of heavy metal-polluted paddy soils [J]. Geoderma, 2003, **115**(1-2): 139-148.
- [21] 吴建军, 蒋艳梅, 吴愉萍, 等. 重金属复合污染对水稻土微生物生物量和群落结构的影响 [J]. 土壤学报, 2008, **45**(6): 1102-1109.
- [22] Wu J, 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.
- [23] 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]. 北京: 气象出版社, 2006. 57-60.
- [24] 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, 1999.
- [25] 彭佩钦, 张文菊, 童成立, 等. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系 [J]. 应用生态学报, 2005, **16**(10): 1872-1878.
- [26] Sotomayor-Ramírez D, Espinoza Y, Acosta-Martínez V. Land use effects on microbial biomass C, β -glucosidase and β -glucosaminidase activities, and availability, storage, and age of organic C in soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, **45**(5): 487-497.
- [27] Parham J A, Deng S P, Raun W R, *et al.* Long-term cattle manure application in soil: I. Effect on soil phosphorus levels, microbial biomass C, and dehydrogenase and phosphatase activities [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **35**(5): 328-337.
- [28] Liu M Q, Hu F, Chen X Y, *et al.* Organic amendments with reduced chemical fertilizer promote soil microbial development and nutrient availability in a subtropical paddy field: The influence of quantity, type and application time of organic amendments [J]. Applied Soil Ecology, 2009, **42**(2): 166-175.
- [29] 吴晓晨, 李忠佩, 张桃林, 等. 长期施肥对红壤性水稻土微生物生物量与活性的影响 [J]. 土壤, 2009, **41**(4): 594-

- 599.
- [30] Kaye J P, Hart S C. Competition for nitrogen between plants and soil microorganisms[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1997, **12**(4): 139-142.
- [31] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1989, **21**(4): 471-479.
- [32] 沈宏, 曹志洪. 长期施肥对不同农田生态系统土壤有效碳库及碳素有效率的影响[J]. *热带亚热带土壤科学*, 1998, **7**(1): 1-5.
- [33] Hao X H, Liu S L, Wu J S, *et al.* Effect of long-term application of inorganic fertilizer and organic amendments on soil organic matter and microbial biomass in three subtropical paddy soils [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, **81**(1): 17-24.
- [34] Yang C M, Yang L Z, Ouyang Z. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes[J]. *Geoderma*, 2005, **124**(1-2): 133-142.
-

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjkx.ac.cn>)。该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用。目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行。作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可。如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系。

邮政地址:北京市海淀区双清路18号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:hjkx@rcees.ac.cn

网 址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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