

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_{2.5} 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_{2.5} 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 叶华香,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(*Crassostrea* 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)

咪唑氯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,杜兴庄,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,张洪勋(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,袁伊,王志伟,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 *Alcaligenes* 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 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO₄³⁻ 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)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响

刘翠英¹, 蒋新²

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 采用水稻盆栽实验, 供试土壤为红壤性水稻土和乌栅土, 分别设定对照及添加 1% 和 2% 堆腐有机肥的处理, 研究施用该有机肥对六氯苯(HCB)在种水稻土壤中还原脱氯降解的影响, 并分析甲烷生成与 HCB 脱氯降解的关系. 结果表明, 18 周之后, 红壤性水稻土中 HCB 可提取态残留减少了 28.6% ~ 30.1%, 乌栅土中 HCB 可提取态残留减少了 47.3% ~ 61.0%; 水稻植株吸收的 HCB 及其降解产物量仅为土壤中 HCB 初始量的千分之几; HCB 发生脱氯降解主要生成五氯苯(PeCB); 由于乌栅土的 pH 和可溶性有机碳含量均高于红壤性水稻土, HCB 在乌栅土中的脱氯降解效率较高; 在红壤性水稻土中和乌栅土中, 施用 1% 和 2% 堆腐有机肥分别在第 6 和第 10 周后显著抑制 PeCB 生成, 且 PeCB 生成速率在有机肥的 2 个添加水平之间均无显著差异; 产甲烷菌在脱氯降解中的作用因环境条件而异.

关键词: 六氯苯; 还原脱氯; 五氯苯; 有机质; 甲烷; 土壤

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1583-07

Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils

LIU Cui-ying¹, JIANG Xin²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: A rice pot experiment was conducted in two soils, Hydragric Acrisols (Ac) and Gleyi-Stagnic Anthrosols (An). Three treatments including control and additions of 1% or 2% composting organic fertilizer were designed for each soil. The objective of this research was to evaluate the reductive dechlorination of hexachlorobenzene (HCB) as affected by organic fertilizer supplies in planted paddy soils, and to analyze the relationship between methane production and HCB dechlorination. The results showed that the HCB residues were decreased by 28.6% -30.1% of the initial amounts in Ac, and 47.3% -61.0% in An after 18 weeks of experiment. The amount of HCB and its metabolite uptake by rice plants was only a few thousandths of the initial HCB amount in soils. The main product of HCB dechlorination was pentachlorobenzene (PeCB). The rates of HCB dechlorination in An were higher than those in Ac, which was mainly attributed to the higher pH and dissolved organic carbon (DOC) content of An. The applications of both 1% and 2% composting organic fertilizer showed significant inhibition on PeCB production after the 6th and 10th week in Ac and An, respectively. In both tested soils, no significant difference of PeCB production rates was observed between the applications of 1% and 2% composting organic fertilizer. The role of methanogenic bacteria in HCB dechlorination was condition-dependent.

Key words: hexachlorobenzene; reductive dechlorination; pentachlorobenzene; organic matter; methane; soil

六氯苯(hexachlorobenzene, HCB)是环境中典型的多氯代有机化合物(polychlorinated organic compounds, PCOCs),其具有高毒性和潜在的致癌性,且被美国国家环保署列为内分泌干扰物^[1]. 土壤是 HCB 的汇,污染土壤中 HCB 浓度可高达 340 ~ 3 300 ng·g⁻¹^[1,2]. 污染农田中的 HCB 能够通过食物链进入人体,对人类健康造成潜在的危害.

多个氯取代基使 HCB 很难进行好氧降解,而在厌氧条件下,如淹水土壤、沉积物和污泥中, HCB 能够进行厌氧脱氯降解,其脱氯产物低氯苯较易进行好氧降解直至完全矿化^[3~5]. 因此,厌氧脱氯是实现 HCB 降解的关键. 还原脱氯是在有电子供体存在的条件下,厌氧微生物(如产甲烷菌、硫酸盐还原

菌等)参与的生物化学过程^[6]. 研究证明,有机物能够影响土壤微生物的活性,改变土壤对有机污染物的吸持作用,并且其转化过程能够改变土壤的氧化还原条件^[7~9],进而影响 PCOCs 的脱氯降解. 关于有机物与 PCOCs 脱氯降解的关系,前人研究结果不尽一致. 一部分人认为有机物的分解过程能够释放电子,并且作为微生物生长的碳源促进 PCOCs(如 HCB、三氯乙烯、五氯酚等)脱氯降解^[9~11]; 而另

收稿日期: 2012-07-18; 修订日期: 2012-09-25

基金项目: 南京信息工程大学科研基金项目(S8110108001); 国家自然科学基金项目(41201314); 江苏高校优势学科建设工程(PAPD)项目

作者简介: 刘翠英(1982~),女,博士,讲师,主要研究方向为土壤环境化学与污染控制, E-mail: 002263@nuist.edu.cn

一部分人则认为,有机物在分解过程中作为电子受体,进而抑制 PCOCs(如 HCB、五氯苯等)脱氯降解^[7,12].

厌氧条件下,有机物分解的主要产物之一为甲烷^[13].而且产甲烷菌作为土壤中重要的厌氧微生物对 PCOCs 的脱氯降解具有重要影响,但许多研究者的结果不尽一致.其中一些人认为产甲烷菌能够参与 PCOCs 的脱氯降解^[14-16];然而另一些研究者则认为产甲烷菌并不能有效参与 PCOCs 脱氯过程^[7,17,18].因此,关于产甲烷菌与 PCOCs 脱氯降解的关系有必要进一步的深入研究.

有机物对土壤中 PCOCs 厌氧脱氯降解的影响机制众说纷纭,且很少研究水稻生长条件下土壤中 HCB 的脱氯降解规律.本研究采用温室盆栽实验,

于红壤性水稻土和乌栅土中添加堆腐有机肥,分析有机物转化生成 CH₄ 的过程与 HCB 脱氯降解的关系,揭示有机肥对种水稻土壤中 HCB 脱氯降解的影响规律.

1 材料与方 法

1.1 供试土壤和水稻

供试土样分别为江西鹰潭红壤性水稻土(28°12'N,116°55'E)和江苏常熟乌栅土(31°42'N,120°44'E),取 0~20 cm 表层土,风干后,过 2 mm 筛,其基本性质见表 1,具体分析参照文献[19].红壤性水稻土和乌栅土中 HCB 的背景值分别为 4.1 ng·g⁻¹和 2.2 ng·g⁻¹.供试水稻为武运梗 7 号,购于南京农业大学.

表 1 红壤性水稻土和乌栅土的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of hydragric acrisol and gleyi-stagnic anthrosol

土壤类型	pH	有机质 /%	可溶性有机碳 /mg·kg ⁻¹	总氮 /%	黏粒 /%	粉粒 /%	砂粒 /%
红壤性水稻土	5.4	4.4	48.2	0.2	24.7	45.1	30.2
乌栅土	6.8	5.0	76.3	0.2	30.3	58.0	11.7

1.2 污染土的制备

称取 67 mg HCB 完全溶解于 500 mL 丙酮,然后将 HCB 的丙酮溶液加入 400 g 细石英砂(100 目)中,充分搅拌至丙酮全部挥发,即得到 HCB 均匀污染的石英砂.称取 15 g 污染石英砂和 2500 g 土壤拌匀,即得到 HCB 浓度为 1 000 ng·g⁻¹的污染土壤,室温放置 1 周后备用.由于土壤对 HCB 的吸持作用以及分析过程中 HCB 的损失,气相色谱检测到土壤中 HCB 的初始浓度为 875.3 ng·g⁻¹.

1.3 实验仪器与化学试剂

安捷伦(Agilent,6890)气相色谱仪-ECD 检测器⁶³Ni;安捷伦 7683 自动进样器(Agilent,USA);加速溶剂萃取仪(ASE-2000,Dionex,USA);岛津(Shimadzu,GC-12A)气相色谱仪-FID 检测器;旋转蒸发仪(RE-3000,上海亚荣).

各种氯代苯标样(纯度 ≥ 99.5%,德国 Ehrenstorfer 博士提供);正己烷(分析纯);丙酮(分析纯);二氯甲烷(分析纯);硅藻土(化学纯);无水硫酸钠(400℃下干燥 4 h);硅胶(130℃下保持 18 h 后,加入 3% 去离子水混匀,用之前平衡 6 h);磺化硅胶(将硅胶在 225℃烘干 12 h,冷却后加入 3% 去离子水混匀,平衡 6 h 后,加入质量比为 2/3 的浓硫酸,混匀即可);有机肥购于江苏田娘农业科技有限公司,是采用堆肥的方式,将动植物残体高温

腐熟后,干燥粉碎而制成,其中,含有机碳 225.0 g·kg⁻¹,可溶性有机碳 452.4 mg·kg⁻¹,总氮 55.0 g·kg⁻¹,铵态氮 33.9 g·kg⁻¹,硝态氮 0.9 mg·kg⁻¹.

1.4 实验设计

本实验采用红壤性水稻土和乌栅土作为供试土壤,每种土壤分别设定添加 1% 和 2% 有机肥的处理和不加有机肥的对照处理.每个处理设 4 个重复.先在未污染土壤中将水稻育苗 40 d.将 2500 g 污染土壤按照不同处理分别加入有机肥,混合均匀后转入陶瓷盆,再加入 0.3 g·kg⁻¹氮肥(尿素)和 0.44 g·kg⁻¹钾肥(磷酸二氢钾)的水溶液,使土壤保持淹水状态.然后移栽水稻秧苗,每盆 2 穴,每穴 3 株,每盆共 6 株.水稻的整个生育期内土壤保持淹水,不追肥.

1.5 采样和收获水稻

分别于水稻移栽之后的第 2、4、6、10、14、18 周采集土样和气体,用于测定土壤中污染物浓度和生成 CH₄ 量.每次采样时用不锈钢土钻钻取土壤样品约 20 g,保存于 4℃ 冰箱中待分析.CH₄ 采用静态箱法收集^[20],分别于 0 和 30 min 采集箱内的气体,用于测定 CH₄ 浓度并计算其生成速率.

水稻收获时,小心地将水稻根从盆钵内的土壤中取出,将水稻植株分为稻谷、茎叶、根三部分,然后将各部分植物样用自来水冲洗干净,室温风干后

粉碎,测定其中的污染物浓度。

1.6 土壤及植物样中六氯苯及其脱氯产物的测定

称取 2 g 植物样或 5 g 土壤样品与 2 g 左右的硅藻土拌匀后装入加速溶剂萃取仪的萃取池中,同时测土壤含水量以计算土壤干重。采用加速溶剂萃取仪提取,提取条件:温度为 90℃,气压为 10 MPa。提取溶剂为体积比 3/1 的正己烷/丙酮。将提取液用旋转蒸发器在 45℃ 条件下旋转蒸发至大约 2 mL,经过填有 2 g Na₂SO₄ 和 1 g 磺化硅胶的 SPE 柱净化,净化时用 15 mL 体积比 9/1 的石油醚/二氯甲烷淋洗。然后用气相色谱测定 HCB 及其脱氯产物的浓度。气相色谱测定条件为:DB-5 柱(30.0 m × 0.32 mm × 0.25 μm),载气为 N₂,流速为 1.5 mL·min⁻¹。升温程序:柱初温为 60℃,保持 2 min,以 5℃·min⁻¹ 的速度升温至 190℃,保持 0 min,然后以 20℃·min⁻¹ 的速度升温至 280℃,保持 7 min,进样口的温度为 240℃,电子捕获检测器(ECD)的温度为 290℃。采用不分流进样,进样量为 1 μL,外标法定量。

1.7 甲烷的测定方法

分别于 0 和 30 min 用针筒抽取 20 mL 密封箱中的气体于已抽真空的 18 mL 储气瓶中,然后分别用进样针筒抽取 1.1 mL 储气瓶中的气体,锁定后压缩至 1 mL,于岛津气相色谱仪(Shimadzu, GC-12A)-氢火焰离子化检测器(FID)测定 CH₄ 浓度,分离柱填料为 Poropak Q (80/100mesh),柱长为 2 m。柱温、进样器和检测器温度分别为 80、200 和 200℃,

载气(N₂)流速为 30 mL·min⁻¹, H₂ 和空气流速分别为 20 和 50 mL·min⁻¹。

1.8 质量控制和数据分析

土壤中氯苯化合物的浓度均采用外标法测定($r^2 > 0.999$)。所有数据均为 4 个重复样品数据的算术平均值。显著性差异分析由 SPSS 13.0 完成,显著性水平为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 水稻生物量和水稻吸收六氯苯及其降解产物总量

水稻收获后的各部分干重如表 2 所示。红壤性水稻土中,添加 1% 和 2% 有机肥均显著降低稻谷和水稻根的干重,而增加水稻茎叶干重($P < 0.05$),水稻地上部分生物量在有机肥的 2 个添加水平之间无显著差异($P > 0.05$),而添加 2% 有机肥对于减少水稻根生物量的作用比 1% 有机肥处理更加显著($P < 0.05$)。乌栅土中,添加 1% 和 2% 有机肥增加稻谷和茎叶干重,而降低水稻根的干重($P < 0.05$),水稻地上部分生物量在有机肥的 2 个添加水平之间亦无显著差异($P > 0.05$),添加 2% 有机肥对于减少水稻根生物量的作用比 1% 有机肥处理也更加显著($P < 0.05$)。除添加 2% 有机肥处理的茎叶外,乌栅土中生长的水稻地上部分干重均显著大于对应处理的红壤性水稻土($P < 0.05$),而各处理水稻根的生物量在 2 种土壤之间无显著差异($P > 0.05$)。

表 2 不同处理中水稻各部分干重¹⁾/g·pot⁻¹

Table 2 Dry weight of rice plants in different treatments /g·pot⁻¹

处理	红壤性水稻土			乌栅土		
	稻谷	茎叶	根	稻谷	茎叶	根
对照	11.6 ± 1.6A	20.6 ± 3.5B	11.2 ± 0.9A	17.4 ± 0.5B	29.7 ± 3.3b	10.4 ± 0.9a
1% 有机肥	8.1 ± 1.0B	29.0 ± 3.9A	6.2 ± 0.5B	30.0 ± 5.8A	42.3 ± 5.9a	7.5 ± 0.2b
2% 有机肥	8.6 ± 0.7B	34.1 ± 7.5A	4.1 ± 1.0C	24.3 ± 5.2A	39.3 ± 2.6a	5.2 ± 1.3c

1) 同一列数据后不同字母表示在 0.05 水平有显著差异,大写字母表示红壤性水稻土,小写字母表示乌栅土

为探明 HCB 及其脱氯产物的归趋,本研究将每盆水稻植株吸收的 HCB 及其降解产物的总量进行计算,结果如表 3 所示。在稻谷、茎叶和根中均能检测到 HCB,而仅在水稻根中检出 HCB 的主要脱氯降解产物 PeCB,水稻植株中未检测到 HCB 的其它脱氯产物。水稻植株中 HCB 含量的分布规律为:根 >> 茎叶 > 稻谷。红壤性水稻土中,施用 1% 和 2% 有机肥均对茎叶中 HCB 总量无显著影响($P > 0.05$),却显著减少稻谷和根中 HCB 总量,并显著减少根中 PeCB 含量,且施用 2% 有机肥对减少水稻根中 HCB 和 PeCB 含量的作用更加显著($P < 0.05$)。乌栅土

中,施用 1% 和 2% 有机肥对稻谷中 HCB 含量无显著影响($P > 0.05$),茎叶中 HCB 含量的规律为:对照 > 1% 有机肥 > 2% 有机肥,施用 2 个水平的有机肥对水稻根中 HCB 和 PeCB 含量的作用与红壤性水稻土的结果一致。该结果表明,由于淹水条件下土壤中挥发出来的 HCB 量很小^[7],所以水稻地上部分吸收 HCB 的主要方式为通过蒸腾作用从根部向上运输,从大气中吸收的很少。而由于 HCB 的脂溶性高而水溶性低,大部分 HCB 吸附在水稻根部,很少一部分由蒸腾作用被运输到地上部分,所以 HCB 及其脱氯产物主要富集在水稻根中。因为水稻茎叶的

生物量较高,茎叶中富集的 HCB 总量大于稻谷. 另外,由于有机肥中的有机物质能够增加土壤对有机污染物的吸持作用,进而减少 HCB 及其降解产物的生物有效性,所以施用 2% 有机肥比 1% 有机肥对于减少水稻根中 HCB 及其降解产物含量的作用更加明显.

另外,每盆水稻植株富集的 HCB 及其降解产物总量与土壤中 HCB 初始总量的比值 ($R_{\sum CBs}$) 也列于表 3,可以看出,红壤性水稻土中各处理的

$R_{\sum CBs}$ 略大于乌栅土的对应处理. 2 种土壤中施用 1% 和 2% 有机肥均显著减少 $R_{\sum CBs}$,且施用 2% 有机肥的效果更加显著 ($P < 0.05$),这主要由水稻根中 HCB 及其降解产物总量差异所决定. 与土壤中 HCB 初始量相比,水稻植株富集的 HCB 及其降解产物量很小,仅为土壤中污染物初始总量的千分之几. 因此,本研究结果表明,水稻植株的吸收不是水稻土中 HCB 及其降解产物的主要消除方式.

表 3 不同处理中水稻吸收富集六氯苯及其主要降解产物的量¹⁾/ng·pot⁻¹

Table 3 Uptake of HCB and its metabolite by rice plants in different treatments/ng·pot⁻¹

处理	六氯苯			五氯苯	$R_{\sum CBs}^{2)}/\%$
	稻谷	茎叶	根	根	
红壤性水稻土					
对照	94.0 ± 8.2A	757.4 ± 126.9A	4 544.9 ± 412.9A	249.7 ± 14.1A	2.4 ± 0.3A
1% 有机肥	55.8 ± 10.0B	702.1 ± 94.6A	2 877.0 ± 460.6B	124.1 ± 33.1B	1.7 ± 0.3B
2% 有机肥	63.3 ± 6.8B	845.2 ± 124.0A	1 592.1 ± 151.7C	65.3 ± 18.6C	1.2 ± 0.2C
乌栅土					
对照	142.3 ± 12.1a	729.2 ± 125.1a	3 027.0 ± 207.5a	329.3 ± 7.6a	1.9 ± 0.2a
1% 有机肥	135.0 ± 37.2a	756.9 ± 80.1a	1 893.3 ± 180.0b	242.9 ± 12.5b	1.4 ± 0.1b
2% 有机肥	130.4 ± 30.7a	661.7 ± 102.1b	1 088.8 ± 228.4c	156.0 ± 22.9c	0.9 ± 0.2c

1) 同一列数据后不同字母表示在 0.05 水平有显著差异,大写字母表示红壤性水稻土,小写字母表示乌栅土; 2) $R_{\sum CBs}$: 每盆水稻植株富集的六氯苯及其降解产物总量与土壤中六氯苯初始总量的比值

2.2 不同处理土壤中六氯苯残留动态

各处理土壤中 HCB 可提取态残留的变化动态见图 1. 红壤性水稻土中,各处理的 HCB 残留量均在前 2 周显著下降,随后下降速率减慢,18 周之后, HCB 可提取态残留量减少了 28.6% ~ 30.1%,添加 1% 和 2% 有机肥对 HCB 残留动态无显著影响 ($P > 0.05$). 乌栅土中,各处理的 HCB 残留量在前 2 周均显著下降,而在第 2 ~ 4 周呈现上升的趋势,主要原因可能是前 2 周内, HCB 迅速在土壤中形成结合态残留,而后又在水稻根系分泌物的活化作用下,从土壤中解吸出来,从第 4 周至实验周期结束,乌栅土的各处理 HCB 残留量逐渐减少,且在第 10 周之后,

HCB 残留量在添加 1% 和 2% 有机肥处理中显著高于对照 ($P < 0.05$),而 HCB 残留量在有机肥的 2 个添加水平之间无显著差异 ($P > 0.05$),表明施用该有机肥可能抑制 HCB 脱氯降解. 18 周后,乌栅土中 HCB 可提取态残留量减少了 47.3% ~ 61.0%.

前人研究表明,淹水土壤中挥发出来的 HCB 及其降解产物量很少,可以忽略不计^[7,21]; 本研究结果表明,水稻植株吸收的 HCB 及其降解产物量仅为土壤中污染物总量的千分之几(表 3),水稻植株吸收也不是水稻土中 HCB 的主要消解方式. 因此,水稻土中 HCB 的主要消解方式为还原脱氯降解和结合态残留.

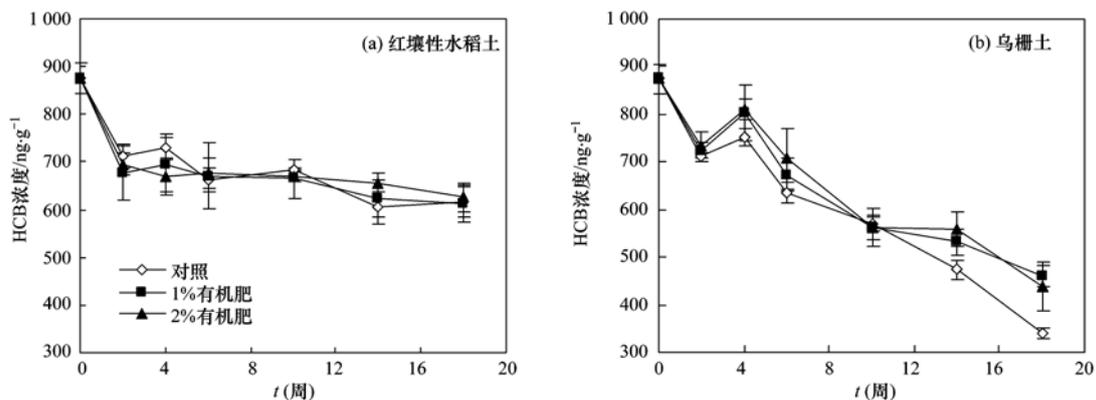


图 1 红壤性水稻土和乌栅土中不同处理六氯苯的可提取态残留动态

Fig. 1 Dynamics of extractable HCB residues in hydric acrisol and gley-stagnic anthrosol with different treatments

总体而言,红壤性水稻土中 HCB 可提取态残留量高于对应处理的乌栅土,主要原因是 2 种土壤的理化性质不同(表 1)。首先,红壤性水稻土的有机质含量低于乌栅土,而有机质能够吸附固定土壤中的 HCB,所以红壤性水稻土中 HCB 的可提取态残留量高于乌栅土^[22,23];第二,红壤性水稻土中含有较多的砂粒,而乌栅土中含有更多的黏粒和粉粒,前人研究表明,有机污染物主要吸附在土壤的细颗粒中^[23,24],所以红壤性水稻土中 HCB 的可提取态残留量高于乌栅土;第三,研究表明,还原脱氯主要发生在弱碱性条件^[14],由于乌栅土的 pH (6.8) 高于红壤性水稻土(5.4),因此 HCB 在乌栅土中的脱氯降解效率较高;第四,乌栅土中可溶性有机碳含量高于红壤性水稻土,研究表明,可溶性有机碳能够增加 HCB 的水溶性^[25,26],而微生物较易降解水溶态的 HCB^[27],所以乌栅土中 HCB 的生物降解效率较高。

2.3 六氯苯脱氯产物的生成动态

HCB 的可能脱氯降解产物为各种低氯代苯^[7]。本实验中 HCB 的脱氯降解产物主要为五氯苯 (PeCB), 仅在第 10 周后检测出微量 1,2,3,4-四氯

苯、1,2,3,5-四氯苯、1,2,4,5-四氯苯、1,2,3-三氯苯、1,2,4-三氯苯和 1,3,5-三氯苯,未检测到二氯苯和一氯苯。各处理土壤中 PeCB 生成动态见图 2。在红壤性水稻土的所有处理中,PeCB 生成速率均在前 6 周较慢,在第 6~10 周显著加快,在第 10 周之后,对照和添加 1% 有机肥处理的 PeCB 浓度继续缓慢增加,而添加 2% 有机肥处理的 PeCB 浓度在第 14~18 周逐渐减少。结果表明,红壤性水稻土中,添加 1% 和 2% 有机肥均在第 6 周之后显著抑制 PeCB 的生成 ($P < 0.05$),而在有机肥的 2 个添加水平之间 PeCB 的生成速率无显著差异 ($P > 0.05$)。在乌栅土中,对照处理的 PeCB 生成量在前 4 周内缓慢增加,而后在第 4~10 周,PeCB 的生成量大幅增加,第 10 周之后其增加速率又趋于平缓,而在添加 1% 和 2% 有机肥的处理中,前 6 周内 PeCB 的生成量呈较缓慢均匀增加的趋势,第 6~10 周,PeCB 的生成量则大幅度增加,其后增加趋势明显变缓。结果表明,乌栅土中添加 1% 和 2% 有机肥在第 10 周后显著抑制 PeCB 的生成 ($P < 0.05$),且在有机肥的 2 个添加水平之间 PeCB 的生成速率无显著差异 ($P > 0.05$)。

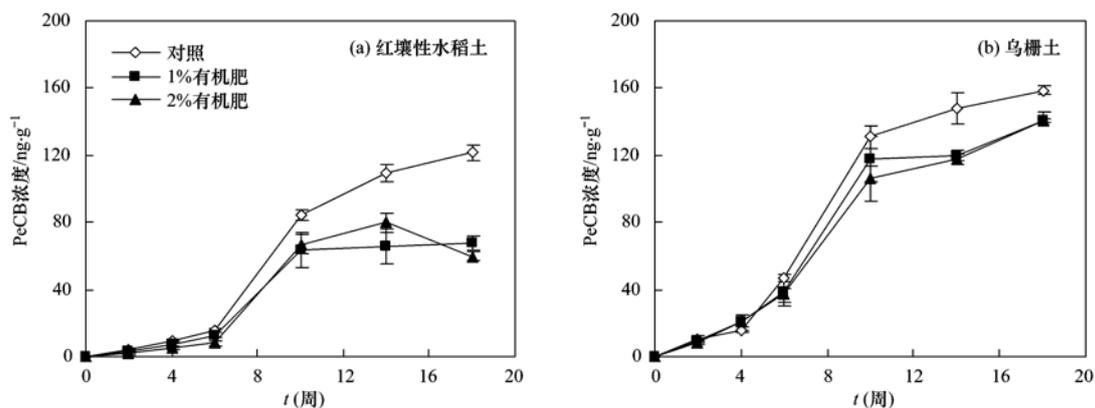


图 2 红壤性水稻土和乌栅土中不同处理五氯苯的生成动态

Fig. 2 Dynamics of PeCB productions in hydric acrisol and gleyi-stagnic anthrosol with different treatments

结果表明,2 种土壤中添加 1% 和 2% 堆腐有机肥均抑制 HCB 脱氯降解,主要原因有以下 3 点:第一,添加有机肥不利于厌氧微生物生长,如抑制产甲烷菌活性(图 3),进而抑制 HCB 厌氧脱氯降解,可能由于有机肥中大量的氮素改变了土壤酶系统和微生物的生存环境^[13,28];第二,施用该有机肥使水稻根的生物量减少(表 2),而水稻根能够分泌小分子有机酸刺激微生物生长^[29],所以有机肥施用降低了 HCB 的微生物降解效率;第三,有机肥中的有机物在分解过程中可能作为电子受体^[7],与 HCB 还原脱

氯竞争电子。

另外,比较 2 种土壤中 PeCB 生成动态可以发现,红壤性水稻土中 PeCB 的生成速率均低于对应处理的乌栅土,说明乌栅土中 HCB 脱氯降解效率高,与 2.2 节中 HCB 残留动态的结果一致。

2.4 甲烷生成与六氯苯脱氯降解的关系

各处理 CH_4 生成速率整体上均是先增大后减小的趋势(图 3)。在红壤性水稻土和乌栅土中,对照处理的 CH_4 生成速率均在第 10 周达到峰值,分别为 $555.3 \text{ ng} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $533.6 \text{ ng} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; 在

添加 2% 有机肥处理中, CH_4 生成速率均在第 6 周最高, 分别为 $140.5 \text{ ng} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $141.7 \text{ ng} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 而在添加 1% 有机肥处理中, 红壤性水稻土和乌栅土的 CH_4 生成速率分别在第 14 和

第 4 周最高分别为 $300.4 \text{ ng} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $308.9 \text{ ng} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 2 种土壤中, 添加 1% 和 2% 有机肥整体上均显著抑制 CH_4 生成 ($P < 0.05$), 且添加 2% 有机肥的效果更明显.

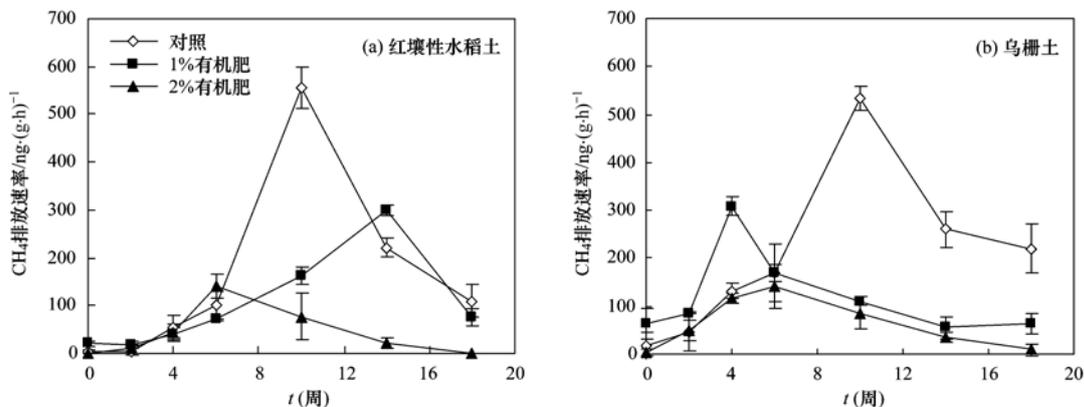


图 3 红壤性水稻土和乌栅土中不同处理甲烷的生成动态

Fig. 3 Dynamics of CH_4 productions in hydricric acrisol and gleyi-stagnic anthrosol with different treatments

综合 HCB 脱氯降解和甲烷生成动态可以看出, 添加有机肥同时抑制 HCB 脱氯和产 CH_4 速率, 且对照处理的 HCB 脱氯速率与 CH_4 生成速率的变化规律一致, 均是在第 6 ~ 10 周显著增加, 表明产 CH_4 菌能够有效参与 HCB 的脱氯降解. 但是, 添加有机肥处理的 HCB 脱氯速率在第 6 ~ 10 周显著增加, 而此时 CH_4 生成速率并不高, 即添加有机肥处理的 HCB 脱氯速率与 CH_4 生成速率的变化趋势并不一致, 表明除产甲烷菌外, 其它厌氧微生物, 如硫酸盐还原菌等也参与了 HCB 脱氯降解^[7,18]. 大量研究表明, 产甲烷菌能够参与有机氯化物脱氯降解^[15,16], 本研究也得出一致的结果. 另外, 由于 CH_4 是有机碳的厌氧分解产物, 其生成过程需要消耗电子, 而 HCB 脱氯降解也需要还原剂提供电子, 产 CH_4 与 HCB 脱氯又是竞争的关系. 所以, CH_4 生成对 HCB 脱氯降解具有双重作用, 产 CH_4 菌可能在足够电子存在的条件下才能促进 HCB 还原脱氯降解, 即产 CH_4 菌在脱氯降解中的作用因环境条件而异.

2.5 六氯苯在种水稻土壤中的脱氯降解效率

前人研究表明, 在不种水稻的淹水土壤中培养 16 周后, 对照土壤中 HCB 残留量仅为初始含量的 5%, 而且 HCB 的主要脱氯降解产物为 1,3,5-三氯苯^[7]. 然而本研究结果表明, 18 周后, 在种水稻的红壤性水稻土和乌栅土的对照处理中 HCB 可提取态残留量仍为初始量的 70% 和 39%, 而且 HCB 的主要脱氯产物为 PeCB, 生成低氯代苯的量很少, 表明 HCB 在种水稻土壤中的脱氯降解效率较低. 主

要原因之一是水稻根系具有泌氧能力^[30], 促使根际土壤的氧化还原电位升高, 进而使土壤中的还原性物质 (如 NH_4^+ 和 Fe^{2+}) 发生氧化, 氧化产物 (如 NO_3^- 和 Fe^{3+}) 作为电子受体扩散到土壤的厌氧区域, 从而抑制 HCB 还原脱氯降解. 尽管水稻根能够分泌小分子有机酸刺激根系微生物生长, 但严格的厌氧条件似乎才是还原脱氯的关键. 另外, 可能由于土壤中的一部分营养物质被水稻吸收, 在一定程度上减少了土壤中微生物的营养源, 从而降低了 HCB 的生物降解效率. 本研究结果表明, 施用堆腐的有机肥对种水稻土壤中 HCB 脱氯降解具有重要影响, 下一步工作应针对不同类型有机肥对 PCOCs 脱氯降解的影响机制进行深入研究.

3 结论

(1) 水稻植株中吸收的 HCB 及其降解产物量仅为土壤中 HCB 初始量的千分之几, 表明水稻植株吸收不是土壤中 HCB 消解的主要途径.

(2) 乌栅土中 HCB 的脱氯降解速率高于红壤性水稻土, 且乌栅土中较多有机质有利于 HCB 形成结合态残留, 因而 HCB 在乌栅土中的可提取态残留量低于红壤性水稻土.

(3) 2 种土壤中, 施用堆腐有机肥均显著抑制水稻根系和产甲烷菌的生长, 进而抑制 HCB 的微生物脱氯降解.

(4) 产 CH_4 菌能够参与 HCB 脱氯降解, 但 CH_4 的生成过程需要消耗电子进而不利于还原脱氯, 即

产 CH_4 菌在脱氯降解中的作用因环境条件而异。

(5) 由于水稻根具有泌氧能力使土壤的氧化还原电位增加, 水稻种植条件下 HCB 的还原脱氯降解效率较低。

参考文献:

- [1] Bailey R E. Global hexachlorobenzene emissions [J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(2): 167-182.
- [2] Barber J L, Sweetman A J, Van Wijk D, *et al.* Hexachlorobenzene in the global environment: emissions, levels, distribution, trends and processes [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **349**(1-3): 1-44.
- [3] Masunaga S, Susarla S, Yonezawa Y. Dechlorination of chlorobenzenes in anaerobic estuarine sediment [J]. *Water Science and Technology*, 1996, **33**(6): 173-180.
- [4] Susarla S, Masunaga S, Yonezawa Y. Reductive dechlorination pathways of chloro organics under anaerobic conditions [J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(5-6): 489-494.
- [5] Hirano T, Ishida T, Oh K, *et al.* Biodegradation of chlordane and hexachlorobenzenes in river sediment [J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(3): 428-434.
- [6] 刘翠英, 余贵芬, 蒋新. 土壤和沉积物中多氯代有机化合物厌氧降解研究进展[J]. *生态学报*, 2007, **27**(8): 3482-3488.
- [7] Brahushi F, Dörfler U, Schroll R, *et al.* Stimulation of reductive dechlorination of hexachlorobenzene in soil by inducing the native microbial activity [J]. *Chemosphere*, 2004, **55**(11): 1477-1484.
- [8] Tao S, Guo L Q, Wang X J, *et al.* Use of sequential ASE extraction to evaluate the bioavailability of DDT and its metabolites to wheat roots in soils with various organic carbon contents[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **320**(1): 1-9.
- [9] Yoshida N, Yoshida Y, Handa Y, *et al.* Polyphasic characterization of a PCP-to-phenol dechlorinating microbial community enriched from paddy soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **381**(1-3): 233-242.
- [10] Chang B V, Chen Y M, Yuan S Y, *et al.* Reductive dechlorination of hexachlorobenzene by an anaerobic mixed culture [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, **100**(1-2): 25-32.
- [11] Wu W M, Nye J, Jain M K, *et al.* Anaerobic dechlorination of trichloroethylene (TCE) to ethylene using complex organic materials [J]. *Water Research*, 1998, **32**(5): 1445-1454.
- [12] Adrian L, Görisch H. Microbial transformation of chlorinated benzenes under anaerobic conditions [J]. *Research in Microbiology*, 2002, **153**(3): 131-137.
- [13] Liu C, Jiang X, Wang F, *et al.* Hexachlorobenzene dechlorination as affected by nitrogen application in acidic paddy soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **179**(1-3): 709-714.
- [14] Chang B V, Liu J Y, Yuan S Y. Dechlorination of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid and 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid in soil [J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **215**(1-2): 1-8.
- [15] Yuan S Y, Su C J, Chang B V. Microbial dechlorination of hexachlorobenzene in anaerobic sewage sludge [J]. *Chemosphere*, 1999, **38**(5): 1015-1023.
- [16] Chen I M, Chang B V, Yuan S Y, *et al.* Reductive dechlorination of hexachlorobenzene under various additions [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, **139**(1-4): 61-74.
- [17] Adrian L, Manz W, Szewzyk U, *et al.* Physiological characterization of a bacterial consortium reductively dechlorinating 1,2,3- and 1,2,4-trichlorobenzene [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, **64**(2): 496-503.
- [18] Tas D O, Pavlostathis S G. Microbial reductive transformation of pentachloronitrobenzene under methanogenic conditions [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(21): 8264-8272.
- [19] 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.
- [20] Cai Z C, Xing G X, Shen G Y, *et al.* Measurements of CH_4 and N_2O emissions from rice paddies in Fengqiu, China [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1999, **45**(1): 1-13.
- [21] 刘翠英, 余贵芬, 蒋新, 等. 小分子有机碳对土壤中六氯苯厌氧降解及挥发的影响 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1418-1424.
- [22] Alexander M. Aging, bioavailability, and overestimation of risk from environmental pollutants [J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, **34**(20): 4259-4265.
- [23] Yao F X, Yu G F, Wang F, *et al.* Aging activity of DDE in dissimilar rice soils in a greenhouse experiment [J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(6): 1188-1195.
- [24] Doick K J, Burauel P, Jones K C, *et al.* Distribution of aged ^{14}C -PCB and ^{14}C -PAH residues in particle-size and humic fractions of an agricultural soil [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(17): 6575-6583.
- [25] Elabd H, Jury W A, Cliath M M. Spatial variability of pesticide adsorption parameters [J]. *Environmental Science and Technology*, 1986, **20**(3): 256-260.
- [26] Sposito G, Martin-Neto L, Yang A. Atrazine complication by soil humic acids [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, **25**: 1203-1209.
- [27] Lehninger A L. *Biochemistry* [M]. (2nd ed). New York: Worth Publishers, Inc, 1975.
- [28] Liou R M, Huang S N, Lin C W. Methane emission from fields with differences in nitrogen fertilizers and rice varieties in Taiwan paddy soils [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(2): 237-246.
- [29] Bertin C, Yang X H, Weston L A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere [J]. *Plant and Soil*, 2003, **256**(1): 67-83.
- [30] Meade T, D'Angelo E M. [^{14}C]Pentachlorophenol mineralization in the rice rhizosphere with established oxidized and reduced soil layers [J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(1): 48-55.

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-ru, 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 Changde 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 Phosphorus 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 Floes	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 Floes	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-wei, <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