

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第8期

Vol.34 No.8

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

2006 ~ 2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析	戴永立, 陶俊, 林泽健, 谢绍东, 曹军骥, 张仁健 (2925)
南京北郊秋季 VOCs 及其光化学特征观测研究	李用宇, 朱彬, 安俊琳, 高晋徽, 夏丽, 张祥志, 秦玮, 汤莉莉 (2933)
大气 PM _{2.5} 中水溶性离子在线观测技术的应用研究	程萌田, 潘月鹏, 王辉, 刘全, 王跃思 (2943)
一种纳米气溶胶发生系统的设计及性能测试	麦华俊, 蒋靖坤, 何正旭, 郝吉明 (2950)
焦炉顶和厂区内环境中有机碳和元素碳的粒径分布	刘效峰, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 宋耕芳 (2955)
昼夜增温对大豆田土壤 N ₂ O 排放的影响	胡正华, 周迎平, 崔海玲, 陈书涛, 肖启涛, 刘艳 (2961)
不同土地利用方式下冬季 N ₂ O 排放及其影响因素	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 侯海军, 陈春兰, 魏文学 (2968)
基于支持向量回归模型的水稻田甲烷排放通量预测研究	陈强, 蒋卫国, 陈曦, 袁丽华, 王文杰, 潘英姿, 王维, 刘孝富, 刘海江 (2975)
夏季黄海和渤海微表层和次表层海水中营养盐的分布特征	王文涛, 杨桂朋, 于娟, 吴冠伟 (2983)
氮磷浓度对东海原甲藻优势种群吸附 BDE28 和 BDE47 的影响	汪芳, 葛蔚, 柴超, 孟祥霞 (2992)
基于光学分类的太湖水体叶绿素 a 浓度高光谱遥感	孙德勇, 周晓宇, 李云梅, 陈晓玲, 黄昌春, 龚绍琦 (3002)
基于浮游细菌生物完整性指数的河流生态系统健康评价——以滇池流域为例	黄艺, 舒中亚 (3010)
珠江三角洲城市非点源 COD 影响因素分析及其负荷估算	廖义善, 卓慕宁, 李定强, 郭太龙 (3019)
珠江流域河流碳输出通量及变化特征	张连凯, 覃小群, 杨慧, 黄奇波, 刘朋雨 (3025)
三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征	曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 王佐庆 (3035)
三峡库区消落带典型草本植物淹水浸泡后可溶性有机碳的释放特征	谭秋霞, 朱波, 花可可 (3043)
混合层深度对藻类生长的影响研究	陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 张平, 刘德富 (3049)
伊乐藻-氮循环菌联用对太湖梅梁湾水体脱氮的研究	赵琳, 李正魁, 周涛, 吴宁梅, 叶忠香, 刘丹丹 (3057)
组合型生态浮床对上覆水和沉积物之间氮磷的影响	郑立国, 杨仁斌, 王海萍, 宋建军 (3064)
生物炭覆盖对底泥污染物释放的影响	李扬, 李锋民, 张修稳, 吴召富, 于辉 (3071)
东莞石马河流域重金属污染及生态毒性的时空差异	高磊, 陈建耀, 柯志庭, 王江, 杨雪韵, 清水裕太 (3079)
连环湖牙门气泡沉积物重金属演化 and 污染研究	肖海丰, 臧淑英, 关莹, 刘少军, 徐海凤, 孙清展, 王京京, 李苗 (3088)
人工湿地净化工业区含非污染降雨径流的效果研究	敬丹丹, 王金泉, 马邕文, 李东亚, 王艳, 黄明智 (3095)
四环素抗性基因在人工湿地中的去除及累积	郑加玉, 刘琳, 高大文, 刘超翔 (3102)
不确定节点水量下水质监测点优化选址方法	刘书明, 吴雪, 欧阳乐岩 (3108)
饮用水中含氮消毒副产物三氯硝基甲烷的形成过程和影响因素	丁春生, 邹邦文, 缪佳, 傅洋平, 沈嘉辰 (3113)
漆酶催化氧化水中雌激素的研究	夏青, 谢卫平, 刘国强, 廖云燕, 王斌楠, 孔德洋, 陆隼鹤 (3119)
碳纳米管电极电还原降解水中头孢他啶	朱宏, 胡翔, 李俊峰 (3125)
UV-vis 光照下喹类抗菌药氟康唑的光化学反应类型	葛林科, 李凯, 杨凯, 邢广水, 于春艳, 张蓬, 姚子伟 (3132)
氙灯/TiO ₂ 体系下敌草隆光催化降解动力学研究	阳海, 曾健, 黎源, 阳立平, 易兵 (3137)
羟基磷灰石对水中刚果红的吸附作用研究	詹艳慧, 林建伟 (3143)
乙醇处理对树脂基纳米水合氧化铁结构及其除砷性能的影响	万琪, 李旭春, 潘丙才 (3151)
污水中溶解性有机氮类化合物的氯化反应特性及其消毒副产物生成潜能	刘冰, 于鑫, 余国忠, 古励, 赵承美, 翟慧敏, 李清飞 (3156)
短程深度脱氮中试工艺的低温启动和维持	顾升波, 王淑莹, 彭永臻 (3164)
生物活性炭厌氧氨氧化反应器启动过程研究	赖玮毅, 周伟丽, 何圣兵 (3171)
东北三省畜禽养殖粪固氮激素排放及其潜在污染风险	刘妹芳, 李艳霞, 张雪莲, 冯成洪, 鲁肖飞, 杨明, 李帷, 朱铁群, 黄泽春 (3180)
淮河流域土壤中全氟化合物的空间分布及组成特征	孟晶, 王铁宇, 王佩, 吕永龙 (3188)
华北平原典型区土壤氟的形态及其分布特征	易春瑶, 汪丙国, 靳孟贵 (3195)
长期施磷的产量效应及其环境风险评价	颜晓, 王德建, 张刚, 冉景, 郑继成 (3205)
污灌区中有机氯农药对沿岸土壤的影响	徐亮, 张彩香, 刘敏, 廖小平, 姚林林, 李佳乐, 向青清 (3211)
表面活性剂及其组合洗脱污染土壤中的硫丹	熊佰炼, 郑国灿, 张进忠, 邢贻, 徐卫红 (3216)
黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响	赵彤, 蒋跃利, 闫浩, 黄懿梅, 安韶山 (3223)
氮素添加对樟树林红壤微生物的影响	郁培义, 朱凡, 宿少锋, 王志勇, 闫文德 (3231)
医疗废物焚烧炉周边环境介质中二噁英的浓度、同系物分布与来源分析	黄文, 张素坤, 杜国勇, 张漫雯, 冯桂贤, 任明忠 (3238)
固相微萃取和固相萃取评价多环芳烃降解过程中的生物有效性变化	郭美霞, 巩宗强, 李晓军, 刘丹, 王悦 (3244)
改良型固定化 <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4 降解四氢呋喃的研究	邵钱, 叶杰旭, 欧阳杜娟, 陈建孟, 陈东之 (3251)
PCR-DGGE 技术解析固体碳源表面生物膜的微生物群落结构	徐影, 仇天雷, 韩梅琳, 李军, 王旭明 (3257)
温度对嗜酸性硫杆菌活性和生物成因次生铁矿物形成的影响	宋永伟, 赵博文, 霍敏波, 崔春红, 周立祥 (3264)
小白菜对外源硝酸盐和亚硝酸盐动态吸收的差异及其机制研究	郭璐, 满楠, 梁东丽, 谢钧宇, 刘娟娟 (3272)
预处理对打捆麦秸贮存和厌氧生物产沼气的的影响	马慧娟, 陈广银, 杜静, 常志州, 叶小梅 (3280)
硝酸盐对淡水水生生物毒性及水质基准推导	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3286)
生物毒性测试微孔板 MTOXPlate 的分析性能研究	林奕云, 张国霞, 贺丽苹, 孙国萍, 许玫英 (3294)
两种实验设计研究 DES 和 EV 对 MCF-7 细胞增殖的联合作用	刘倩, 雷炳莉, 安静, 尚羽, 钟玉芳, 康佳, 文育 (3303)
中国近海海洋环境多氯联苯 (PCBs) 污染现状及影响因素	刘敏霞, 杨玉玉, 李庆孝, 王俊 (3309)
城市污水处理厂出水中的药品和个人护理品	郑少奎, 李晓峰 (3316)
生物炭封存技术研究进展	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (3327)
饮用水水源地严格管理水质的对策分析——对实行严格水资源管理问题上的看法和建议	傅国伟 (3334)
《环境科学》征稿简则 (2967) 《环境科学》征订启事 (3034) 信息 (3063, 3136, 3194, 3302)	

生物炭碳封存技术研究进展

姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇*

(中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100)

摘要: 生物炭(biochar)是一种在无氧或者限氧的条件下,对生物质原料进行高温热解而得到的一种细粒度、多孔性的碳质材料,其稳定的芳烃结构使之在土壤中对生物和非生物氧化具有较强的抗性,成为一种有效的碳封存技术,并受到越来越多的关注.通过对生物炭碳封存机制的阐述,重点评述了生物炭的制备、稳定性及植物生长和土壤有机碳对生物炭添加的响应等方面对生物炭碳封存潜力的影响,并初步考察了生物炭碳封存潜力和经济性等方面的研究进展.最后针对目前关于影响生物炭碳封存潜力因素以及这些因素之间相互关系等方面的研究中存在的问题和不足,提出了进一步研究的方向,为我国生物炭技术的研究和应用提供有益参考.

关键词: 生物炭; 生物质; 热解; 碳封存; 土壤有机碳(SOC)

中图分类号: X382.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)08-3327-07

Research Progress on Biochar Carbon Sequestration Technology

JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, WANG Zhen-yu

(College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Biochar is a fine-grained and porous material, which is produced by pyrolyzing biomass under anaerobic or oxygen-limiting condition. Due to the aromatic structure, it is resistant to the biotic and abiotic degradation which makes biochar production a promising carbon sequestration technology, and it has attracted widespread attention. Factors including biochar production, biochar stability in soil and the response of plant growth and soil organic carbon to the biochar addition can influence the carbon sequestration potential of biochar. Through exploring the mechanisms of biochar carbon sequestration, the influence of these factors was studied. Furthermore, the research progress of carbon sequestration potential and its economic viability were examined. Finally, aiming at the knowledge gaps in the influencing factors as well as the relationship between these factors, some further research needs were proposed for better application of biochar in China.

Key words: biochar; biomass; pyrolysis; carbon sequestration; soil organic carbon (SOC)

根据 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007) 的报告显示,2005 年全球大气平均 CO_2 浓度为 379×10^{-6} , 从 1995 ~ 2005 年间以每年 1.9×10^{-6} 的速度呈不断增长的趋势^[1]. 随着大气中 CO_2 浓度的不断攀升, 仅仅减少 CO_2 的排放显然不能满足对这一势头的遏制, 因此越来越多的学者开始更加关注 CO_2 的捕获技术^[2]. Ornstein 等^[3] 通过海水淡化技术提供水源, 在撒哈拉和澳大利亚内陆沙漠地区建立灌溉植树工程, 每年可从大气中吸收 CO_2 的数量至少等于化石燃料燃烧释放的数量. Zeng^[4] 指出将已死的或有选择性收获的树木在土壤中掩埋是一种可行的碳封存技术, 长期可持续碳封存潜力能够达到 $(10 \pm 5) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$. 另外, 随着人类土地利用强度的不断加剧, 土壤中有机碳含量的不断退化, 增加土壤有机碳(SOC)含量被认为是目前能够获得碳封存和修复退化土壤双重效益的有效途径^[5]. Lal^[5] 指出耕种的土壤已经失去了最初 SOC 总量的 $1/2 \sim 1/3$, 累积损失达 $30 \sim 40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 因此如何最大程度地减少土壤中碳损失、挖掘碳封存潜

力是当前农业和环境领域面临的新课题, 近些年来国际上兴起的生物炭技术使之成为可能.

生物炭(biochar, BC)是一种在无氧或者限氧条件下,对生物质原料进行高温热解而得到的一种细粒度、多孔性的碳质材料^[6]. 由于其具有较高的抵抗生物和非生物降解的能力, 能够长期稳定地封存在土壤中^[7], 具有巨大的碳封存潜力. 2009 年《Cell》上发表文章把“BC 及其应用”评为 2010 年全球十五大环保问题之一^[8].

本研究根据国内外对 BC 的碳封存潜力研究现状, 系统阐述 BC 的碳封存机制及其影响因素; BC 的碳封存潜力和经济性; 在此基础上针对目前研究中存在的问题和不足, 提出了进一步研究的方向, 以

收稿日期: 2012-09-25; 修订日期: 2012-11-23

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201305021); 青岛市科技发展规划项目(10-3-3-21-nsh); 山东省优秀中青年科学家奖励基金项目(BS2010HZ023)

作者简介: 姜志翔(1983~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生物质原料制备生物炭及其环境效益, E-mail: yifeng501@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: wang0628@ouc.edu.cn

期为我国进行以固碳为核心的生物炭技术的研究提供参考。

1 BC 的碳封存机制及其影响因素

1.1 BC 碳封存机制

如图 1 所示,自然状态下,植物通过光合作用吸收的 CO_2 随后经燃烧或者自然分解又重新回到大气中,在这一过程中,能够进入土壤中并长期储存的 C 量不到 3%;而当 BC 介入到这一过程中时,大约有 30%~40% 的 C 可长期储存在土壤中^[9]. 另外,BC 还能够改善土壤理化性质^[10, 11],为微生物提供良好的栖息环境^[12],提高植物对土壤养分的吸收有效性,从而增加植物生物量^[13, 14]. BC 还能够通过改变土壤有机质(SOM)腐质化、稳定性和呼吸速率等,抑制土壤有机碳(SOC)的分解^[15]. 因此,BC 的碳封存途径包括:易分解的植物 C 向稳定的 BC 转化;植物生物量的增加,提高了植物对大气 CO_2 的捕获能力;抑制易分解 SOC 的分解. 研究表明,BC 的碳封存过程及潜力受诸多因素的影响^[6, 16, 17].

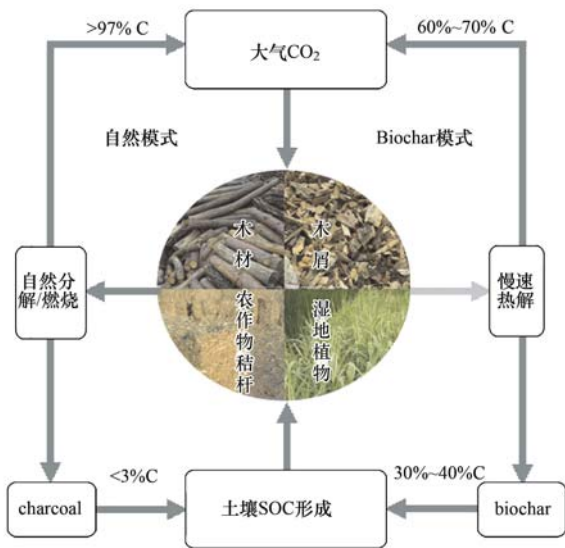


图 1 生物炭碳封存机制

Fig. 1 Carbon sequestration mechanisms of biochar technology

1.2 BC 碳封存潜力影响因素

1.2.1 BC 的制备

不同原料和制备条件下 BC 的产量存在较大差异,直接影响 BC 的碳封存潜力. 这些因素主要包括:生物质原料的成分组成、原料的预处理及热解过程条件(如热解方式、温度等)^[18].

不同生物质原料,甚至是不同土壤类型中生长的同一物种,其有机成分纤维素、半纤维素和木质素之间的构成比例会存在着较大的差异^[16]. 同时在

不同的热解条件下,不同成分的分解时间和产物之间也存在着的差异,而产生 BC 的主要为纤维素和木质素^[16]. 另外,不同生物质原料中的灰分含量也存在着显著的差异,从软木材的 1% 到草本植物和农业废弃物的 15%^[19],这也是影响 BC 产出的重要因素. 原料在热解之前的预处理过程也会对 BC 的产量产生重要影响;其他条件一定的情况下,BC 的产出量随着原料块状大小的降低而降低^[20].

在热解条件中能够对 BC 的产出及其特性产生影响的关键因素是加热速率和热解温度. 在热解过程中除了 BC 以外,还会产生生物油和生物气两种副产物,因此不同的加热速率和热解温度会对这 3 种产物之间的分配产生很大的影响^[20]. 根据加热速率的快慢,生物质热解可分为 3 类:慢速热解、中速热解、快速热解^[6, 21]. 表 1 展示了不同热解方式下 BC 产率变化的变化状况,随着加热速率的提高,BC 的产量不断降低. 热解温度对 BC 产量的影响是随着峰值温度的升高而降低^[20].

表 1 不同热解方式下 3 种产物的产出比例^[6, 21]/%

Table 1 Mean post-pyrolysis feedstock residues resulting from different pyrolysis technologies/%

热解方式	生物炭	生物油	生物气
慢速热解	35	30	35
中速热解	25	50	25
快速热解	12	75	13

1.2.2 BC 的稳定性

BC 的稳定性是影响其碳封存潜力的关键因素,其能够决定 BC 在土壤中封存的时间、对土壤中温室气体排放抑制的持续时间、改善土壤条件的持续时间等^[17]. BC 的芳香结构使其拥有较高的化学抗性,同时其表面功能、对其他矿物质和有机化合物的吸附使得其具有更好的物理抗性^[22]. Glaser 等^[7]的研究表明 BC 能够在土壤中封存数百年至上千年的时间. Major 等^[23]利用稳定同位素技术计算了 BC 在土壤中的平均时间为 600 多年. 然而不管 BC 具有多高的抗性,其最终都会被氧化成 CO_2 释放到大气中^[24]. BC 在土壤中的降解可分为生物降解和非生物氧化两个途径. 其中生物降解是 BC 损失的主要过程,通过微生物和异养分解进行的新陈代谢^[17]致使 BC 被利用分解. 而非生物氧化过程被认为是微生物利用高度芳烃结构 BC 的必要阶段^[17, 24]. Cheng 等^[24]指出,非生物过程比生物过程对于 BC 最初的作用要大得多,同时非生物氧化过程将对随后的生物降解产生重要影响.

BC 的生物和非生物降解过程受着众多因素的影响,如:土壤类型和气候、制备原料类型、制备的温度等^[25]. Nguyen 等^[26, 27]从培养的土壤温度和水文状况分别探究了它们对 BC 降解的影响. 研究表明:随着土壤温度的增加,BC 的损失率增加;土壤温度和水文状况对 BC 降解的影响在很大程度上取决于 BC 的制备原料和制备温度;在同一温度下,谷物秸秆(低密度、软质原料)或低温制备的 BC 其损失量要远远高于橡树(高密度、硬质原料)或高温制备的 BC;谷物秸秆 BC 在不饱和状况下损失量最大(16%),而橡树 BC 则是在饱和/不饱和的交替状况下损失量最大(12%).

另外,其他的一些学者也通过对新制备的 BC 进行培养试验,量化地测定了在一定时期内 BC 的损失量和损失速率. Hilscher 等^[28]发现黑麦草和松树 BC 在 48 d 的培养期内分别损失 0.5% 和 3%,而黑麦草 BC 在 3 a 的培养期内损失量达到 4%^[29]; Zimmerman^[30]的试验表明:1 a 内不同生物质原料制备而成的 BC 的氧化比例为 0.4% ~ 3%. 这些结果表明 BC 在土壤中具有很高的稳定性.

1.2.3 植物生物量

BC 进入土壤后,产生的最大环境效益是能够提高植物生物量^[31]. BC 在其制备过程中能够保持生

物质原料体内的养分元素,本身可以作为肥料来源^[32]. 另外,BC 还能够有效改善土壤通透性、CEC、持水能力等理化性质,促进微生物的活性,从而有利于土壤中营养元素的保持和吸收效率. Jeffery 等^[33]综合众多文献的研究结果,用量化的统计方法分析了在不同条件下(如:BC 添加量、土壤 pH、土壤类型、化肥等施用、不同受试植物、制备原料等)BC 对植物生长的影响,总的来说,BC 能够显著提高植物生物量(提高约 10%). 其中对酸性土壤(14%)和中性土壤(13%)、粗质土壤(10%)和中等质地土壤(13%)生长的植物的促进最为明显. 这主要是 BC 产生的石灰效应(BC 的加入能够提高土壤的酸性环境)和提高土壤持水能力的结果. 除此之外,相比于单独添加 BC,结合化肥使用,能够更加显著地提高作物的产量^[14, 32],这是由于 BC 能够增加作物根区的养分储量和减少养分的淋失^[14],表 2 总结了近几年主要文献中有关不同条件下 BC 对植物生物量影响效果的研究结果.

同时也应该注意到,目前对于这方面的研究大多数是在热带或者亚热带气候区域等肥沃区域进行的,而对于温带气候区域的研究比较缺乏^[34]. 因此 BC 的应用对于中高纬度区域,尤其是北方贫瘠土壤的影响效果尚还存在着诸多不确定性.

表 2 不同试验条件下的作物生物量变化情况
Table 2 Effects of biochar on crop productivity in different experimental conditions

受试土壤和植物	试验条件	试验结果	文献
大麦	BC 添加量:0、5、10、50 t·hm ⁻² ; N 使用量:0、25、50、70、100 kg·hm ⁻²	单独添加 BC 对产量影响不大; 在 BC 和较高的 N 使用量下产量增加 30%	[35]
玉米 碳酸钙质潮土	小麦秸秆 BC,350 ~ 550℃ BC 添加量:0、20、40 t·hm ⁻² ; N 使用量:300 kg·hm ⁻²	单独添加 BC 产量提高 15.8% 和 7.3%; BC 和 N 同时添加产量增加 8.8% 和 12.1%	[36]
玉米 砂土	BC 添加量:0、10、15、20 t·hm ⁻² ; N、P、K 使用量:60、26.18、49.81 kg·hm ⁻²	BC 添加量为 15 和 20 时,产量分别提高 150% 和 98%	[37]
玉米 高岭土	木质 BC 添加量:8、20 t·hm ⁻² 试验期为 4 a	第 1 a,产量没有明显变化;第 2 a,分别增加 19%、28%;第 3 a,分别增加 15%、30%;第 4 a 分别增加 71%、141%	[38]
—	添加量:0.4 ~ 8 t·hm ⁻²	产量增加 20% ~ 220%	[39]
萝卜 淋溶土	BC 原料:草屑、棉花制品废弃物、植物剪枝等混合物 BC 添加量:10、50、100 t·hm ⁻² N 使用量:100 kg·hm ⁻²	无 N 肥时,不同 BC 添加量对作物产量变化不大;有 N 肥时,随着 BC 添加量的增加,作物产量增加,变化范围:95% ~ 266%	[40]
小麦 粉壤土	BC 添加量:30、60 t·hm ⁻² N、P 使用量:两次使用过程,第一次 N、P 依次为 22 kg·hm ⁻² 、50 kg·hm ⁻² ;第二次 N 为 100 kg·hm ⁻² 试验期为 2 a	第 1 a:两种添加量一次提高产量 28.5%、38.5% 第 2 a:两种添加量一次提高产量 29.0%、33.6%	[34]
大豆 黏质氧化土	木质 BC BC 添加量:30、60、90 t·hm ⁻² 肥料使用状况:石灰为 300 kg·hm ⁻² 、N 为 20 kg·hm ⁻² 、P 为 20 kg·hm ⁻² ;试验期:80 d	BC 添加量为 30 时,量变化不显著;60 和 90 时分别增加 39% 和 46%;而在 90 时,大豆总的生物量出现降低	[41]

1.2.4 SOC 的含量

BC 是一种非常适宜改善 SOC 水平的物质^[42], 是 SOC 构成组分中分解最慢的^[30]. 针对不同区域土壤的研究发现 SOC 含量的 30% ~ 45% 可能是由 BC 构成的^[43~45]. BC 的生产和应用能够从两个途径影响 SOC 的输入和输出: 一方面 BC 的应用会引起生物量的增加, 从而增加形成 SOC 的植物残体的输入量(如地下部未收获部分生物量的增加); 同时可以改变输入形式, 由原来易分解的植物残体变成稳定的 BC 形式. 另一个方面, BC 在土壤中能够改变土壤有机质(SOM)的腐质化、稳定性和呼吸速率, 从而抑制易分解有机质的分解^[18]. 在传统的耕作模式下, 作物残体还田通常会表现出较高的土壤 C 呼吸速率, 这是因为农作物残体中含有很容易被分解的有机物质^[42]. 而当添加 BC 以后, 能够有效降低呼吸速率, 减少土壤 C 的分解释放^[37]. Steiner 等^[14]发现土壤在自然状况或者添加鸡粪、堆肥、树叶等有机质时, 土壤中 C 的损失率在 25% 以上, 而添加 BC 后, 损失率仅为 4% ~ 8%. 因此, 土壤中添加 BC 不仅不会增加先前土壤中存在有机质的分解速率, 反而会有效抑制这一分解过程. 然而, Steinbeiss 等^[46]的研究表明, BC 添加能够增加土壤中原有 C 的损失量, 但同时也指出, 尽管这一损失量增加了, 但从总体上来看土壤中的总 C 含量是增加的, 这是由于更多稳定 C 的输入而造成的.

综上所述, BC 在土壤中的稳定性及其对土壤

条件的改善受到众多因素的影响. 不同原料和制备条件下产生的 BC 对于不同土壤类型和作物所产生的效果是不同的, 因此对于它们之间的内在联系和作用机制需要在今后的研究中进一步明确.

2 BC 碳封存潜力及经济性评估

2.1 BC 碳封存潜力评估

对于 BC 固碳潜力的评估, 正如 Matovic^[47] 指出的那样, 应该从两个方面对其进行探究: ① 是否有足够的生物质原料来进行 BC 的生产, 从而对大气中的 CO₂ 水平产生重大影响; ② 是否有足够的土地能够保证 BC 的封存. BC 的制备原料来源极其广泛, 涵盖各种各样自然的和工业的生物质原料, 包括木材和草本植物、林业废弃物、甘蔗渣、农业残余物(秸秆、果壳、稻壳等)、废纸和造纸厂废弃物、市政固体废弃物、木材加工业碎屑、生物固体、草、食品加工废弃物、动物粪便、水生植物和藻类等^[15, 19, 37, 48]. Lehmann 等^[9]指出全球范围内农业和林业废弃物中可用于进行 BC 生产的原料数量为 $0.16 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. Woolf 等^[15]的研究表明, 全球范围内可持续性提供的最大生物质原料总量约为 $2.30 \times 10^9 \sim 5.10 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. 表 3 总结了不同文献中 BC 的碳封存潜力的评估, 从中可以看出, 在全球水平上的 BC 碳封存潜力将远远超过目前化石燃料燃烧的排放量(以 CO_{2e} 计, $2 \times 10^{10} \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)^[9].

表 3 不同尺度下的 BC 碳封存潜力评估

Table 3 Carbon sequestration of biochar in different calculation scales

计算尺度	原料来源	碳封存潜力(CO _{2e} 计)	文献
全球水平	全球范围可利用生物质原料	$0.8 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$; 2100 年可达 $20.1 \times 10^9 \sim 34.9 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$	[9]
全球水平	农林废弃物、城市废弃物	$0.5 \times 10^9 \sim 0.9 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$; 100 累积封存量为 $43 \times 10^9 \sim 94 \times 10^9 \text{ t}$	[15]
全球水平	全球初级生产率的 10%	$11 \times 10^9 \text{ t}$	[47]
区域水平(USA)	林业和农业可利用生物质原料	$1.7 \times 10^9 \text{ t}$	[49]
区域水平(UK)	林业和废弃物资源	$1.8 \times 10^6 \sim 3.7 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$	[50]
单位原料	农作物秸秆	每 t 原料潜力为 $0.4 \sim 0.6 \text{ t}$	[32]
单位原料	不同林业和废弃物资源	每 t 原料潜力为 $0.3 \sim 0.7 \text{ t}$	[51]
单位面积	农作物秸秆和能量作物	每 hm^2 土地潜力 $0.8 \sim 12 \text{ t}$	[52]

2.2 BC 碳封存经济性分析

尽管 BC 表现出了很大的碳封存潜力, 但是决定一种碳封存技术是否在实践中具有发展前景在于其是否在经济上具有吸引力^[32]. BC 的经济价值主要源于两个方面: ① BC 应用的附带效应所产生的经济价值; ② BC 碳封存价值. BC 作为一种碳封存技术和其他技术相比, 其重要的优势在于它还能够

同时产生多方面的附带效益. 如: 生物油、生物气两种可更新能源的获得; 改善土壤条件, 从而提高植物生物量; 提高农业化肥使用效率, 减少农业生产的经济投入; 减少绿色废弃物管理成本等^[2, 48, 53]. 研究表明, BC 是否具有经济性很大程度上取决于碳封存价值^[32, 53], 当碳封存价格达到 $40 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1}$ 左右时, 其将表现出明显的经济效果^[32, 54]. BC 的投入

成本主要包括原料种植成本、原料收集和运输成本、热解成本、BC 运输及应用. 而制约其经济有效性的一个最重要因素是运输成本^[32], 其次是 BC 生产设施的建立成本.

Pratt 等^[54]指出, 在发展中国家建立散布式小规模简易 BC 生产体系, 由于其更加接近原料地和便于收集, 因此表现出很高的成本有效性和碳封存潜力; 在发达地区尽管拥有更好的基础设施, 能够进行大规模生产, 但是其碳封存的成本有效性要远远低于不发达地区. Roberts 等^[32]对 BC 技术应用的经济性进行了详细的生命周期评价(LCA), 在考虑碳封存价值的情况下(无论价值水平的高低)BC 具有正的经济效益. Yoder 等^[53]通过分析不同热解条件下(加热速率和热解温度)BC 与生物油、生物气之间的分配在减少温室气体排放和经济产出等方面的权衡, 建立模型计算了获得最大化碳封存潜力和经济产出时的热解条件. Lehmann^[2]和 Pratt 等^[54]还将 BC 与其他的碳封存技术进行比较, 表明无论是在碳封存能力还是在成本有效性方面 BC 都表现出巨大优势.

3 问题与展望

(1) 进一步加强 BC 制备过程条件选择与 BC 特性之间相互关系的研究. BC 可以作为主要或副产品, 通过多种技术制备而来(如快速、中速、慢速热解、微波热解、水热碳化和气化技术等)^[55], 其产量和特性在很大程度上取决于原材料和制备过程条件的选择, 弄清它们之间存在的内在关系对于根据不同目的而制备特定特性的 BC 具有重要的意义. 因此, 加强对热解条件与 BC 特性、BC 特性与植物生长之间内在关系的深入研究, 能够更清楚地了解热解条件和 BC 特性共同对植物生长的作用机制, 进而可以通过对原料和制备过程条件的选择与控制生产具有理想特性的 BC.

(2) 应该注重长期试验的研究. 目前对 BC 在土壤中的稳定性、BC 对植物生长和 SOC 分解的影响大多都是一些短期的试验研究. 如表 2 所示, 仅有 2 篇文献分别考察了 2 个生长期和 4 个生长期内 BC 对植物生长的影响, 而更长期的试验尚还没有报道. 长期研究的缺乏, 将导致无法预测 BC 对土壤肥力和土壤特性的长期影响, 及其在土壤中的稳定性变化等^[56]. 因此, 在短期研究的基础上, 应该加强长期研究的开展, 探讨 BC 应用的长期效应, 提高研究结果和成因机制的可靠性. 同时, 还可以为 BC 应用的

碳封存潜力评估提供可靠的支撑.

(3) 加强田间试验的研究. 目前对于 BC 在土壤中稳定及其对植物生长影响的研究主要是在实验室人工模拟环境中进行, 其研究结果必然与在自然环境下(田间)的表现存在着很大的差别. 同时现有少量的田间试验大多只有 1~2 a 的试验期, 并且关于农业耕种模式对 BC 在土壤中变化的影响还没有报道^[33]. 由于目前田间试验研究可利用数据很少, 导致无法形成与实验室试验数据之间的对比验证, 从而降低了试验结果的可靠性. 因此, 在未来的研究当中应该加强对长期田间试验的研究.

(4) 深入研究 BC 对 SOC 的影响机制. 目前关于 BC 对 SOC 分解的影响机制还仍不明确^[57]. 正如前面的陈述, 既有研究表明 BC 能够抑制 SOC 的分解速率, 同时也有文献显示 BC 能够促进 SOC 的分解, 而 SOC 的变化对 BC 的碳封存潜力具有重要的影响. Zimmerman 等^[58]认为导致这些结果差异的原因在于材料(土壤和生物炭类型等)和试验方法上的差别. 另外, Liang 等^[59]发现 BC 添加后能够通过对土壤中微生物数量、新陈代谢方式的影响, 进而影响 SOC 的动态变化和稳定, 但具体内在机制还有待研究. 由此可见, BC 对 SOC 的作用机制, 不单纯是两者之间的相互作用, 而且还受原料和环境因素的影响. 因此, 探明 BC 对 SOC 的影响机制, 首先要分析不同因素对 BC 和 SOC 之间相互作用的影响, 通过对不同因素下产生的结果之间的对比分析, 进而探究 BC 对 SOC 的影响机制.

(5) 建立规模化的 BC 生产和应用项目. 目前由于缺乏来自于规模化生产及应用的直接数据, 大部分关于 BC 技术应用的碳封存潜力和经济性评估都是基于假设之上^[32, 51, 60], 不可避免地存在着较高的不确定性^[60]. 因此, 在接下来的研究中, 应该建立不同规模水平的 BC 生产和应用项目(尤其是以慢速热解为核心技术的项目), 以获得真实的经济成本和效益产出数据, 为更加准确地评估 BC 技术应用的固碳潜力和经济性提供可靠依据.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [2] Lehmann J. Biological carbon sequestration must and can be a win-win approach[J]. Climatic Change, 2009, 97(3-4): 459-463.
- [3] Ormstein L, Aleinov I, Rind D. Irrigated afforestation of the Sahara and Australian Outback to end global warming [J].

- Climatic Change, 2009, **97**(3-4): 409-437.
- [4] Zeng N. Carbon sequestration via wood burial [J]. Carbon Balance and Management, 2008, **3**(1): 1.
- [5] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. Geoderma, 2004, **123**(1-2): 1-22.
- [6] Sohi S, Lopez-Capel E, Krull E, *et al.* Biochar, climate change and soil: a review to guide future research [R]. Australia: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), 2009. 10-15.
- [7] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, *et al.* The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics [J]. Naturwissenschaften, 2001, **88**(1): 37-41.
- [8] Sutherland W J, Clout M, Côté I M, *et al.* A horizon scan of global conservation issues for 2010 [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2010, **25**(1): 1-7.
- [9] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: a review [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, **11**(2): 395-419.
- [10] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review [J]. Plant and Soil, 2010, **337**(1-2): 1-18.
- [11] Asai H, Samson B K, Stephan H M, *et al.* Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield [J]. Field Crops Research, 2009, **111**(1-2): 81-84.
- [12] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: Science and technology [M]. London: Earthscan, 2009. 85-106.
- [13] Schahczenski J. Biochar and sustainable agriculture [EB/OL]. <https://attra.ncat.org/attra-pub/summaries/summary.php?pub=322>, 2010.
- [14] Steiner C, Teixeira W, Lehmann J, *et al.* Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil [J]. Plant and Soil, 2007, **291**(1-2): 275-290.
- [15] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, *et al.* Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. Nature Communications, 2010, **1**(5): 1-9.
- [16] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: Science and technology [M]. London: Earthscan, 2009. 127-146.
- [17] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: Science and technology [M]. London: Earthscan, 2009. 183-206.
- [18] Singh B, Singh B P, Cowie A L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment [J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, **48**(7): 516-525.
- [19] Yaman S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks [J]. Energy Conversion and Management, 2004, **45**(5): 651-671.
- [20] Antal M J Jr, Grønli M. The art, science, and technology of charcoal production [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2003, **42**(8): 1619-1640.
- [21] Laird D A, Brown R C, Amonette J E, *et al.* Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar [J]. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2009, **3**(5): 547-562.
- [22] Shrestha G, Traina S J, Swanston C W. Black carbon's properties and role in the environment: a comprehensive review [J]. Sustainability, 2010, **2**(1): 294-320.
- [23] Major J, Lehmann J, Rondon M, *et al.* Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration [J]. Global Change Biology, 2010, **16**(4): 1366-1379.
- [24] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, *et al.* Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes [J]. Organic Geochemistry, 2006, **37**(11): 1477-1488.
- [25] Lehmann J. Bio-energy in the black [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007, **5**(7): 381-387.
- [26] Nguyen B T, Lehmann J, Hockaday W C, *et al.* Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(9): 3324-3331.
- [27] Nguyen B T, Lehmann J. Black carbon decomposition under varying water regimes [J]. Organic Geochemistry, 2009, **40**(8): 846-853.
- [28] Hilscher A, Heister K, Siewert C, *et al.* Mineralisation and structural changes during the initial phase of microbial degradation of pyrogenic plant residues in soil [J]. Organic Geochemistry, 2009, **40**(3): 332-342.
- [29] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H Q, *et al.* Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labeling [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(2): 210-219.
- [30] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar) [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(4): 1295-1301.
- [31] Marris M. Putting the carbon back: Black is the new green [J]. Nature, 2006, **442**(7103): 624-626.
- [32] Roberts K G, Gloy B A, Joseph S, *et al.* Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(2): 827-833.
- [33] Jeffery S, Verheijen F G A, Velde M, *et al.* A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, **144**(1): 175-187.
- [34] Vaccari F P, Baronti S, Lugato E, *et al.* Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat [J]. European Journal of Agronomy, 2011, **34**(4): 231-238.
- [35] Gathorne-Hardy A, Knight J, Woods J. Biochar as a soil amendment positively interacts with nitrogen fertiliser to improve barley yields in the UK [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2009, **6**(37): 372052.
- [36] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, *et al.* Effect of biochar

- amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. *Plant and Soil*, 2011, **351**(1-2):263-275.
- [37] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, *et al.* Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. *Soil Use and Management*, 2011, **27**(2): 205-212.
- [38] Major J, Rondon M, Molina D, *et al.* Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant and Soil*, 2010, **333**(1-2): 117-128.
- [39] Uphoff N, Ball A S, Fernandes E, *et al.* Biological approaches to sustainable soil systems[M]. USA: CRC Press, 2006. 517-530.
- [40] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, *et al.* Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, **45**(8): 629-634.
- [41] Rondon M, Lehmann J, Ramírez J, *et al.* Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, **43**(6): 699-708.
- [42] Zavalloni C, Alberti G, Biasiol S, *et al.* Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: a short-term study [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, **50**(1): 45-51.
- [43] Janik L J, Skjemstad J O, Taylor J A. Non-living soil organic matter: what do we know about it? [J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1998, **38**(7): 667-680.
- [44] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, *et al.* Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**(7-8): 669-678.
- [45] Schmidt M W I, Skjemstad J O, Gehrt E, *et al.* Charred organic carbon in German chernozemic soils [J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, **50**(2): 351-365.
- [46] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(6): 1301-1310.
- [47] Matovic D. Biochar as a viable carbon sequestration option: Global and Canadian perspective[J]. *Energy*, 2011, **36**(4): 2011-2016.
- [48] Özçimen D, Ersoy-Meriçboyu A. Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials[J]. *Renewable Energy*, 2010, **35**(6): 1319-1324.
- [49] Lehmann J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, **447**(7141): 143-144.
- [50] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: Science and technology [M]. London: Earthscan, 2009. 317-340.
- [51] Hammond J, Shackley S, Sohi S, *et al.* Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK [J]. *Energy Policy*, 2011, **39**(5): 2646-2655.
- [52] Gaunt J L, Lehmann J. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(11): 4152-4158.
- [53] Yoder J, Galinato S, Granatstein D, *et al.* Economic tradeoff between biochar and bio-oil production via pyrolysis[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, **35**(5): 1851-1862.
- [54] Pratt K, Moran D. Evaluating the cost-effectiveness of global biochar mitigation potential[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, **34**(8): 1149-1158.
- [55] Manyà J J. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **46**(15): 7939-7954.
- [56] Biofuelwatch. Biochar: a critical review of science and policy [EB/OL]. <http://www.biochar-international.org/sites/default/files/Biochar%20Misconceptions%20and%20the%20Science.pdf>, 2011.
- [57] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus [J]. *Science*, 2008, **320**(5876): 629.
- [58] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(6): 1169-1179.
- [59] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**(2): 206-213.
- [60] Shackley S, Hammond J, Gaunt J, *et al.* The feasibility and costs of biochar deployment in the UK [J]. *Carbon Management*, 2011, **2**(3): 335-356.

CONTENTS

Characteristics of Haze and Its Impact Factors in Four Megacities in China During 2006-2009	DAI Yong-li, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2925)
Characteristics of VOCs and Their Photochemical Reactivity in Autumn in Nanjing Northern Suburb	LI Yong-yu, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2933)
On-Line Measurement of Water-Soluble Composition of Particulate Matter in Beijing	CHENG Meng-tian, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2943)
Design and Evaluation of an Aerosol Nanoparticle Generation System	MAI Hua-jun, JIANG Jing-kun, HE Zheng-xu, <i>et al.</i> (2950)
Aerosol Size Distribution of Organic Carbon and Elemental Carbon on the Top of Coke Oven and in the Plant Area	LIU Xiao-feng, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (2955)
Effects of Diurnal Warming on Soil N ₂ O Emission in Soybean Field	HU Zheng-hua, ZHOU Ying-ping, CUI Hai-ling, <i>et al.</i> (2961)
N ₂ O Flux in Winter and Its Affecting Factors Under Different Land Use Patterns	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2968)
Prediction of Methane Emission of Paddy Field Based on the Support Vector Regression Model	CHEN Qiang, JIANG Wei-guo, CHEN Xi, <i>et al.</i> (2975)
Distributional Characteristics of Nutrients in the Sea-surface Microlayer and Subsurface Water of the Bohai and Yellow Sea in Summer	WANG Wen-tao, YANG Gui-peng, YU Juan, <i>et al.</i> (2983)
Effect of Nitrogen and Phosphorus Concentrations on the Adsorption of BDE28 and BDE47 by <i>Prorocentrum donghaiense</i> Dominant Population	WANG Fang, GE Wei, CHAI Chao, <i>et al.</i> (2992)
Hyperspectral Remote Sensing of Chlorophyll a Concentrations in the Lake Taihu, Based on Water Optical Classification	SUN De-yong, ZHOU Xiao-yu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (3002)
Bacterioplankton Index of Biotic Integrity (BP-IBI): An Approach for Assessing River Ecosystem Health in Dianchi Watershed	HUANG Yi, SHU Zhong-ya (3010)
Estimation of Urban Non-Point Source Pollution Loading and Its Factor Analysis in the Pearl River Delta	LIAO Yi-shan, ZHUO Mu-ning, LI Ding-qiang, <i>et al.</i> (3019)
Transported Fluxes of the Riverine Carbon and Seasonal Variation in Pearl River Basin	ZHANG Lian-kai, QIN Xiao-qun, YANG Hui, <i>et al.</i> (3025)
Characteristics of Nutrient Loss of Lanlingxi Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, XIAO Wen-fa, HUANG Zhi-lin, <i>et al.</i> (3035)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Release Under Inundation from Typical Grass Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Qiu-xia, ZHU Bo, HUA Ke-ke (3043)
Research on the Influence of Mixing Layer Depth on Algal Growth	CHEN Yang, YANG Zheng-jian, HUANG Yu-ling, <i>et al.</i> (3049)
Denitrification Study of <i>Elodea nuttallii</i> -Nitrogen Cycling Bacteria Restoration in Meiliang Bay, Taihu Lake	ZHAO Lin, LI Zheng-kui, ZHOU Tao, <i>et al.</i> (3057)
Influence of Combined Ecological Floating Bed on Nitrogen and Phosphorus Between Overlying Water and Sediment	ZHENG Li-guo, YANG Ren-bin, WANG Hai-ping, <i>et al.</i> (3064)
Effects of Biochar Covering on the Release of Pollutants from Sediment	LI Yang, LI Feng-min, ZHANG Xiu-wen, <i>et al.</i> (3071)
Temporal-spatial Difference of Ecotoxicity and Heavy Metals Pollution in Shima Catchment, Dongguan	GAO Lei, CHEN Jian-yao, KE Zhi-ting, <i>et al.</i> (3079)
Evolution and Pollution of Heavy Metals in Core Sediments from Yamenqi Lake in Lianhuan Lake, China	XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying, GUAN Ying, <i>et al.</i> (3088)
Effect of Constructed Wetland on the Purification of Industrial Zone Rainfall Runoff Contaminated with Phenanthrene	JING Dan-dan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3095)
Removal and Accumulation of the Tetracycline Resistance Gene in Vertical Flow Constructed Wetland	ZHENG Jia-yu, LIU Lin, GAO Da-wen, <i>et al.</i> (3102)
Method for Optimal Sensor Placement in Water Distribution Systems with Nodal Demand Uncertainties	LIU Shu-ming, WU Xue, OUYANG Le-yan (3108)
Formation Process of Nitrogenous Disinfection Byproduct Trichloronitromethane in Drinking Water and Its Influencing Factors	DING Chun-sheng, ZOU Bang-wen, MIAO Jia, <i>et al.</i> (3113)
Removal of Estrogens in Laccase Catalyzed Oxidative Processes	XIA Qing, XIE Wei-ping, LIU Guo-qiang, <i>et al.</i> (3119)
Study on Electrochemical Degradation of Cefazidime by Carbon Nanotubes Electrode	ZHU Hong, HU Xiang, LI Jun-feng (3125)
Photochemical Reaction Types of the Azole Fungicide Fluconazole Under UV-vis Irradiation	GE Lin-ke, LI Kai, YANG Kai, <i>et al.</i> (3132)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Diuron by TiO ₂ and Simulated Sunlight	YANG Hai, ZENG Jian, LI Yuan, <i>et al.</i> (3137)
Adsorption of Congo Red from Aqueous Solution on Hydroxyapatite	ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei (3143)
Ethanol-Induced Influence on the Structure and Arsenate Adsorption of Resin-based Nano-hydrated Ferric Oxide	WAN Qi, LI Xu-chun, PAN Bing-cai (3151)
Chlorination Characteristic and Disinfection By-product Formation Potential of Dissolved Organic Nitrogen Compounds in Municipal Wastewater	LIU Bing, YU Xin, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (3156)
Start-up and Maintenance Method for Short-Cut Advanced Nitrogen Removal Process in a Pilot-Scale Reactor at Low Temperature	GU Sheng-bo, WANG Shu-ying, PENG Yong-zhen (3164)
Study on the Start-Up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process in Biological Activated Carbon Reactor	LAI Wei-yi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing (3171)
Excretion of Manure-Borne Steroid Hormones and Their Potential Risk in the Three Northeast Provinces of China	LIU Shu-fang, LI Yan-xia, ZHANG Xue-lian, <i>et al.</i> (3180)
Spatial Distribution and Composition of Perfluorinated Compounds in Soils Around the Huaihe River	MENG Jing, WANG Tie-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (3188)
Fluorine Speciation and Its Distribution Characteristics in Selected Agricultural Soils of North China Plain	YI Chun-yao, WANG Bing-guo, JIN Meng-gui (3195)
Effects of Long-Term Manure and Crop Residues Incorporation on Yield and Phosphorus Saturation in a Paddy Soil	YAN Xiao, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (3205)
Influence of Organochlorine Pesticides in Wastewater on the Soil Along the Channel	XU Liang, ZHANG Cai-xiang, LIU Min, <i>et al.</i> (3211)
Elution of Endosulfan from Contaminated Soil by Surfactants and Their Combination	XIONG Bai-lian, ZHENG Guo-can, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Different Aspects on Soil Microbial Biomass and Dissolved Organic Carbon of the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, JIANG Yue-li, YAN Hao, <i>et al.</i> (3223)
Effects of Nitrogen Addition on Red Soil Microbes in the <i>Cinnamomum camphora</i> Plantation	YU Pei-yi, ZHU Fan, SU Shao-feng, <i>et al.</i> (3231)
Concentration, Profile Distribution and Source Identification of PCDD/Fs in Environmental Medium Around a HSWI	HUANG Wen, ZHANG Su-kun, DU Guo-yong, <i>et al.</i> (3238)
Assessment of Bioaccessibility of PAHs in Microbial Degradation Process Using Solid Phase Micro Extraction and Solid Phase Extraction	GUO Mei-xia, GONG Zong-qiang, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3244)
Biodegradation of Tetrahydrofuran by Combined Immobilized of <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4	SHAO Qian, YE Jie-xu, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3251)
Analysis on Microbial Community in Biofilm Coating onto Solid Carbon Source Using the PCR-DGGE Technique	XU Ying, QIU Tian-lei, HAN Mei-lin, <i>et al.</i> (3257)
Effect of Temperature on Activity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> and Formation of Biogenic Secondary Iron Minerals	SONG Yong-wei, ZHAO Bo-wen, HUO Min-bo, <i>et al.</i> (3264)
Differences of Selenium Uptake Pattern of Pakchoi and the Possible Mechanism When Amended with Selenate and Selenite	GUO Lu, MAN Nan, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (3272)
Effect of Pretreatment on Storage and Biogas Production of Baling Wheat Straw	MA Hui-juan, CHEN Guang-yin, DU Jing, <i>et al.</i> (3280)
Toxicity of Nitrate-N to Freshwater Aquatic Life and Its Water Quality Criteria	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3286)
Analysis Performance of Biological Toxicity Testing MTOXPlate Using Microplate	LIN Yi-yun, ZHANG Guo-xia, HE Li-ping, <i>et al.</i> (3294)
Study of Combined Effects of DES and EV on the Proliferation of MCF-7 Cells by Two Experimental Designs	LIU Qian, LEI Bing-li, AN Jing, <i>et al.</i> (3303)
Status and Influencing Factors of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Pollution in the Coastal Areas in China	LIU Min-xia, YANG Yu-yi, LI Qing-xiao, <i>et al.</i> (3309)
Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Effluent of Sewage Treatment Plants	ZHENG Shao-kui, LI Xiao-feng (3316)
Research Progress on Biochar Carbon Sequestration Technology	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (3327)
Countermeasures for Strict Water Quality Management of Drinking Water Sources: Some Thoughts and Suggestions on Implementing Strict Water Resources Management	FU Guo-wei (3334)

《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8月15日 34卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 8 Aug. 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

国内外公开发刊