

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

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

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O₃ 生成潜势 曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)

利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态 牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)

沈阳市降水化学成分及来源分析 张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)

秦皇岛大气污染物浓度变化特征 刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)

禽类肉鸡生长过程 NH₃、N₂O、CH₄ 和 CO₂ 的排放 周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)

碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能 王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)

生物滴滤塔净化多组分废气的研究 张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)

在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气 金圣, 黄立维, 李国平 (2121)

模拟大气 CO₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响 赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)

一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法 华祖林, 汪靛 (2134)

HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究 李燕, 李兆富, 席庆 (2139)

基于非点源污染的水质监测方案研究 吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)

不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)

春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征 李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)

三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布 张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)

湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性 冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)

刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响 侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)

反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换 李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)

三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征 李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)

UV 和 H₂O₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究 张一清, 周玲玲, 张吉 (2205)

臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素 于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)

硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响 毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)

炔雌醇氯化反应的动力学和机制研究 王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆隽鹤 (2225)

金属离子对 δ-MnO₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究 李非里, 牟华倩 (2232)

核壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除 刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)

有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究 闫梦玥, 庞志华, 李小明, 张建宇, 罗隽 (2249)

纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征 于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)

改性水凝胶的制备及其对 Pb²⁺、Cd²⁺ 吸附性能研究 吴宁梅, 李正魁 (2263)

直接大红 4BE 的磷钨酸均相催化还原脱色 魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)

基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究 张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)

Fenton 法处理竹制品废水生化出水的研究 郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)

二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响 李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)

进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究 陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)

接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究 刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)

聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究 杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)

体积分数传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析 李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)

我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价 汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)

麦穗鱼物种敏感性评价 王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)

不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究 雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)

桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究 钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)

直流电场处理后降线藻趋光性对 Cl⁻ 和 Hg²⁺ 的响应 王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)

UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响 宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)

7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聃聃 (2361)

溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析 于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)

不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroRespTM 方法 陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)

典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究 陈建刚, 曹雪 (2383)

三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究 刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙昊 (2390)

北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征 陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永锋, 田青 (2399)

季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响 李晓燕 (2407)

东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征 王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)

模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响 段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)

甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究 孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)

胶质芽胞杆菌对印度芥菜根际土壤铜含量及土壤酶活性影响 杨榕, 李博文, 刘微 (2436)

长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征 吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)

有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究 张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)

北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析 王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)

氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟 官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)

焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究 朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛义典 (2473)

富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能 李坤权, 李焯, 郑正, 张雨轩 (2479)

生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估 姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)

基于物质流分析的钾素流动与循环研究 白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)

《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)

生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估

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: 热解制备的生物炭在实现了将植物吸收的大气 CO₂ 封存在土壤中的同时, 还将产生多重农业生产效应. 在调查我国农林废弃物资源可利用潜力的基础上, 利用生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 方法对热解生物炭技术在缓解温室效应方面的潜力进行了初步评估. 研究表明, 我国每年可供生物炭生产的农林生物质资源总量为 6.04×10^8 t; 温室效应净潜力 (以 CO_{2e} 计, CO_{2e} 为 CO₂ 当量) 为 5.32×10^8 t, 相当于每 t 原料可封存 0.88 t. 在整个温室效应潜力中, 贡献最大的是大气 CO₂ 以生物炭形式在土壤中的封存, 约为 73.94%, 其次是副产物可更新能源生产所产生的温室效应潜力, 占总潜力的 23.85%. 由此可见, 以农林废弃生物质资源为原料热解制备生物炭的技术对于缓解我国严峻的温室气体排放压力具有巨大的潜力.

关键词: 生物炭; 农林生物质资源; 温室效应潜力; 土壤封存; 初步评估; 生命周期评价

中图分类号: X382.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2486-07

Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China

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: The production of biochar by pyrolysis and its application to soil can sequester the CO₂ which was absorbed by plants from atmosphere into soil, in addition it can also bring multiple benefits for agriculture production. On the basis of the available potential survey of the biomass residues from agriculture and forestry section, life cycle assessment was employed to quantify the potential of biochar technology in mitigation of greenhouse gases in our country. The results showed: In China, the amount of available biomass resource was 6.04×10^8 t every year and its net greenhouse effect potential was 5.32×10^8 t CO_{2e} (CO_{2e}: CO₂ equivalent), which was equivalent to 0.88 t CO_{2e} for every ton biomass. The greatest of contributor to the total potential was plant carbon sequestration in soil as the form of biochar which accounts for 73.94%, followed by production of renewable energy and its percentage was 23.85%. In summary, production of biochar from agriculture and forestry biomass residues had a significant potential for our country to struggle with the pressure of greenhouse gas emission.

Key words: biochar; agriculture and forestry biomass resource; greenhouse effect potential; soil sequestration; preliminary assessment; life cycle assessment

随着经济发展过程中煤、石油等化石能源的大量使用和人类活动引起的土地利用方式变化而带来的温室效应压力, 已成为制约我国经济发展的重要因素. 利用可再生资源进行能源生产以取代化石能源的使用是减少温室气体排放的有效途径. 如利用生物质废弃物或者特定能源作物为原料, 通过快速热解等方式生产生物油等可更新能源^[1]. 然而, 面对日益严重的气候问题, 仅仅通过减少温室气体排放是远远不够的, 还需要采取各种措施有效降低现有大气中温室气体的浓度.

生物炭是一种在无氧状态下, 生物质原料经过热解得到的炭化物^[2]. 在无氧、低温 (一般低于 700℃) 的条件下, 使得能量向热量的转化较小, 从而避免了大量的碳逸失^[3]. 生物炭大量的石墨碳结构的存在, 使其在土壤中具有极高的稳定性^[4]. 同时, 其通过和土壤的结合, 能够改善土壤的通透性和

水分保持能力^[5], 提高土壤中养分的利用效率^[6], 改善土壤酸化^[7, 8]. 因此, 生物炭技术被认为是一种双赢的手段, 在实现碳封存的同时还具有改善土壤肥力和增加作物产量等多重效应. 目前我国每年产生大量的废弃生物质资源, 如农业秸秆、林业生产和木材加工业废弃物、家禽家畜粪便、居民有机生活垃圾等. 其中, 以农业秸秆为例, 每年大约生产秸秆约 7 亿 t, 而其中高达 50% 的秸秆被露天焚烧或者遗弃^[9], 可见其资源化利用水平偏低, 同时不当的处理方式, 更容易引起二次环境污染. 因此, 利用废弃生物质资源制备生物炭以及其在土壤中的应

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); 青岛市科技发展计划项目 (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

用,不仅能够提高资源化利用程度,而且在很大程度上能够缓解温室效应所带来的压力。

本研究拟在不改变目前土地利用方式的前提下,利用生命周期评价方法对我国生物炭生产和应用过程中各个环节的 CO_2e (CO_2 当量)平衡状况进行分析,评估其缓解温室效应的潜力,以期为生物炭技术的快速、健康发展提供一些重要的信息。然而,国内外目前对于生物炭生产和应用过程的研究尚还处于起步阶段,还没有成熟的标准化评估体系,部分计算指标只能建立在实验数据的基础上,因此评估结果与实际过程之间会存在一定的差异性。但随着对生物炭研究的不断深入和评估数据的可靠性不断提高,这些差异性将会被不断的消除。

1 材料与方法

1.1 数据来源

在相关计算指标假设值选取方面,本研究直接参考了一些文献中给出的数据或者取多文献中同一资料的平均值;在生物质原料选择方面,尽管文献中可利用的原料来源极其广泛,包括各种农作物残余物、林木生产残余物、食品加工残余物(如甘蔗渣)、家禽粪便、废纸和造纸污泥、城市固体有机废弃物等^[10-13],但考虑到生产成本和生物炭回田等因素,部分原料并不适宜用作生物炭的生产原料^[14]。所以本研究仅将原料的范围限定在农、林生产中所产生的木质纤维素废弃物,其生产指标的计算依据于中国统计年鉴(2011年)。另外,对于生物质原料可利用潜力的计算,遵循以下原则:①只考虑利用目前生产状况下所产生的农、林废弃生物质资源,而不考虑转变粮食作物种植到特定的能源作物或者利用其它土地(如荒草地)以增加原料的供应量;②原料收集而导致的农林业生产模式的改变,不会对原来的生产环境产生危害影响;③生物质原料的收集要避免与其它用途产生竞争(如做饲料用)。据此,通过对生物炭生产及应用各个环节 CO_2e 平衡状况的考察,结合我国农林生物质原料的可利用量潜力,评估我国以农、林生物质废弃物为原料热解生物炭技术的缓解温室效应潜力。

1.2 评估方法

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是一种适宜用来对生物炭生产及应用过程中的 CO_2e 平衡状况进行考察的方法^[15]。因此,本研究采用 LCA 方法,对以我国农、林废弃生物质资源为原料的生物炭生产及应用的缓解温室效应潜力进行了初步评

估。LCA 的目标是对利用我国农、林生物质资源生产生物炭及其应用过程中 CO_2e 平衡状况进行定量化评估。评估的范围主要包括:①原料收集、生物炭生产、生物炭应用和原料、生物炭运输等过程阶段涉及的 CO_2e 平衡状况;②可更新能源副产品、生物炭应用所带来的农业效益对 CO_2e 平衡状况的影响。对于原料的生产,由于所考虑的目标原料都是在正常生产条件下生产的附带产物,因此在原料生产过程所发生的 CO_2e 平衡状况不包括在评估边界内。但是生物炭施用过程所产生的 CO_2e 排放则包括在评估范围内。

2 我国生物质原料来源及可利用潜力

2.1 农业生物质资源

农业生物质资源来源于各种农作物主要产物收获后的残余部分,其生产数量并未作为一个明确的统计指标予以统计。因此,本研究利用了主要农产品的草谷比系数(即农作物残余物和农产品之间的比例系数)来确定农作物残余物的产出总量^[16,17],采用了 Zhou 等^[16]研究中的评估数据。

研究表明,当不低于 15% 的作物秸秆覆盖在土壤表面能够很好的保护土壤免于被侵蚀^[18]。据此,假定谷物类和豆类作物用于保护土壤侵蚀以及收集过程中的损失(5%)占残余物总量的 20%,而对于其它作物假定为 10%^[17]。而对于水稻来说,一般无需其留在田间对土壤起防护等作用^[19],可只考虑收集过程中的损失。另外,部分残余物还被用作家禽饲料和工业用原料等,这部分比例约占总量的 24% 和 3%^[17]。因此,在保证农业生产的可持续性不受损害、不与其它用途产生竞争的前提下,可用于进行生物炭生产的农作物残余物约为: $4.99 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 1)。具体计算过程如下:

$$P_{\text{crop}} = \sum_i P_i \times R_{1i} \times R_{2i} \times (1 - R_{3i}) \quad (1)$$

式中, P_{crop} 为农业生物质原料利用潜力; P_i 为第 i 种农作物的农产品产量; $R_{1i} \sim R_{3i}$ 依次为第 i 种农作物的草谷比系数、可收集系数和其它用途比例。

2.2 林木生物质资源

林木生物质资源是指可用于能源或薪材的森林及其他木质资源,通常包括用于燃料的薪炭林、林业采伐剩余物、木材加工剩余物和经济林种植修剪物等^[20]。对于各类型的林木生物质资源总量的统计,一般是通过不同来源林种的种植面积和存量、各种资源的生产系数以及可收集比例来确

定^[17],各类型林地的存量可用其面积乘上单产(以干重计,用材林和薪炭林为 $3.75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、经济林为 $1.88 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[16]).对于用于燃料的薪炭林,可全部作为生物炭生产原料的来源;对于用材林,约占林木生物量的40%^[20]作为采伐残余物;而根据国家林业局的相关技术规定,在其林木生长过程中也要进行适当间伐.如表2所示的我国林木生

物质资源的来源及其可利用潜力.具体计算过程如公式(2)所示.

$$P_{\text{forest}} = \sum_i P_i \times R_{1i} \times R_{2i} \quad (2)$$

式中, P_{forest} 为林业生物质原料利用潜力; P_i 为第*i*种林木生物质的存量; R_{1i} 、 R_{2i} 分别为第*i*种林木残余物的生产系数和可利用比例.

表1 我国农业生物质残余物总量

Table 1 Amount of biomass residues in agriculture section of China

农作物种类	农产品产量 ^[21] $\times 10^8/\text{t}$	草谷比系数 ^[16]	农作物残余物总量 $\times 10^8/\text{t}$	收集系数	可收集总量 $\times 10^8/\text{t}$	可利用总量 $\times 10^8/\text{t}$
谷物						
水稻	1.95	0.62	1.22	0.95	1.16	0.85
小麦	1.15	1.37	1.57	0.80	1.26	0.92
玉米	1.77	2.00	3.54	0.80	2.84	2.07
其他	0.08	1.37	0.11	0.80	0.09	0.07
豆类	0.19	1.50	0.28	0.80	0.23	0.17
薯类	0.31	0.50	0.16	0.90	0.14	0.10
油料						0.00
花生	0.16	2.00	0.31	0.90	0.28	0.21
油菜籽	0.13	2.00	0.26	0.90	0.24	0.17
其他	0.04	2.00	0.07	0.90	0.06	0.05
甘蔗	1.11	0.10	0.11	0.90	0.10	0.07
棉花	0.06	3.00	0.18	0.90	0.16	0.12
其他	0.13	2.50	0.32	0.90	0.28	0.21
合计	7.08		8.14		6.84	4.99

表2 我国林业生物质残余物总量

Table 2 Amount of biomass residues in forestry section of China

资源种类	来源森林类型	面积 ^[22] $\times 10^8/\text{hm}^2$	存量 $\times 10^8/\text{t}$	生产系数 ^[17]	资源总量 $\times 10^8/\text{t}$	可利用比例 /%	可利用资源总量 $\times 10^8/\text{t}$
薪炭林	薪炭林	0.02	0.07	100%	0.07	100	0.07
木材收获残余物	用材林	0.64	2.41	40%	0.96	30	0.29
木材加工残余物	用材林	0.64	1.44	34.4%	0.50	100	0.50
抚育修剪物	用材林	0.64	—	$0.67 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$	0.43	30	0.13
	经济林	0.20	—	$1 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$	0.20	30	0.06
总计					2.16		1.04

3 生物炭缓解温室效应潜力计算

在生物炭生产和应用的全生命周期过程中,温室效应缓解潜力主要来源于以下几个方面:①植物吸收大气中的C以生物炭形式在土壤中的长期封存;②可更新能源的获得对化石能源的替代所产生的温室气体排放减少;③生物炭提高植物初级生产力而使大气中更多 CO_2 被吸收;④生物炭的应用减少农业化肥的使用量,避免了这一部分化肥生产所发生的温室气体排放;⑤生物炭对土壤氮氧化物排放的抑制.另外,在原料和生物炭的运输过程以及生物炭的播撒过程中也不可避免的存在着能源消耗和温室气体的排放,将会抵消部分所获得潜

力.在进行生物炭缓解温室效应潜力计算之前,首先需对一些基本指标进行相应假设.表3所示的是对一些基本指标的设置和假设值,表4所列的是整个计算过程和结果.

3.1 生物炭生产及其土壤封存

根据 Laird 等^[23]的报道,在慢速热解过程中各个产物之间的分配比例分别为:35%的生物炭、30%的液态生物油和35%的气态生物气(混合气体).同时,在运输过程中还应该考虑原料和生物炭的损失,在这里分别假设为1%和3%^[14].由此计算,每年生物炭的生产潜力为 $2.75 \times 10^8 \text{ t}$,回田总量为 $2.67 \times 10^8 \text{ t}$.研究表明,影响生物炭在土壤中封存的**最大因素是生物炭中不稳定成分所占的比

表 3 相关指标假设

Table 3 Assumption of relevant index

项目	假设值	文献	计算过程编号
生物质原料总量/t	6.03×10^8		(1)
生物炭生产及土壤封存			
原料和生物炭运输损耗/%	1/3	[14]	(2a)、(2b)
生物炭/生物油/生物气产出比例/%	35/30/35	[23]	(3a)、(3b)、(3c)
生物炭 C 含量(占生物炭比重)/%	67.68	[15]	(4)
生物炭 C 稳定系数/%	80	[15]	(5)
C-CO _{2e} 转化系数	3.67		(6)
可更新能源产出及燃煤替代			
生物气热值/MJ·kg ⁻¹	6	[23]	(7)
电力转化系数/%	35	[24]	(8)
燃煤发电 CO _{2e} 排放量/kg·kWh ⁻¹	1.07	[25]	(9)
农业生产效益			
生物炭施用比例/t·hm ⁻²	50	[14]	(10)
施用对象	谷物		(11)
作物生物量提高量/%	10	[7]	(12)
谷物初级生产率/t·hm ⁻²	13.81	[21]	(13)
谷物 C 含量/%	45	[15]	(14)
农业化肥施用量(N/P/K)/kg·hm ⁻²	197.1/51.9/21.8	[26]	(15a)、(15b)、(15c)
农业化肥减少量(N/P/K)/%	10/5/5	[14]	(16a)、(16b)、(16c)
N/P/K 生产 CO _{2e} 排放量/kg	3/0.7/1	[15]	(17a)、(17b)、(17c)
生物炭对 N ₂ O 排放抑制			
N ₂ O 排放量(以 N ₂ O-N 计)/kg·hm ⁻²	2.67	[27]	(18)
N ₂ O 排放抑制率/%	50~85	[24, 28, 29]	(19)
过程温室气体排放			
每单位原料运输能耗/MJ·t ⁻¹	65.5	[30]	(20)
柴油热值/MJ·kg ⁻¹	44	常规数值	(21)
每 kg 柴油 CO _{2e} 排放强度/kg	3.57	[31]	(22)
每 t 生物炭散播 CO _{2e} 排放量/kg	45.32	[31]	(23)

表 4 生物炭缓解温室效应潜力计算

Table 4 Potential of biochar in GHGs effect mitigation

项目	计算过程	结果	计算过程编号
生物炭生产及土壤封存			
生物炭生产量/t	$(1) \times \{1-(2a)\} \times (3a)$	2.09×10^8	(24)
生物炭回田量/t	$(24) \times \{1-(2b)\}$	2.03×10^8	(25)
土壤封存-C/t	$(25) \times (4) \times (5)$	1.10×10^8	(26)
土壤封存-CO _{2e} /t	$(26) \times (6)$	4.03×10^8	(27)
可更新能源产出及燃煤替代			
可更新能源产出/MJ	$(1) \times \{1-(2a)\} \times (3c) \times (7) \times 10\ 000$	1.25×10^{12}	(28)
电力输出量/kWh	$(28) \times (8)/3.6$	0.12×10^{12}	(29)
燃煤替代 CO _{2e} 排放量/t	$(29) \times (9)/1000$	1.30×10^8	(30)
农业生产效益			
受施土地面积/hm ²	$(25)/(10)$	0.04×10^8	(31)
增加产出量/t	$(31) \times (13) \times (12)$	0.06×10^8	(32)
植物固定 CO _{2e} 量/t	$(32) \times (14) \times (6)$	0.09×10^8	(33)
化肥施用减少 CO _{2e} 避免排放量/t	$\{(15a) \times (16a) \times (17a) + (15b) \times (16b) \times (17b) + (15c) \times (16c) \times (17c)\} \times (31)/1000$	0.25×10^6	(34)
BC 对 N ₂ O 排放抑制			
N ₂ O 排放减少量/t	$(31) \times (18) \times (19)/1000$	0.73×10^4	(35)
温室效应量(CO _{2e})/t	$(35) \times 298$	0.02×10^8	(36)
总缓解潜力(CO _{2e})/t	$(27) + (30) + (33) + (34) + (36)$	5.45×10^8	(37)
过程温室气体排放			
原料和 BC 运输 CO _{2e} 排放/t	$\{(1) + (24)\} \times (20) \times (22)/(21)/1000$	0.04×10^8	(38)
BC 散播过程 CO _{2e} 排放/t	$(25) \times (23)/1000$	0.09×10^8	(39)
总排放量(CO _{2e})/t	$(38) + (39)$	0.14×10^8	(40)
温室效应缓解净潜(CO _{2e})/t	$(37)-(40)$	5.32×10^8	

例,其在很大程度上取决于其生产所使用的原料和生产工艺参数^[32],而剩余部分的碳被认为是能够在土壤中保持数百年至上千年^[4]. Roberts 等^[15]认为生物炭中不稳定物质所占比例约为 20%,生物炭中 C 含量为 67.68%. 据此计算,土壤中封存的 C 的总量为 $1.10 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 转化为 CO_{2e} 为 $4.03 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$.

3.2 可更新能源生产

如前所述,在热解过程中将产生 30% 的生物油和 35% 的生物气,均具有一定的热值(生物油和生物气分别为 $17 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[23]). Shackley 等^[33]认为在目前的技术条件下,生物油虽然不能用来进行电力生产,但是可以作为热解过程中的热量所需. 因此,这里假定所有的生物油产生热量用于热解过程,而生物气用来进行电力生产. 如表 4 所示,每年的电力生产值为 $0.12 \times 10^{12} \text{ kWh}$, 每年可避免的 CO_{2e} 排放量为 $1.30 \times 10^8 \text{ t}$.

3.3 农业生产效益

许多研究表明,生物炭能够显著提高农作物的初级生产力^[34~38]. 生物炭影响作物生长的两个重要作用机制是其所产生的石灰效应(石灰效应:即 liming effect,是指土壤中添加生物炭后使土壤酸度降低,pH 升高的效应,能够达到与通过添加石灰等降低土壤酸性同等的效应)和提高土壤持水能力^[7]. 根据 Jeffery 等^[7]对众多研究文献中试验结果的定量化统计分析表明,生物炭可提高农作物生物量的 10%. 如表 4 所示,在假定生物炭的施用比例为 $50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,可施用面积为 $0.04 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 每年可增加作物产量 $0.06 \times 10^8 \text{ t}$, 可固定大气 CO_{2e} $0.09 \times 10^8 \text{ t}$. 另外,生物炭还能够减少农业化肥的使用量^[2],通过生物炭施加到土壤中,每年我国可避免 CO_{2e} 排放量为 $0.25 \times 10^6 \text{ t}$.

3.4 生物炭对 N_2O 排放的抑制

N_2O 是一种高效的温室气体,其温室效应是 CO_2 的 298 倍^[15],而农业生产过程是 N_2O 排放的主要来源,占我国 N_2O 排放总量的 92.47%^[39]. 因此,抑制农业土壤中的 N_2O 的排放,对于缓解我国温室效应具有重要的意义. 生物炭添加到土壤中能够抑制 N_2O 的排放,但对不同原料制备的生物炭在不同的施用比例,以及针对不同的农业土壤 N_2O 排放抑制的效果存在较大差异,变化范围从 50% ~ 85.4%^[24, 28, 29]. 考虑到生物炭对 N_2O 的排放抑制不确定性非常高,因此在本研究中取上述范围值进行计算. 由此计算,每年可减少的 N_2O 排放量为 0.16

$\sim 0.28 \times 10^7 \text{ t CO}_{2e}$. 尽管 N_2O 排放抑制的变化对于 N_2O 的排放减少量具有重要影响,但是从生物炭总体的缓解温室效应潜力来看,其变化对总体的影响很小,因此为便于对总体潜力的考察,本次研究中取该范围的中位数作为生物炭对 N_2O 排放抑制的结果,即 $0.02 \times 10^8 \text{ t CO}_{2e}$, 如表 4 所示.

3.5 生物炭生产及应用过程中温室气体排放

根据刘俊伟等^[30]对装机容量 25 MW 的生物质秸秆直燃发电系统进行的生命周期评价过程可知,使用柴油拖拉机(单位里程油耗为 $35 \text{ L} \cdot 100\text{km}^{-1}$),单车平均运量 8 t,秸秆收集半径为 40 km 的情况下,每 t 秸秆的平均消耗为 65.6 MJ. 由于生产的生物炭还要再回到田里,因此可以假设生物质原料和生物炭运输过程是相同的,由此可计算原料和生物炭运输过程中所需消耗柴油量分别为 $394.96 \times 10^8 \text{ MJ}$ 和 $136.85 \times 10^8 \text{ MJ}$,按照柴油的热值 $44 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,需消耗柴油 $12.09 \times 10^8 \text{ kg}$, CO_{2e} 的排放量为 $0.04 \times 10^8 \text{ t}$.

另外,在生物炭田间播撒过程中也需要产生必要的能耗,产生 CO_{2e} 的排放. 生物炭的田间播撒可以和其它的土壤添加剂的播撒同步进行^[14],因此所需能耗可以参考相关过程的能耗. 根据 West 等^[31]的估算,1 t 生物炭的播撒需要释放 12.35 kg C, 即 45.32 kg CO_{2e} . 因此这一过程的总排放量为 $0.09 \times 10^8 \text{ t CO}_{2e}$.

4 结论与展望

(1)我国农业生产可提供生物质原料的潜力为 $4.99 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,其中主要来源于谷物废弃物,占总量的 78%,林业生产可提供的总量为 $1.04 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 1 和表 2). 在此基础上,热解生物炭技术的减轻温室效应总潜力可达 $5.45 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 4). 其中潜力最大的环节是生物炭在土壤中的封存,可达 $4.03 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,占总潜力的 73.94%;其次是电力生产的燃煤替代所避免的温室气体排放,占总潜力的 23.85%;而农业生产效益和生物炭对 N_2O 排放抑制这两项潜力较小,分别占 1.71% 和 0.37%;温室效应的净潜力能够到达 $5.32 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,相当于我国 2006 年化石燃料排放 CO_2 总量 ($57.5 \times 10^8 \text{ t CO}_{2e}$) 的 9.25%^[40]. 将温室效应潜力的总量指标转化成单位指标,每 t 原料可封存 0.88 t CO_{2e} ,与其它文献中对这一指标计算结果(范围在 $0.7 \sim 1.3$ ^[14, 15])一致. 尽管笔者在本研究中对热解

生物炭技术缓解温室效应潜力所作的评估具有一定的不确定性,但在一定程度上很好的反映了该技术在温室效应和其它农业效益等方面所具有的巨大潜力,为我国合理利用废弃生物质资源缓解温室效应压力提供一条新途径。

(2)然而,在利用农林生物质废弃物热解生物炭系统在缓解我国温室效应压力方面具有较大潜力的同时,未来生物炭技术的发展将不可避免的面临着一些潜在问题。首先,目前生物炭生产及应用技术的研究尚还处于起步阶段,其中还存在的许多不确定因素。由于没有成熟标准化的生物炭生产体系可供参考,本研究评估过程中所使用的假设数据主要来源于文献中的实验资料和专家经验判断,这将不可避免的导致评估结果与未来实际过程产生一定的偏差。其次,随着目前对农林生物质废弃资源多元化利用的加深,生物炭制备原料的收集将面临着与其它众多用途之间的竞争,这无疑将增加生物炭原料的供给成本。因此,在未来的研究中应该加强生物炭技术与其它利用技术之间的对比分析,以提供政策选择依据。另外一个非常重要的方面是经济性问题。假如在不考虑政府政策扶持的条件下,热解生物炭系统是否具有经济性,将是未来吸引投资者最重要的参考因素。但在目前的技术条件下,由于较高的原料收集和热解成本以及较低的 CO_{2e} 交易价格,导致热解生物炭系统潜在的经济效益还不高^[23,30]。生物炭技术应用的经济性问题将是未来面临的一个重要方面。

参考文献:

- [1] Bridgwater A V, Meier D, Radlein D. An overview of fast pyrolysis of biomass[J]. *Organic Geochemistry*, 1999, **30**(12): 1479-1493.
- [2] Lehmann J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, **447**(7141): 143-144.
- [3] 潘根兴, 张阿凤, 邹建文, 等. 农业废弃物生物黑炭转化还田作为低碳农业途径的探讨[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(4): 394-400.
- [4] 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.
- [5] Kammann C I, Linsel S, Gößling J W, *et al.* Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa Willd* and on soil-plant relations[J]. *Plant and Soil*, 2011, **234**(1-2): 195-210.
- [6] Steiner C, Teixeira W G, 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.
- [7] Jeffery S, Verheijen F G A, Van der 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.
- [8] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物质炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(5): 472-476.
- [9] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 等. 中国大陆秸秆露天焚烧的量的估算[J]. *资源科学*, 2006, **28**(1): 9-13.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Duku M H, Gu S, Hagan E B. Biochar production potential in Ghana: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**(8): 3539-3551.
- [13] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, *et al.* Using poultry litter biochars as soil amendments [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, **46**(5): 437-444.
- [14] 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.
- [15] Roberts K G, Gloy B A, Stephen J, *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.
- [16] Zhou X P, Wang F, Hu H W, *et al.* Assessment of sustainable biomass resource for energy use in China [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, **35**(1): 1-11.
- [17] Yang Y L, Zhang P D, Zhang W L, *et al.* Quantitative appraisal and potential analysis for primary biomass resources for energy utilization in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, **14**(9): 3050-3058.
- [18] Arsenault É, Bonn F. Evaluation of soil erosion protective cover by crop residues using vegetation indices and spectral mixture analysis of multispectral and hyperspectral data [J]. *Catena*, 2005, **62**(2-3): 157-172.
- [19] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, *et al.* Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. *Nature Communications*, 2010, **1**(56): 1-9.
- [20] 刘刚, 沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. *自然资源学报*, 2007, **22**(1): 9-19.
- [21] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2011 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2011/indexch.htm>.
- [22] 国家林业局森林资源管理司. 第七次全国森林资源清查及森林资源状况[J]. *林业资源管理*, 2010, (1): 1-8.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 狄向华, 聂祚仁, 左铁镛. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(5): 632-635.
- [26] 闫湘. 我国化肥利用现状与养分资源高效利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 2008. 64-68.
- [27] 张强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC2006 方法对中国农田 N₂O 排放量重新估算[J]. *中国生态农业学报*, 2010, **18**(1): 7-13.
- [28] Singh B, Singh B P, Cowie A L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment [J]. *Soil Research*, 2010, **48**(7): 516-525.
- [29] Wang J Y, Zhang M, Xiong Z Q, *et al.* Effects of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from two paddy soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, **47**(8): 887-896.
- [30] 刘俊伟, 田秉晖, 张培栋, 等. 秸秆直燃发电系统的生命周期评价[J]. *可再生资源*, 2009, **27**(5): 102-106.
- [31] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, **91**(1-3): 217-232.
- [32] Lehmann J, Joseph S. *Biochar for environmental management: Science and technology* [M]. London: Earthscan, 2009. 183-206.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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): 117-128.
- [37] 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.
- [38] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, *et al.* Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles [J]. *Field Crops Research*, 2012, **127**: 153-160.
- [39] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. *农业工程学报*, 2008, **24**(10): 269-273.
- [40] 冯相昭, 邹骥. 中国 CO₂ 排放趋势的经济分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, **18**(3): 43-47.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Hui-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, CAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Hui-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrain the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Posphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototaxial Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHANG Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 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