

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

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

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化

吴昊¹, 张盼月^{1*}, 郭建斌², 吴永杰¹

(1. 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 木质纤维素是地球上最丰富的可再生资源, 食草动物和食木昆虫能高效消化植物中的木质纤维素, 模拟动物消化系统的厌氧消化反应器却达不到相应的效果. 为了更好地理解动物消化机理, 并应用于厌氧消化反应器的设计和运行, 对食草动物和食木昆虫的消化机制以及木质纤维素厌氧消化工艺的发展趋势进行了综述. 动物消化系统的高效消化是其消化道中各种酶的协同作用以及一系列物理和生物化学活动的结果. 强大的预处理过程能有效支持微生物发酵系统, 如反刍动物的反刍、食木昆虫分泌的纤维素酶的催化及食木昆虫其消化道中的碱处理等; 沿消化道形成的氧浓度梯度可能刺激一些微生物的水解活性; 固体停留时间、消化物流动和终产物排除的有序安排, 均能促进动物高效消化木质纤维素. 源于瘤胃的厌氧消化工艺接种了瘤胃中的微生物降解木质纤维素, 但其厌氧反应器内的环境条件对发酵的限制远远大于瘤胃发酵或后肠发酵的情况. 因此, 模拟动物消化机制可以更有效促进厌氧消化工艺降解木质纤维素类固体有机物废物.

关键词: 木质纤维素; 厌氧消化; 瘤胃发酵; 后肠发酵; 反刍动物; 白蚁

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0810-07

Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms

WU Hao¹, ZHANG Pan-yue¹, GUO Jian-bin², WU Yong-jie¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Lignocellulosic material is the most abundant renewable resource in the earth. Herbivores and wood-eating insects are highly effective in the digestion of plant cellulose, while anaerobic digestion process simulating animal alimentary tract still remains inefficient. The digestion mechanisms of herbivores and wood-eating insects and the development of anaerobic digestion processes of lignocellulose were reviewed for better understanding of animal digestion mechanisms and their application in design and operation of the anaerobic digestion reactor. Highly effective digestion of lignocellulosic materials in animal digestive system results from the synergistic effect of various digestive enzymes and a series of physical and biochemical reactions. Microbial fermentation system is strongly supported by powerful pretreatment, such as rumination of ruminants, cellulase catalysis and alkali treatment in digestive tract of wood-eating insects. Oxygen concentration gradient along the digestive tract may stimulate the hydrolytic activity of some microorganisms. In addition, the excellent arrangement of solid retention time, digesta flow and end product discharge enhance the animal digestion of wood cellulose. Although anaerobic digestion processes inoculated with rumen microorganisms based rumen digestion mechanisms were developed to treat lignocellulose, the fermentation was more greatly limited by the environmental conditions in the anaerobic digestion reactors than that in rumen or hindgut. Therefore, the anaerobic digestion processes simulating animal digestion mechanisms can effectively enhance the degradation of wood cellulose and other organic solid wastes.

Key words: lignocellulose; anaerobic digestion; rumen fermentation; hindgut fermentation; ruminant; termite

植物组织的主要结构多糖是纤维素、半纤维素与木质素联系在一起形成的木质纤维素. 由于来源广泛, 木质纤维素生物质逐渐被看作是乙醇发酵和甲烷生产的一个主要原料来源. 迄今为止的所有发酵过程中, 纤维素、半纤维素和木质素的水解一直被认为是限速步骤, 因为纤维素、半纤维素和木质素的结晶结构在一定程度上屏蔽了酶对这些多聚糖的侵蚀^[1]. 在自然界中, 许多动物的肠道微生物可分泌出专门的酶用于协作处理木质纤维素^[2]. 食草哺乳动物通过体内的共生微生物降解木质纤维素, 食木昆虫则主要依靠自身生产的酶(内源性纤维素酶)

进行木质纤维素降解. 通过各种生理机制, 反刍动物胃肠道为共生微生物提供合适的生长环境, 共生微生物则为宿主提供打破多糖的能力, 协同降解植物聚合物, 这些共生微生物包括原核微生物(细菌和古细菌)和真核生物(原生动物和真菌). 研究最多的食木昆虫是白蚁, 它们可以消化木材中74%~99%的木质纤维素. 少量的白蚁和原生动物鞭毛虫共生, 木质纤维素

收稿日期: 2012-04-26; 修订日期: 2012-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178047)

作者简介: 吴昊(1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为固体废物资源化技术, E-mail: wujian193@163.com

* 通讯联系人, E-mail: panyue_zhang@bjfu.edu.cn

的高降解效率源于内源性和原生动物纤维素酶的分别作用; 大多数白蚁肠道中则没有共生原生动物, 木质纤维素的降解主要依靠白蚁本身和细菌产生的纤维素酶^[3~6]. 食木昆虫和草食性哺乳动物(主要是反刍动物)的消化策略已经研究多年, 其主要消化机制有利于木质纤维素类废物的降解, 如纸和纸浆废物、城市固体废弃物等. 与动物消化道相比, 工业厌氧消化反应器中的木质纤维素的生物转化率则比较低^[7]. 食草动物和食木昆虫胃肠道中木质纤维素消化的基本参数是什么? 什么动物消化机制应该应用于厌氧消化反应器? 通过分析食草动物和食木昆虫胃肠道功能, 比较这些系统与目前厌氧消化实践的差异, 可以来理解以上的问题.

1 动物消化木质纤维素

根据纤维素消化所在的肠道部位, 食草动物的木质纤维素消化可分为前肠发酵和后肠发酵. 反刍动物是主要的前肠发酵食草动物, 其专门消化纤维素的部位叫瘤胃. 对于后肠发酵食草动物, 纤维状物质停留和微生物发酵的位置在消化道后部, 即大肠(结肠和盲肠)^[8]. 前肠发酵和后肠发酵中的生化反应(即水解、酸化、产乙酸和产甲烷)和厌氧消化工艺类似, 但是目前只对瘤胃发酵系统进行了深入研究, 并应用于厌氧消化模型, 因为木质纤维素的哺乳动物瘤胃发酵可能比后肠发酵系统更有效. 白蚁的消化系统降解木质纤维素的效果比反刍动物更好. 木质纤维素生物质分解的瘤胃容积产率以测量的挥发性脂肪酸(VFA)产生速率($\text{COD}/V \cdot t$)表示, 大约为 $18 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[9], 传统的厌氧沼气池只有 $6 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[7], 相比之下每只白蚁每天可以消耗 $0.65 \sim 0.84 \text{ mg}$ 有机质, 并且可以吸收同化其质量的 56%, 它相当于潜在的容积产率($\text{COD}/V \cdot t$)超过了 $225 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[9]. 本研究将集中讨论反刍动物和白蚁 2 种动物的消化体系.

1.1 反刍动物瘤胃消化木质纤维素

反刍动物拥有一个强大的胃, 分为 4 个腔室, 即瘤胃(第一胃), 网胃(第二胃), 瓣胃(第三胃)和皱胃(第四胃或真胃), 专门进行植物材料的微生物发酵, 见图 1^[10, 11]. 前 3 个胃(瘤胃-网胃-瓣胃)一起合称为前胃, 是微生物发酵和 VFA 吸收的主要场所. 前胃与皱胃的酸性环境隔离开来, 以满足微生物种群的生存. 瘤胃中的 pH、温度和氧化还原电位等环境条件与典型的厌氧消化过程非常相似, 不同的是, 瘤胃并非完全的厌氧环境, 氧气与食物和唾液一起

有规律地进入瘤胃, 通过打嗝喷出或通过血液扩散. 瘤胃里的气体中, 氧气大约占 1%, 溶解氧通过化学反应和瘤胃壁上附着的兼性厌氧微生物(主要是细菌和原生动物)不断地被消耗^[9].

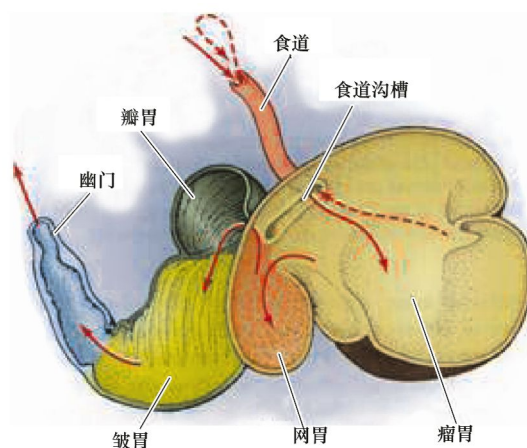


图 1 反刍动物的胃(前肠发酵系统)^[11]

Fig. 1 Stomach of foregut fermenter

瘤胃发酵过程中食糜的流动与目前厌氧消化器中采用的混合不同, 瘤胃发酵的区域化结合了食糜的同质化和分层. 反刍动物的消化始于进入瘤胃之前的咀嚼研磨和吞咽过程中的润湿. 进入瘤胃后, 食糜沉于颅囊里, 经过网胃的收缩, 食糜被发酵液浸没并接种微生物. 食糜通过同样的网胃收缩进行有规律的混合, 大约一分钟一次. 在消化过程中, 饲料颗粒尺寸减小、密度增加, 小而致密的颗粒在回到颅囊前可以沉降到达瘤胃腹囊(瘤胃底部), 在颅囊里则可以通过网胃瓣胃通道疏散进入瓣胃^[9]. 木质纤维材料在瘤胃的停留时间可分为 2 个时期. 发酵期, 可降解材料在网状瘤胃(在网胃顶部和瘤胃背侧)的上半部分循环; 发酵末期, 经过消化的细颗粒散布在网胃下部(网状瘤胃的腹侧和颅囊). 木质纤维材料在前胃停留期间, 在网状瘤胃上部的食糜很可能被涌回和重新咀嚼(反刍). 因此, 在瘤胃发酵过程中的食糜流动比传统的生物反应器中更复杂. 此外, 瘤胃发酵结合了木质纤维素的水解和 VFA 的吸收反应, 瘤胃上皮有效吸收 VFA, 并在水、氮和矿物质代谢的平衡中发挥重要作用^[10], 清除发酵产物 VFA 对纤维素水解微生物的有效活性非常重要.

瘤胃中有大量微生物种群专门消化木质纤维素. 在网状瘤胃中固体停留时间相对较长, 约为 $31 \sim 89 \text{ h}$. 瘤胃呈一个微氧环境, 促进了纤维素酶产生菌、真菌和原生动物的生长, 这反过来又可以促进木质纤维素的水解. 有效的消化运动促进了细颗粒

的沉降,在网胃腹部进行第二阶段发酵,大颗粒则在网胃的上部保持悬浮状态,进行反刍循环.反刍机制是反刍动物消化有效性的本质,这种咀嚼作用与酶和微生物的攻击循环综合在一起,可以将消化后颗粒中的酶和微生物释放出来,然后转移到新的可消化颗粒表面,促进了微生物酶对木质纤维素的降解^[12, 13].

1.2 食木白蚁消化木质纤维素

全世界已知的白蚁有2 000多种.白蚁分为7个科和2个主要亲缘群体,低级白蚁(原生动物宿主)和高级白蚁.白蚁的消化系统包括口腔、食道、唾液腺、前肠(嗉囊和砂囊)、中肠和后肠^[9].

白蚁消化木质纤维素涉及的机制比食草哺乳动物胃肠道中的消化机制更为复杂^[2, 14].白蚁的木材消化系统可分成3个单元:机械研磨系统;酶(纤维素酶和木质素酶)反应室(中肠)结合渗透过滤回收产物(纤维二糖,葡萄糖);以及最后的发酵室(后肠)完成消化生成VFA(74%~99%的纤维素和65%~87%的半纤维素),生成的主要VFA为醋酸,

见图2^[2].因此,与瘤胃发酵不同,白蚁消化木质纤维素贯穿于整个胃肠道系统的几个部分.前肠和中肠是进行机械预处理的位置^[15, 16],唾液腺和中肠上皮细胞是内源性纤维素酶生产的主要场所^[17].后肠的第一个直肠片段是进行碱性处理的位置,其环境pH在10~12之间.纤维素的消化由内源纤维素酶和微生物纤维素酶共同作用,这些微生物可能是低级白蚁中的原生动物或高级白蚁中的真菌和细菌^[14, 18, 19].白蚁纤维素酶的多样性、宿主酶与共生体酶之间的协同作用似乎是最大程度从木质纤维素中释放葡萄糖单元的关键.可能由于胃肠道沿线的氧浓度梯度的刺激催化,内源性酶和微生物酶将氧化降解限制木质纤维素降解的木质素.这些降解木质素的酚氧化酶和脂酶不仅在白蚁消化系统中存在,在几种瘤胃细菌和真菌中也被发现(乳酸杆菌,芽孢杆菌,梭状芽孢杆菌等).这些木质素降解酶与纤维素酶或半纤维素酶协同进行最初的木质纤维素处理,而后续的多糖水解以及迅速进行的单糖发酵则主要在后肠中进行.



图A和B为白蚁消化道的不同区域,O为食管,C为嗉囊,G为胃盲囊,MG为中肠,T为马尔比基氏管,HG为后肠;图C为白蚁的外部形态,箭头指示部分为高度可见的后肠发酵室

图2 北美散白蚁的肠道系统形态特性(后肠发酵系统)^[2]

Fig. 2 Morphology and features of the *R. flavipes* gut

2 动物消化道与厌氧反应器中的微生物群落

原核微生物(细菌和古细菌)和真核微生物(原生动物和真菌)在前肠和后肠发酵中对植物木质纤维素的降解起重要作用^[20].虽然大量的微生物无法驯化鉴定,但许多对生物化学活动起主要作用的微生物已经通过宏基因组和功能分析被鉴定^[5, 20].最著名的是瘤胃微生物,每mL瘤胃液中大约包含 10^{10} 个细菌、 10^6 个纤毛原生动物以及 $10^3 \sim 10^6$ 个可降解纤维素的真菌.从瘤胃中分离出的最活跃的纤维素降解细菌 *Fibrobacter succinogenes* 为革兰氏阴

性菌,属于厚壁菌门的 *Ruminococcus albus* 和 *Ruminococcus flavefaciens* 为革兰氏阳性菌.此外,大量水解发酵产酸菌属于芽孢杆菌、乳酸菌、梭状杆菌、双歧杆菌等属,有助于木质纤维素的瘤胃消化.许多原生动物中的纤毛虫和鞭毛虫种类(*Dasytricha*、*Diplodinium*、*Eodinium*、*Trichomitopsis*)也已经从瘤胃中分离出来^[21].所有瘤胃中的菌类都能以植物原料或代谢中间产物为营养基质生长,从而降解大多数的多糖,如纤维素、淀粉、支链淀粉等.在瘤胃中发现的主要厌氧真菌属于 *Neocallimastix*、*Piromonas* 和 *Sphaeromonas* 等属.这些真菌的假根能

够穿透植物组织,获得营养的方式比细菌和原生动物更有效^[22]。瘤胃发酵的主要功能是提供源于植物多糖的VFA,产甲烷微生物的活动是次要的。但是,产甲烷古菌通过去除产生的 H_2 和 CO_2 促进发酵细菌的生长。这就是为什么在瘤胃中的古菌以食氢产甲烷菌最多(*Methanobacterium*、*Methanobrevibacter*、*Methanomicrobium*),而在厌氧消化反应器中则是食乙酸产甲烷菌占主导地位。一些非纤维素降解微生物在瘤胃发酵中也起到重要作用,因为它们可以为发酵过程创造有利条件,为纤维素降解微生物消除有毒物质并提供生长基质^[9, 23]。

白蚁肠道中的细菌属于未培养的,但宏基因组分析揭示了大量 *Spirochete* 和 *Fibrobacter* 的存在。大多数白蚁肠道中的 *Spirochete* 和 *Fibrobacter* 具有产生纤维素酶和木聚糖酶的基因^[5, 24]。但是,在白蚁共生菌中还没有发现木质素酶的基因^[2, 14]。在低等白蚁如 *Reticulitermes flavipes* 中,真核生物(原虫动物)共生体被认为大大有利于纤维素的消化^[2]。在 *Macrotermite* 亚科中的高等白蚁建立了一个与 *Termitomyces* 属担子菌类真菌组成的外部共生体系,这些外部共生真菌提供碳水化合物酶给白蚁,包括纤维素酶、木聚糖酶和木质素过氧化物酶^[25~28]。

与草食哺乳动物和食木昆虫一样,厌氧消化反应器中的微生物群落也是由属于真核生物、细菌和古菌域的大量不同生物组成。厌氧消化微生物群落主要包括水解和发酵产酸菌(如梭状芽孢杆菌、芽孢杆菌、拟杆菌、弧菌和瘤胃球菌属等)、产乙酸异养菌、食氢产甲烷菌、食乙酸产甲烷菌和硫酸盐还原菌等。厌氧消化反应器中分离出的真核微生物(真菌、酵母和原生动物)在木质纤维素降解中的作用并不清楚^[29]。

降解木质纤维素的微生物附着在植物材料上是瘤胃消化及厌氧沼气池中木质纤维素降解的前提。在瘤胃中,细菌、原生动物和真菌可以在进入瘤胃的植物材料上迅速生长,因此瘤胃中的微生物占据了3个不同的生态区域,即液相、食糜颗粒和肠道黏液。超过75%的瘤胃细菌紧密附着在食糜颗粒和肠道黏液上,瘤胃真菌主要是附在食糜颗粒上,原生动物主要附着在食糜颗粒和肠道黏液上。通过植物组织的气孔和破损处,纤维素降解微生物优先附着在易被消化的内部组织上^[9]。有3种结构似乎对微生物附着发挥了重要作用,即纤维小体(cellulosome)、胞外多糖和纤维素酶结合网络^[30~33]。微生物附着在肠道黏液和食糜颗粒上汇合

了纤维素酶和目标纤维素组织,从而提高了纤维素酶作用效率。此外,微生物附着可以防止微生物被洗出,在消化系统保持较长的停留时间。因此,在瘤胃和厌氧消化器中,微生物的附着是微生物消化木质纤维素最重要的关键步骤。

3 模拟动物消化道的厌氧消化工艺

模拟后肠发酵和前肠发酵的典型理想消化反应器有批式反应器(BR)、连续流搅拌反应器(CSTR)和推流式反应器(PFR,也被称为管式反应器),以及它们单独或连续的组合等^[9, 10, 34, 35]。PFR模拟食糜通过管状容器如盲肠和结肠时的连续流动,在典型的PFR中,反应物在径向方向快速并连续不断地混合,在轴向上的混合幅度并不明显^[36]。理想的PFR并不能完全模拟肠道发酵,因为:①肠道蠕动和反蠕动收缩会引起食糜轴向混合,②分泌物跨越黏液从血液进入瘤胃,③水和营养物质从瘤胃吸收到血液^[36, 37]。因此,有研究人员将PFR改良,将若干个CSTR串联在一起,进料在这些CSTR反应器里沿着每个方向上都快速混合^[9]。PFR改良后,将一系列的水解和吸收反应综合起来。通过实验比较PFR与10个CSTR串联改良的PFR的水解和吸收程度,证明该模式具有更高的稳定性^[36, 37]。瘤胃发酵(前肠发酵)可以看作为一个改良的CSTR反应过程,这一过程也综合了各种水解和吸收反应。然而,瘤胃具有反刍的特点,充分消化的食糜颗粒沉降到腹囊中,而未消化的颗粒则依然悬浮于瘤胃背侧。许多生物反应器采用瘤胃微生物菌群降解木质纤维素,该领域发展的工艺,简单的有批式反应器,复杂的采用连续工作模式,甚至装备半透膜去除VFA等^[7, 38~43]。

将瘤胃发酵原理应用到工业厌氧消化系统中是一个非常具有吸引力的策略,这些厌氧消化过程都与动物生理学和生物环境工程有关,可以在降解木质纤维素废物的同时回收沼气作为可再生能源,其主要目的是提高从纤维素废物产生沼气的效率。瘤胃厌氧序批式反应器(ASBR)是设计得最精致的利用瘤胃微生物的一阶段厌氧消化系统,它的运行原理包括一个4步循环:进料、反应、沉淀、滗水,反应阶段被看作是一个理想的批式反应器,反应物进入反应器后可以瞬间完全混合。瘤胃ASBR反应器中投入瘤胃接种物、2 L的人工唾液和20~30 g·L⁻¹的 α -纤维素,经过1个周期6 h的运行,在纤维素负荷为10 g·(L·h)⁻¹条件下,系统产生的VFA为210

$\sim 230 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 与瘤胃的功能仍然有很大的差异^[44, 45]. 唯一可以将这个发酵系统和瘤胃功能联系起来的是微生物种群. 此外, 发酵循环对维持真核生物(原生动物和厌氧真菌)可能会产生一些影响. 而且, 瘤胃 ASBR 的设计比较复杂, 需要连续的固体物料处理和高固浆液过滤, 使得工艺费用比较昂贵, 很难扩大生产规模.

两阶段的瘤胃派生厌氧消化系统(RUDAD), 是比一阶段工艺更有效的一种工艺^[9]. RUDAD 概念假设一个单一反应器不能同时提供水解和产酸菌、以及产甲烷古菌的最佳条件^[46]. 因此, RUDAD 将 2 个反应器串联起来发挥作用. 水解酸化过程在第一个反应器(瘤胃产酸反应器)中进行, 产酸反应器的流出液则在一个高效产甲烷反应器中产生甲烷. 产酸的瘤胃反应器可以采用一个 CSTR 或 BR. 高效产甲烷反应器可以采用一个上流式厌氧污泥床(UASB)反应器、上流式厌氧过滤器、下行流厌氧过滤器或流化床反应器. 两阶段技术被认为可以: ①增加整个系统的稳定性, ②减小对产甲烷古菌的冲击负荷作用, ③去除或部分去除对产甲烷古菌有毒性的化合物, ④提高沼气中甲烷的含量, 因为大部分二氧化碳在产酸阶段产生. 许多研究都证明 RUDAD 工艺在沼气生产过程中具有很好的稳定性和有效性, 通常系统环境中具有较多真菌, 在整个运行期间都能获得比较稳定和相对高效的转化率, 如 Nair 等^[7]的研究中接种瘤胃微生物的两阶段厌氧反应器的第一阶段最高 VFA 产率达到了 $327 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 比报道的其它序批式厌氧消化反应器的转化效率均高. 某些 RUDAD 工艺已获得发明专利, 在欧洲至少有 4 个工厂使用 RUDAD 专利技术处理市政固体废物^[9]. 为了提高 RUDAD 水解阶段的效果, 经常采用机械预处理和富集瘤胃微生物等手段, 但是, 以挥发性脂肪酸产量计的 RUDAD 系统中的固体降解率约为 $6 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 仍比真正的瘤胃的固体降解率[约 $18 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$]要低很多^[7]. 因此, 产酸阶段仍然是整个发酵系统的限制步骤, 同时产酸阶段流出液的进一步过滤也为 RUDAD 的规模扩大带来了困难. 二阶段 RUDAD 工艺高效回收沼气的有效性目前主要是来自于第二阶段的高效产甲烷反应器, 而不是产酸反应器的作用. 所以, RUDAD 技术的发展仍然需要大力研究反刍动物的消化策略.

4 结论和展望

4.1 结论

草食动物和食木昆虫能够高效消化木质纤维素, 模拟这些动物的消化机制提高木质纤维素厌氧消化的转化效率是极具吸引力的发展方向. 多年来, 研究人员设计了不同的生物反应器, 试图在厌氧消化反应器中实现木质纤维素的瘤胃发酵条件, 但是没有任何系统达到动物消化的效果. 瘤胃消化降解木质纤维素的效率几乎是厌氧反应器的 3 倍, 而多种白蚁对木质纤维素的降解率更高, 凸显了动物消化的高效性. 草食动物和食木昆虫消化木质纤维素的机制不仅包括适宜的环境条件, 如厌氧反应器监测的指标: 氧化还原电位、pH 值、温度等; 发生在前肠和后肠的微生物发酵也仅是动物消化策略的一个方面. 因此, 动物消化不应该仅局限于这些环境条件下发生的微生物相互作用, 还应该包括微生物发酵与其它非微生物处理相结合、反刍机制、酶的协同作用、适宜不同微生物并存的微环境、消化产物的吸收和处理等.

4.2 展望

发展以木质纤维素生物质为原料的厌氧消化反应器不能仅仅简单地模仿瘤胃和后肠中的环境条件, 尝试模拟反刍动物和食木昆虫(如白蚁)的消化策略更为重要. 除前肠和后肠的微生物发酵外, 反刍动物和白蚁的其他消化机制概括如下.

(1) 沿着胃肠道的微生物发酵与其它非微生物处理相结合. 例如反刍提供循环的机械、酶和微生物综合处理. 另一个例子是从白蚁的嘴到后肠之间的消化道中的机械/酶或碱性/酶处理.

(2) 瘤胃中大量的运动将细小食糜颗粒沉降到腹囊中进行最终的微生物发酵, 大食糜颗粒则保留在反刍循环中.

(3) 一系列酶的协同作用用以提高微生物消化的效率, 包括纤维素酶、木聚糖酶、酯酶和木质素酶, 这些酶由真核微生物或由蚀木昆虫自身生产.

(4) 胃肠道沿径向和轴向的氧浓度梯度可能刺激原生动物、真菌和细菌, 进而影响到微生物的水解活性.

(5) 通过吸收不断从瘤胃和后肠去除 VFA 和产甲烷去除氢气, 有利于发酵的进行.

(6) 微生物黏附在上皮细胞或黏液上使其从消化道的食糜颗粒上分离出来, 可以延长微生物在消化道的停留时间; 而黏附在食糜颗粒或纤维上则使微生物易于到达易消化的颗粒表面, 提高水解消化效率.

如上所述, 可以对厌氧消化系统进行如下调整:

循环进行机械/化学预处理和微生物发酵; 分离产酸和产甲烷阶段, 重点优化能够显著改善水解酸化功能的微生物群落和环境条件; 在混合过程中将大的未消化颗粒与充分消化物进行分离; 在水解部分强化原生动物和真菌生物菌落作用; 控制微需氧条件, 刺激原生动物、真菌和水解兼性细菌的生长; 固定部分微生物群落, 促使微生物、固体和液体的停留时间充分分离。总之, 更好地理解动物消化机理, 并应用于厌氧消化反应器的设计和运行, 将会促进厌氧消化工艺更有效地降解木质纤维素类固体有机物废物。

参考文献:

- [1] Sánchez C. Lignocellulosic residues: biodegradation and bioconversion by fungi [J]. *Biotechnology Advances*, 2009, **27** (2): 185-194.
- [2] Scharf M E, Tartar A. Termite digestomes as sources for novel lignocellulases [J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2008, **2** (6): 540-552.
- [3] Arakawa G, Watanabe H, Yamasaki H, *et al.* Purification and molecular cloning of xylanases from the wood-feeding termite, *Coptotermes formosanus shiraki* [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2009, **73** (3): 710-718.
- [4] Tokuda G, Lo N, Watanabe H. Marked variations in patterns of cellulase activity against crystalline-vs. carboxymethyl-cellulose in the digestive systems of diverse, wood-feeding termites [J]. *Physiological Entomology*, 2005, **30** (4): 372-380.
- [5] Warnecke F, Luginbühl P, Ivanova N, *et al.* Metagenomic and functional analysis of hindgut microbiota of a wood-feeding higher termite [J]. *Nature*, 2007, **450** (7169): 560-565.
- [6] Muetzel S, Lawrence P, Hoffmann E M, *et al.* Evaluation of a stratified continuous rumen incubation system [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2009, **151** (1-2): 32-43.
- [7] Nair S, Kuang Y, Pullammanappallil P. Enhanced degradation of waste grass clippings in one and two stage anaerobic systems [J]. *Environmental Technology*, 2005, **26** (9): 1003-1011.
- [8] Chivers D J, Langer P. The Digestive System in Mammals: Food, Form and Function [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 287-310.
- [9] Bayané A, Guiot S R. Animal digestive strategies versus anaerobic digestion bioprocesses for biogas production from lignocellulosic biomass [J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2011, **10** (1): 43-62.
- [10] Dehority B A. Gastrointestinal tracts of herbivores, particularly the ruminant: Anatomy, physiology and microbial digestion of plants [J]. *Journal of Applied Animal Research*, 2002, **21** (2): 145-160.
- [11] Chaney W R. Why Do Animals Eat the Bark and Wood of Trees and Shrubs? [FNR-203] West Lafayette: Purdue University Cooperative Extension Service, 2003 [EB/OL]. http://www.extension.purdue.edu/extmedia/FNR/?FNR_203.pdf.
- [12] Weimer P J, Russell J B, Muck R E. Lessons from the cow: What the ruminant animal can teach us about consolidated bioprocessing of cellulosic biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100** (21): 5323-5331.
- [13] Hendriks A T W M, Zeeman G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100** (1): 10-18.
- [14] Tartar A, Wheeler M M, Zhou X G, *et al.* Parallel metatranscriptome analyses of host and symbiont gene expression in the gut of the termite *Reticulitermes flavipes* [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2009, **2** (1): 25.
- [15] Watanabe H, Tokuda G. Cellulolytic Systems in Insects [J]. *Annual Review of Entomology*, 2010, **55** (1): 609-632.
- [16] Fujita A, Hojo M, Aoyagi T, *et al.* Details of the digestive system in the midgut of *Coptotermes formosanus* Shiraki [J]. *Journal of Wood Science*, 2010, **56** (3): 222-226.
- [17] Tokuda G, Miyai M, Makiya H, *et al.* Digestive β -glucosidases from the wood-feeding higher termite, *Nasutitermes takasagoensis*: Intestinal distribution, molecular characterization, and alteration in sites of expression [J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2009, **39** (12): 931-937.
- [18] Geib S M, Filley T R, Hatcher P G, *et al.* Lignin degradation in wood-feeding insects [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105** (35): 12932-12937.
- [19] Katsumata K S, Jin Z F, Hori K, *et al.* Structural changes in lignin of tropical woods during digestion by termite, *Cryptotermes brevis* [J]. *Journal of Wood Science*, 2007, **53** (5): 419-426.
- [20] Wiegel J, Maier R J, Adams M W W. Incredible anaerobes: from physiology to genomics to fuels [M]. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2009. 280-288.
- [21] Dehority B A. Physiological characteristics of several rumen protozoa grown *in vitro* with observations on within and among species variation [J]. *European Journal of Protistology*, 2010, **46** (4): 271-279.
- [22] Lee S S, Choi C K, Ahn B H, *et al.* In vitro stimulation of rumen microbial fermentation by a rumen anaerobic fungal culture [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2004, **115** (3-4): 215-226.
- [23] Yamano H, Koike S, Kobayashi Y, *et al.* Phylogenetic analysis of hindgut microbiota in Hokkaido native horses compared to light horses [J]. *Animal Science Journal*, 2008, **79** (2): 234-242.
- [24] Tokuda G, Watanabe H. Hidden cellulases in termites: revision of an old hypothesis [J]. *Biology Letters*, 2007, **3** (3): 336-339.
- [25] Tokuda G, Lo N, Watanabe H, Arakawa G, *et al.* Major alteration of the expression site of endogenous cellulases in members of an apical termite lineage [J]. *Molecular Ecology*, 2004, **13** (10): 3219-3228.
- [26] Hyodo F, Tayasu I, Inoue T, *et al.* Differential role of symbiotic fungi in lignin degradation and food provision for fungus-growing termites (Macrotermitinae: Isoptera) [J]. *Functional Ecology*,

- 2003, **17**(2): 186-193.
- [27] Johjima T, Taprab Y, Noparatnaraporn N, *et al.* Large-scale identification of transcripts expressed in a symbiotic fungus (*Termitomyces*) during plant biomass degradation[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, **73**(1): 195-203.
- [28] Taprab Y, Johjima T, Maeda Y, *et al.* Symbiotic fungi produce laccases potentially involved in phenol degradation in fungus combs of fungus-growing termites in Thailand[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(12): 7696-7704.
- [29] Priya M, Haridas A, Manilal V B. Anaerobic protozoa and their growth in biomethanation systems[J]. Biodegradation, 2008, **19**(2): 179-185.
- [30] Adams J J, Pal G, Jia Z C, *et al.* Mechanism of bacterial cell-surface attachment revealed by the structure of cellulosomal type II cohesin-dockerin complex[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, **103**(2): 305-310.
- [31] Doi R H. Cellulases of mesophilic microorganisms-Cellulosome and noncellulosome producers[C]. In: Wiegel J, Maier R J, Adams M W W. Incredible anaerobes; from physiology to genomics to fuels[M]. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2009. 267-279.
- [32] Wilson D B. Three microbial strategies for plant cell wall degradation[C]. In: Wiegel J, Maier R J, Adams M W W. Incredible anaerobes; from physiology to genomics to fuels[M]. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2009. 289-297.
- [33] Brulc J M, Antonopoulos D A, Miller M E B, *et al.* Gene-centric metagenomics of the fiber-adherent bovine rumen microbiome reveals forage specific glycoside hydrolases[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, **106**(6): 1948-1953.
- [34] Logan J D, Joern A, Wolesensky W. Chemical reactor models of optimal digestion efficiency with constant foraging costs[J]. Ecological Modelling, 2003, **168**(1-2): 25-38.
- [35] Sakaguchi E. Digestive strategies of small hindgut fermenters[J]. Animal Science Journal, 2003, **74**(5): 327-337.
- [36] Jumars P A. Animal guts as ideal chemical reactors; Maximizing absorption rates[J]. American Naturalist, 2000, **155**(4): 527-543.
- [37] Jumars P A. Animal guts as nonideal chemical reactors; Partial mixing and axial variation in absorption kinetics[J]. American Naturalist, 2000, **155**(4): 544-555.
- [38] Cerrato-Sánchez M, Calsamiglia S, Ferret A. Effects of time at suboptimal pH on rumen fermentation in a dual-flow continuous culture system[J]. Journal of Dairy Science, 2007, **90**(3): 1486-1492.
- [39] Hu Z H, Wang G, Yu H Q. Anaerobic degradation of cellulose by rumen microorganisms at various pH values[J]. Biochemical Engineering Journal, 2004, **21**(1): 59-62.
- [40] Hu Z H, Yu H Q, Yue Z B, *et al.* Kinetic analysis of anaerobic digestion of cattail by rumen microbes in a modified UASB reactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2007, **37**(2): 219-225.
- [41] Raizada N, Sonakya V, Dalhoff R, *et al.* Population dynamics of rumen microbes using modern techniques in rumen enhanced solid incubation[J]. Water Science and Technology, 2003, **48**(4): 113-119.
- [42] Seon J, Creuly C, Duchez D, *et al.* Degradation of plant wastes by anaerobic process using rumen bacteria[J]. Water Science and Technology, 2003, **48**(4): 213-216.
- [43] Dalhoff R, Rababah A, Sonakya V, *et al.* Membrane separation to improve degradation of road side grass by rumen enhanced solid incubation[J]. Water Science and Technology, 2003, **48**(4): 163-168.
- [44] Barnes S P, Keller J. Anaerobic rumen SBR for degradation of cellulosic material[J]. Water Science and Technology, 2004, **50**(10): 305-311.
- [45] Barnes S P, Keller J. Cellulosic waste degradation by rumen-enhanced anaerobic digestion[J]. Water Science and Technology, 2003, **48**(4): 155-162.
- [46] Kivaisi A K, Mtila M. Production of biogas from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) (Mart) (Solms) in a two-stage bioreactor[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 1998, **14**(1): 125-131.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> (409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> (416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> (434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> (468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> (476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> (484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> (509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> (517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll-a Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiao, <i>et al.</i> (525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> (532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> (547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> (570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> (576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> (596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> (604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> (629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> (635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> (653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> (662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> (685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> (692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i> (698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> (705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> (712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> (724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> (732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> (740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> (746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> (753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> (760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> (767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> (773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> (789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> (795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i> (804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i> (810)

《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2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 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