

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦(4069)

浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇(4080)

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 闫雨龙,彭林(4086)

某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文(4094)

加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇(4103)

北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 崔彤,李金香,杨妍研,程刚(4110)

西安市人为源大气氨排放清单及特征 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟(4117)

佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华(4124)

天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧(4133)

戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪(4142)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华(4147)

玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武(4156)

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎晨,王圣瑞,张文丽,肖尚斌(4162)

典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征:基于沿岸生态系统分析 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强(4168)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕(4179)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超(4187)

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥(4194)

多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇(4203)

丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏(4212)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 岳冬梅,李洁,肖琳(4220)

氯灭活地下水源中3种优势真菌的效能与机制 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前(4228)

净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧(4235)

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒(4241)

三维有序介孔 Co₃O₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖(4247)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4255)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N₂O 释放的影响 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田(4261)

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强(4268)

基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京(4275)

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良(4282)

中温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 袁砚,朱亮(4289)

生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉(4296)

ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程(4302)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军(4309)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明(4317)

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨(4326)

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 苗迎,孔祥胜(4333)

杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳(4341)

应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 王佳怡,毕二平(4349)

表流湿地细菌群落结构特征 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞(4357)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪(4366)

DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵(4372)

培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强(4380)

1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿(4389)

北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明(4395)

梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强(4402)

几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平(4410)

添加复合吸附剂对土壤吸附非和 Cr(VI) 的影响 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽(4419)

生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英(4428)

集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成(4437)

秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽(4446)

《环境科学》征稿简则(4161) 《环境科学》征订启事(4365) 信息(4123,4132,4409)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥

何晶晶^{1,2}, 王颖¹, 胡洁¹, 吕凡¹, 邵立明²

(1. 同济大学固体废物处理与资源化研究所, 上海 200092; 2. 住房和城乡建设部村镇建设司农村生活垃圾处理技术与培训中心, 上海 200092)

摘要: 本文比较了解蛋白菌——地衣芽孢杆菌在不同接种比(0.17%、0.66%、1.16%和1.65%,以TS比计)条件下,生物菌剂预水解对剩余污泥液化效果和脱水性能的影响规律。结果表明,以地衣芽孢杆菌为接种物进行生物预处理,可以促进污泥胞内物质的溶出,同时促进污泥中蛋白质的溶出和降解,但污泥的脱水性能会有所劣化。发现地衣芽孢杆菌的接种比为1.16%时,溶解性有机物的累积溶出量达到最大值,而继续提高接种比并不会增加溶解性有机物的累积溶出量;同时,在该接种比下,经过129 h的生物预处理,蛋白质与挥发性固体的比值达到最低,为初始值的72%,表明蛋白质的降解量达到最大值。但经过129 h生物预处理,污泥的模化CST值上升为初始值的2倍左右,经过生物预处理后污泥的脱水性能劣化。

关键词: 生物预水解; 地衣芽孢杆菌; 蛋白酶; 消化性能; 脱水性能; 液化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4317-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201604185

Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria

HE Pin-jing^{1,2}, WANG Ying¹, HU Jie¹, LÜ Fan¹, SHAO Li-ming²

(1. Institute of Waste Treatment and Reclamation, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Centre for the Technology Research and Training on Household Waste in Small Towns & Rural Area, Ministry of Housing Urban-Rural Development, Shanghai 200092, China)

Abstract: The performances of biological pre-treatment were compared at different inoculation ratios of *Bacillus licheniformis* (0.17%, 0.66%, 1.16% and 1.65%, TS/TS), in order to evaluate the influence on sludge liquefaction and its dewaterability. The analysis showed that biological pre-treatment by inoculating *Bacillus licheniformis* accelerated the dissolution of intracellular materials and increased the degradation of protein, but the sludge dewaterability deteriorated. When the inoculation ratio of *Bacillus licheniformis* was 1.16%, the cumulative effect of dissolved organic carbon reached its maximum. Keeping increasing the inoculation ratio would not result in any improvement. At an inoculation ratio of 1.16%, the quantity of protein per volatile solid reached the minimum, which was 72% of the initial value, after 129 hours of digestion, which reflected the maximal degradation rate of protein. But at same time, the value of CST of sludge doubled, which indicated the deterioration of sludge dewaterability.

Key words: biological pre-treatment; *Bacillus licheniformis*; protease; digestibility; dewaterability; liquefaction

厌氧消化是污泥处理的主要工艺之一,该工艺过程既可以实现污泥减量化、稳定化、无害化的目的,又可以产生沼气作为燃料。然而,污泥厌氧消化也存在停留时间长(20~30 d)、有机物降解率低(30%~50%)等问题,这些限制因素通常与污泥水解这一限速步骤有关^[1,2]。微生物细胞体占剩余污泥的70%左右,这些细胞会分泌一些由多聚糖、蛋白质、脂肪等聚合物组成的胞外多聚物(extracellular polymer substances, EPS),EPS的存在使污泥絮体处于稳定状态,并降低水解速率,同时也影响了污泥的脱水性能^[3]。因此,打破EPS的裹附、破坏污泥胶团结构使其发生解聚,并裂解裹附其中的微生物细胞体,是提高污泥中有机物降解率和污泥消化效率、改善污泥脱水性能的关键。常用的预处理方法,包括物理法^[4]、化学法^[5]、生物法^[6]或几种方法组合^[7,8],可以破除EPS裹附,改善厌氧消

化性能;其中,低能耗、低污染、更安全的生物预处理方法越来越受到重视。生物预处理方法,主要包括向污泥中投加生物菌剂和直接投加水解酶制剂两种类型。生物菌剂分泌的酶或其它来源的水解酶,能使污泥絮体裂解,且可将难以降解的大分子有机物水解为小分子物质,提高污泥的可生化性^[9]。多种水解酶制剂,如蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶等^[10~12],已被应用于污泥生物预处理过程的研究中。由于生物菌剂比水解酶制剂耐受性更强,且能够持续分泌出多种水解酶,因此,投加生物菌剂的方

收稿日期: 2016-04-23; 修订日期: 2016-06-13

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07303-004-03); 2015年度国家环境保护标准项目(2015-4); 上海市2014年度“科技创新行动计划”技术标准项目(14DZ0501500)

作者简介: 何晶晶(1962~),男,博士,博士生导师,主要研究方向为固体废物处理处置与资源化利用过程、技术和理论, E-mail: solidwaste@tongji.edu.cn

法在实际应用中更具潜能. Lü 等^[13]通过添加可水解纤维素的嗜氢菌 *Clostridium thermocellum* 预处理微藻, 甲烷产量提高了 17% ~ 24%, 同时促进了细胞的裂解和氢气的产生; Zhang 等^[14]通过接种乙酸营养型菌剂 *Acetobacteroides hydrogenigenes* 处理玉米秸秆, 甲烷产量提高了 19% ~ 23%, 同时提高了纤维素和半纤维素的去除率. 上述研究表明, 投加生物菌剂能改善生物质的厌氧消化产沼效率, 但有关生物菌剂预处理与污泥脱水性能和厌氧消化性能的相关性研究, 特别是脱水性能的研究还很有限. 鉴于蛋白质是污泥 EPS 的主要组分^[9], 能分泌蛋白酶的生物菌剂是进行污泥生物预处理的首选. 嗜热型厌氧解蛋白菌剂 *Coprothermobacter proteolyticus*^[15] 已应用到改善污泥沼渣的厌氧消化性能研究中, 嗜热型 *Bacillus licheniformis*^[16,17] 也被发现对于污泥有一定的液化作用. 但是, 由于高温条件本身会对污泥细胞造成破坏^[9,15], 改善污泥的消化性能, 而且高温增加了预处理成本. 因此, 还有待评估生物菌剂常温下的单独作用效果. 本文通过添加具有较强蛋白酶活性的好氧生物菌剂——地衣芽孢杆菌 (*Bacillus licheniformis*), 进行生物预处理, 研究不同接种比条件下, 生物菌剂预处理对后续污泥消化和脱水性能的影响规律.

1 材料与方法

1.1 生物菌剂——地衣芽孢杆菌

本实验所用的地衣芽孢杆菌 (*Bacillus licheniformis* DSMZ 13) 由广东微生物研究所分离纯化保存. 地衣芽孢杆菌为革兰氏阳性需氧菌, 最适生长温度大约为 50℃, 酶分泌的最适温度为 37℃. 在不良环境下会形成芽孢, 以抵抗恶劣环境^[18]. 在生长过程中, 地衣芽孢杆菌可分泌大量蛋白酶等多种胞外酶.

在进行接种之前, 生物菌剂需要活化和扩大培养, 选择最适菌种进行接种. 首先, 用浓度为 75% 的酒精棉擦拭装有纯菌种的安瓿管; 然后, 将安瓿管封口处置于酒精灯火焰上烧热 10 ~ 20 s; 随后, 立即滴一滴无菌水于封口处将安瓿管前端炸开, 用无

菌吸管吸取部分已灭菌的液体培养基 (培养基成分: 蛋白胨 5 g·L⁻¹, 牛肉膏 3 g·L⁻¹, NaCl 5 g·L⁻¹, MnSO₄·H₂O 5 mg·L⁻¹), 将安瓿管内的冻干粉全部溶解; 再将其吸出接种到灭菌后的液体培养基中, 过火后塞上棉花塞, 置于振荡摇床上培养. 培养温度为 35℃, 培养时间为 18 ~ 24 h, 振荡摇床转速 150 r·min⁻¹. 继代培养 2 ~ 3 代后开始进行扩大培养.

扩大培养期间, 将地衣芽孢杆菌按 2% 的体积接种比接种于相同成分的液体培养基中, 置于 35℃ 恒温振荡摇床上培养, 培养温度为 35℃, 培养时间为 18 ~ 24 h. 培养期间, 每隔一段时间取样, 采用分光光度法测定 D_{580} 值^[19] 和蛋白酶浓度, 蛋白酶浓度是根据荧光蛋白酶浓度测试试剂包 (G-biosciences 公司) 提供的测试方法测定. 该试剂包采用异硫氰酸荧光素荧光标记的酪蛋白作为底物, 样品中蛋白酶水解酪蛋白释放含有荧光标记的小分子肽类物质, 在激发波长 485 nm 和发射波长 535 nm 条件下检测荧光强度. 根据地衣芽孢杆菌培养和蛋白酶浓度测试的预实验结果, 确定接种的地衣芽孢杆菌为扩大培养 29 h 后的菌种, 此时菌体总数和胞外蛋白酶浓度均达到最大值.

对确定接种的菌液进行离心, 在 5 000 r·min⁻¹ 下离心 15 min, 弃去上清液, 再将沉淀的菌体用 0.5% 的氯化钠溶液重新悬浮, 去除菌种培养基本底值的影响, 得到配置菌液.

1.2 剩余污泥

本实验所用的剩余污泥取自上海市某污水处理厂的污泥浓缩池, 该厂废水处理采用 A²/O 工艺. 污泥取回后, 先经过 30 min 静置沉淀, 弃去上清液, 再经过 1 mm × 1 mm 的筛网过滤去除杂质, 随后, 再将剩余污泥在 4 270 r·min⁻¹ 下离心 10 min^[20], 弃去上清液, 将沉淀物置于 0.5% 的氯化钠溶液中重新悬浮制成配制剩余污泥. 该配制过程的目的, 是去除剩余污泥上清液本底的溶解性有机物, 而以蛋白质为主的 EPS 并不会在配制过程中被彻底清洗掉. 对该配制剩余污泥进行化学性质测定和元素分析, 结果如表 1 所示.

表 1 配制剩余污泥化学性质和元素分析结果

Table 1 Characteristics and elemental analysis results of the tested sludge

化学性质							元素分析结果		
pH	TS/%	VS/%	凯氏氮/mg·L ⁻¹	氨氮/mg·L ⁻¹	蛋白质/mg·L ⁻¹	模化 CST ¹ /s·L·g ⁻¹	C/%	N/%	H/%
6.29	2.04	0.90	1 116	133.5	6 143	12.5	32.4	5.68	5.49

1) 详见 1.4 节中对于该指标的定义

1.3 实验设计

剩余污泥中温好氧消化预处理装置如图 1 所示. 实验设计反应器为玻璃制成的容积为 1 L 的锥形瓶, 反应器内盛有 800 mL 污泥和地衣芽孢杆菌的混合液. 底部磁力搅拌器和曝气装置保证反应器内溶液混合均匀. 锥形瓶口由橡胶塞封住, 橡胶塞上固定有两根通气管, 一根为出气管, 管口接有 $0.45 \mu\text{m}$ 针孔过滤器防止空气中的气溶胶掉落在反应体系中; 另一个为进气管, 连有空气泵, 经过 $0.45 \mu\text{m}$ 针孔过滤器滤掉空气中的气溶胶等杂质, 然后由流量计控制和监测进气量. 实验过程中的供气流量为 $1.5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 溶液的溶解氧浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

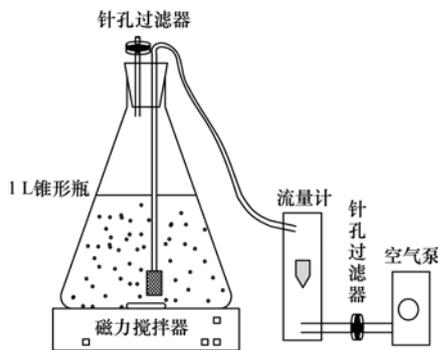


图 1 剩余污泥中温好氧消化预处理装置示意

Fig. 1 Schematic of reactor for the pretreatment of sewage sludge

本实验共设置 5 个工况, 每个工况设置 3 个平行样. 工况 WAS0 为对照工况, 未接种地衣芽孢杆菌. 工况 WAS1、WAS2、WAS3 和 WAS4 分别接种了不同比例的地衣芽孢杆菌配制菌液, 接种比 ($r_{i/s}$, 菌剂与剩余污泥的总固体之比) 分别为: 0.17% 、 0.66% 、 1.16% 和 1.65% .

1.4 测试方法

在消化过程中, 实验初期为每隔 12 h 取样一次, 中期为每隔 24 h 取样一次, 后期为每隔 48 h 取样一次. 污泥样品取出后, 直接测定其 pH 值 (pHS-25 数显 pH 计, 上海精科仪器有限公司), 随后, 采用减重法测定总固体 (TS) 和挥发性固体 (VS), TS 和 VS 测定温度分别为 105°C 和 600°C ; 氨氮和凯式氮采用 Kjeltiec8400A 凯式定氮仪 (丹麦 FOSS 公司) 测定. 污泥样品经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后, 分别测定溶解性有机碳 (DOC)、溶解性氮 (DN) (TOC-Vcpn, 日本 Shimadzu 公司)、氨氮 (Kjeltiec8400A 凯式定氮仪, 丹麦 FOSS 公司), 进行三维荧光光谱 (excitation-emission matrix, EEM) 分析 (F-4500 型三维荧光光谱仪, 日本 Hitachi 公司). 本实验采用模化 CST

(capillary suction time, 毛细吸水时间) 来衡量污泥的脱水性能. 污泥的毛细吸水时间 CST 是指污泥中的毛细水在滤纸上渗透 1cm 所需要的时间, 可通过 CST 测定仪进行测定. 同时, 考虑到受污泥含固率的影响^[21], 将测定的 CST 值除以同一样品的 TS 值以得到模化 CST 值, 来衡量污泥的脱水性能.

2 结果与讨论

2.1 预实验结果

在进行生物预水解之前, 需要通过菌种的活化和扩大培养, 以选择最适菌种进行接种.

首先, 根据测定的菌种活化后得到的菌种浓度, 分别稀释相应的倍数测定其 D_{580} 值, 绘制 D_{580} 菌种浓度标准曲线. 其次, 根据扩大培养菌种时测得的 D_{580} 值, 得到相应的菌种浓度, 并绘制出地衣芽孢杆菌生长曲线, 如图 2 所示. 同时, 根据荧光蛋白酶浓度测试试剂包可制作荧光-蛋白酶浓度标准曲线, 然后, 利用菌种扩大培养时所监测的蛋白酶荧光强度, 求得扩大培养时培养基中的蛋白酶浓度, 进而得到蛋白酶浓度变化曲线 (图 2).

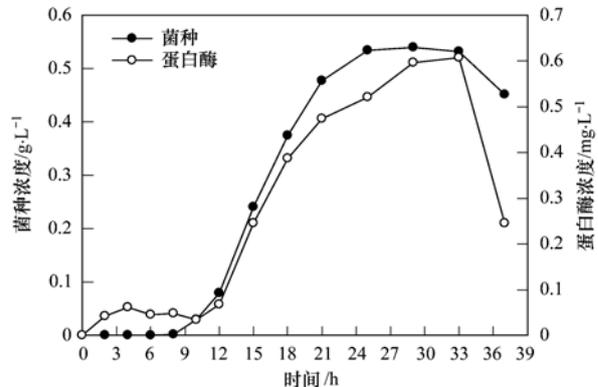


图 2 地衣芽孢杆菌生长曲线和蛋白酶浓度变化曲线

Fig. 2 Growth curve of *Bacillus licheniformis* and protease concentration variation curve

如图 2 所示, 地衣芽孢杆菌在接种后 $0 \sim 8 \text{ h}$ 内, 处于细菌生长的迟滞期, 菌体总量没有明显增加. 在接种后 $8 \sim 25 \text{ h}$ 内, 菌体总量呈几何级数增加, 处于细菌生长的对数期. 接种后 $25 \sim 33 \text{ h}$ 内, 菌体总数变化量很小, 处于细菌生长的稳定期. 而在接种 33 h 后, 菌体总数逐渐下降, 该种地衣芽孢杆菌的生长进入衰退期.

同时, 由图 2 显示, 在接种后 $0 \sim 10 \text{ h}$ 内, 培养基中的蛋白酶浓度一直维持在较低水平, 表明在迟滞期内, 该菌种几乎不分泌胞外蛋白酶. 在接种后 $10 \sim 33 \text{ h}$ 内, 培养基中的蛋白酶浓度不断增加, 表

明该菌种在对数期和稳定期会不断分泌胞外蛋白酶. 在接种 33 h 后,培养基中的蛋白酶浓度迅速下降. 可见,培养基中蛋白酶浓度变化曲线与地衣芽孢杆菌生长曲线的变化趋势基本相似.

因此,在本实验中,接种的地衣芽孢杆菌即为扩大培养 29 h 后的菌种,此时菌体总数和胞外蛋白酶浓度均达到最大值.

2.2 实验结果

2.2.1 污泥液相 DOC 的变化

液相 DOC 反映了地衣芽孢杆菌对污泥中有机物水解程度影响. 如图 3 所示,5 个工况的污泥液相 DOC 值均呈现先下降后上升的趋势. 在培养初期的 20 h 内,DOC 值呈下降趋势,这主要是由于培养初期,添加的地衣芽孢杆菌并未适应环境,在与污泥自身的土著微生物的竞争中没有优势,因而大分子有机物首先被土著微生物水解利用,有机物溶出速率降低,加之实验中的充分曝气使污泥中的部分挥发性有机物被吹脱出来,因而导致 DOC 浓度降低. 培养 20 h 后,5 个工况的污泥上清液 DOC 均呈逐步上升趋势,这时地衣芽孢杆菌已逐渐适应环境,呈现出竞争优势,胞内有机物溶出速率加快. 与对照工况相比,其余 4 个工况的 DOC 值均高于对照工况,可见投加生物菌剂有助于有机物的溶出.

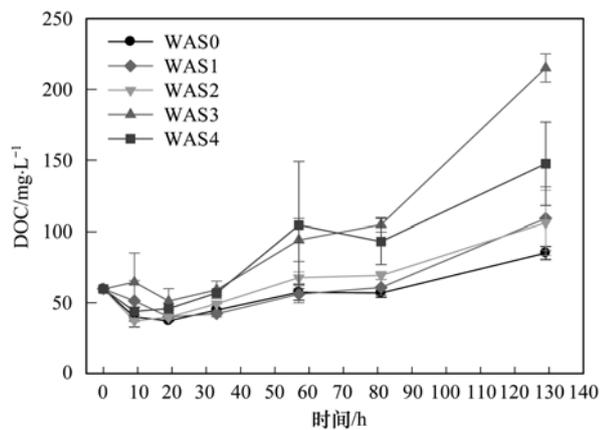


图 3 不同生物菌剂接种比下污泥液相 DOC 随时间的变化趋势
Fig. 3 Temporal evolution of DOC concentrations in the liquid phase under different inoculation ratios

同时,工况 WAS1、WAS2 和 WAS3 的液相 DOC 值,随接种生物菌剂量的增加而依次增大. 培养到 129 h 时,工况 WAS1、WAS2 和 WAS3 的液相 DOC 值比对照工况 WAS0 的液相 DOC 值分别增加了 28%、25% 和 153%. 但对于工况 WAS4,液相 DOC 值却比工况 WAS3 低,培养到 129 h 时,工况 WAS4 的液相 DOC 值比对照工况 WAS0 的液相 DOC 值仅

增加了 74%. 这表明,DOC 值会随接种比的增加而增加,且当接种比为 1.16% (工况 WAS3) 时,DOC 的积累效果达到顶峰,再继续增加生物菌剂的接种量,会由于生物菌剂自身生长繁殖利用了有机物,而使溶出物进一步被降解,则反而会削弱 DOC 的累积效果.

2.2.2 污泥液相溶解性氮、氨氮及污泥絮体氨氮的变化

污泥液相中的氮呈现多种形式,并存在相互转化,但总溶解性氮的含量不会因为相互转化而发生变化. 因此,可以用污泥液相中溶解性氮的含量来表征以蛋白质为主的含氮有机物溶出效果. 在消化过程中,蛋白质在蛋白酶等一系列酶的作用下发生水解和脱氨作用. 因此,污泥液相中的氨氮浓度和污泥絮体中的氨氮浓度可以表征蛋白质的降解效果. 图 4 反映了在消化过程中污泥液相的溶解性氮、污泥絮体和污泥液相中的氨氮浓度变化趋势.

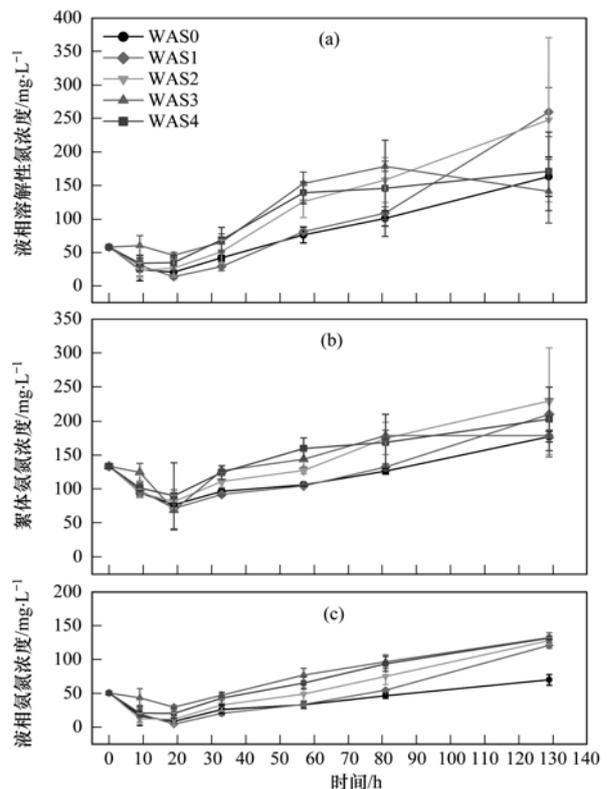


图 4 不同生物菌剂接种比下污泥液相溶解性氮、污泥絮体和污泥液相中氨氮含量随时间的变化趋势

Fig. 4 Temporal evolution of DN concentrations in the liquid phase and ammonium nitrogen concentrations in the liquid and solid phase under different inoculation ratios

由图 4 可以看出,污泥液相溶解性氮含量随时间的变化趋势与液相 DOC 值的变化趋势一致,呈现先下降后上升的趋势. 在培养 20 h 后,对照工况

WAS0 与工况 WAS1、WAS2 和 WAS4 的溶解性氮含量均逐步上升,在培养 129 h 时达到最大值;与对照工况 WAS0 相比,工况 WAS1、WAS2 和 WAS4 的最大溶解性氮含量分别增加了 59%、52% 和 47%。可见接种生物菌剂后,地衣芽孢杆菌分泌的蛋白酶等胞外酶可溶出大量蛋白质,增加了污泥蛋白质的溶出速率和溶出总量。

污泥液相和污泥絮体中的氨氮含量变化趋势均呈现先下降后上升的整体趋势,与液相 DOC 值和总氮值变化趋势相同。在培养 129 h 后,各工况的氨氮浓度均达到最大值,工况 WAS1、WAS2、WAS3 和 WAS4 的污泥液相氨氮浓度分别为对照工况 WAS0 的 1.73、1.83、1.89 和 1.88 倍;其污泥絮体氨氮浓度分别为对照工况的 1.18、1.30、1.01 和 1.15 倍。可见接种菌剂后,地衣芽孢杆菌分泌的多种胞外酶可溶解并水解蛋白质,从而提高了氨氮的产生量和产生速率。随着接种量的增大,蛋白质的降解率随之提高,但经过一段时间培养后,最终的蛋白质降解率基本相同。

2.2.3 污泥蛋白质与 VS 比值的变化

污泥蛋白质与 VS 的比值反映了消化过程中蛋白质的降解程度。由图 5 污泥蛋白质与 VS 比值的变化趋势可以看出,在整个过程中,该比值整体上呈现下降的趋势,并且在培养 129 h 后,5 个工况的污泥蛋白质和 VS 的比值达到最低,从初始时的 $686 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 分别降至 574、555、523、493 和 $567 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,分别为初始值的 84%、81%、76%、72% 和 83%。可见随着生物菌剂添加量的增加,污泥蛋白质的降解量也不断增加,且在接种比为 1.16% (工况 WAS3) 时达到最大。

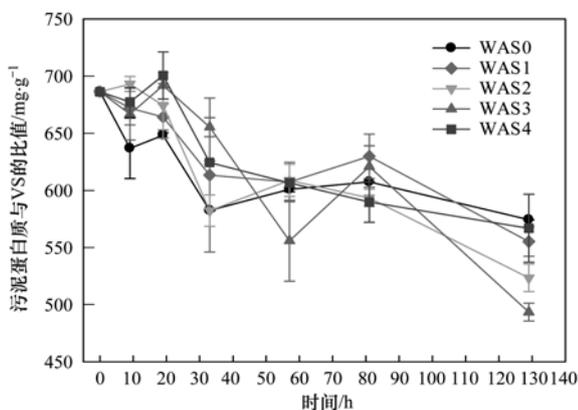


图 5 不同生物菌剂接种比下污泥蛋白质与 VS 比值的变化趋势

Fig. 5 Temporal evolution of protein/VS ratios in the sludge under different inoculation ratios

2.2.4 污泥液相 EEM 的变化

通过 EEM(三维荧光光谱技术)测试,可得到污泥液相中蛋白质类、胡敏酸类和富里酸类有机物的含量。通过 EEM 测试所得的数据,首先需去除瑞利和拉曼散射,使 EEM 光谱图中荧光峰的特征更加明显;再除以该样品的 DOC 值,实现 DOC 归一化^[22,23];然后,绘制激发-发射矩阵图。结果如图 6 所示。

根据 Chen 等^[24]的研究,可将荧光物质所在 EEM 图谱分为 5 个区域,即区域 1 ($E_x < 250 \text{ nm}, E_m < 330 \text{ nm}$) 类络氨酸物质;区域 2 ($E_x < 250 \text{ nm}, 330 \text{ nm} < E_m < 380 \text{ nm}$) 类色氨酸物质;区域 3 ($E_x > 250 \text{ nm}, E_m < 380 \text{ nm}$) 微生物副产物;区域 4 ($E_x < 250 \text{ nm}, E_m > 380 \text{ nm}$) 富里酸类物质;区域 5 ($E_x > 250 \text{ nm}, E_m > 380 \text{ nm}$) 胡敏酸类物质。比激发发射区域体积(Φ)表示该区域内荧光强度值的大小,荧光区域综合指数(fluorescence regional integration, FRI)可以定量表征 EEM 各区域荧光的相对含量。由于区域 1、2 和 3 均可以表征污泥液相中蛋白质类物质的荧光强度,因此对此 3 个区域的荧光强度值进行叠加,以表征蛋白质类物质的总量。图 7 分别表示了污泥液相中单位 DOC 的蛋白质、胡敏酸和富里酸类物质含量的变化趋势。

投加的生物菌剂——地衣芽孢杆菌所分泌的酶类既有溶胞作用,释放出蛋白质,也能降解溶出的蛋白质,污泥液相中单位 DOC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的蛋白质含量是这两种作用的共同结果。由蛋白质类物质的荧光强度变化趋势可以看出,在好氧消化培养的初期 20 h 内,添加生物菌剂的工况比对照工况的蛋白质含量高,表明添加生物菌剂的工况比对照工况的蛋白质溶出速率快,且溶出量大;之后,各个工况的单位 DOC 的蛋白质含量呈现波动趋势,并逐渐趋于平衡,表明蛋白质的溶出速率与分解速率趋于平衡。

通过富里酸和胡敏酸的荧光强度变化趋势可见,好氧消化培养的前 33 h 内,5 个工况的单位 DOC 的富里酸和胡敏酸含量迅速增加;33 h 后,对照工况的富里酸和胡敏酸含量在波动中基本保持平衡,而其余添加生物菌剂工况的富里酸含量呈现明显下降趋势,且工况 WAS3 和 WAS4 的下降幅度明显高于工况 WAS1 和 WAS2。可见,添加地衣芽孢杆菌可促进富里酸类难降解物质的溶出,并且随着培养时间的延长,溶解出来的难降解有机物还会被进一步降解。

2.2.5 污泥 pH 的变化

污泥 pH 主要受酸化过程中生成的有机酸和蛋

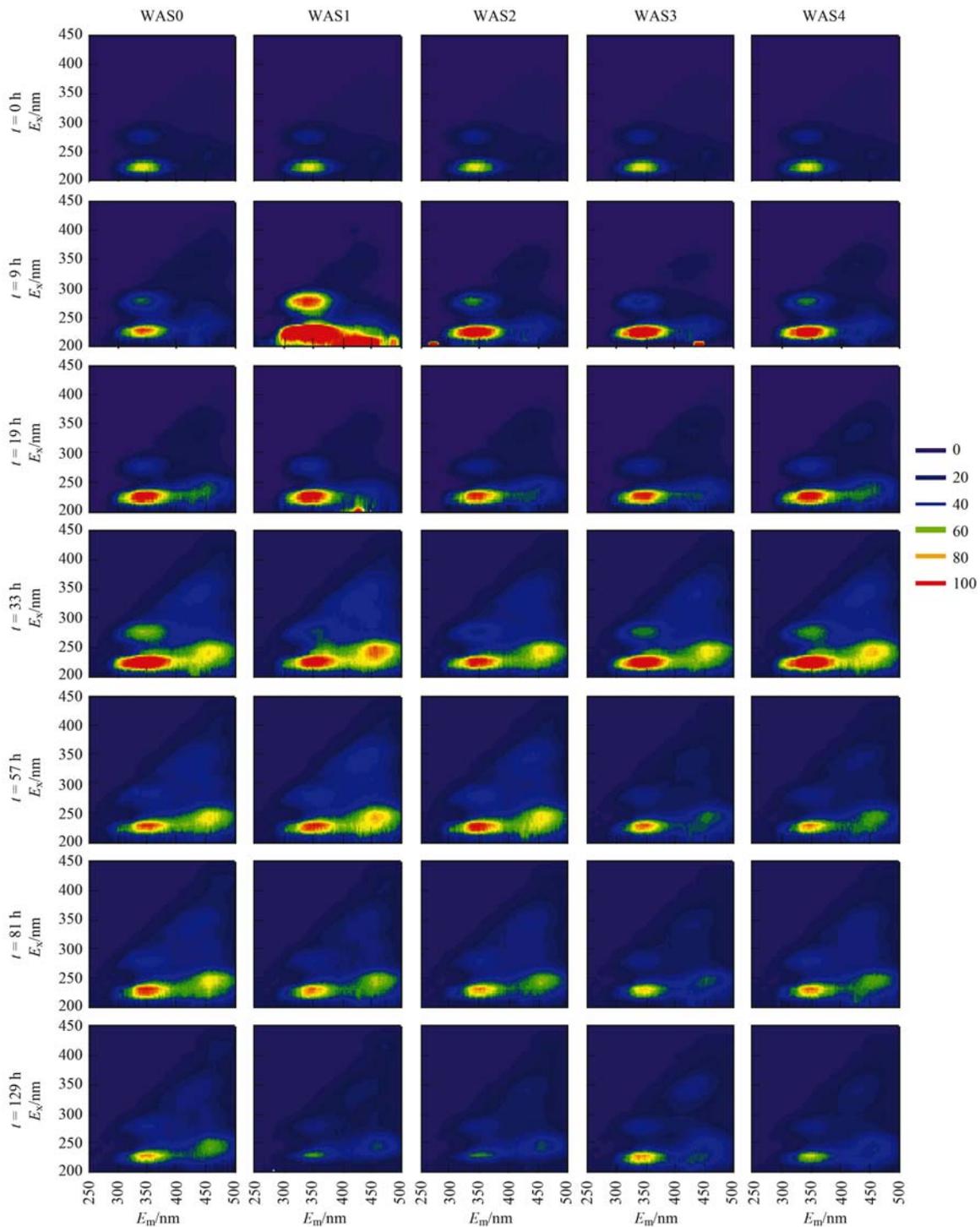


图6 不同生物菌剂接种比下污泥液相 EEM 光谱图

Fig. 6 Fluorescence EEM spectra of liquid phase under different inoculation ratios

白质降解产生的氨氮影响,pH 值的高低可以反映污泥降解的程度. 由图 8 的 pH 变化趋势可以看出,在培养开始的 33 h 内,5 个工况的污泥 pH 值均未发生明显变化,接近中性;在培养 33 h 后,pH 值迅速降低,主要是由于酸化现象导致大分子有机物水解为小分子的有机酸所致. 工况 WAS0、WAS1 和

WAS2 的污泥酸化现象显著,pH 值均在 57 h 后达到最低值,分别为 5.83、5.72 和 5.83;而工况 WAS3 和 WAS4 的污泥酸化程度较低,最低 pH 值分别为 6.21 和 6.31. 这主要是由于工况 WAS3 和 WAS4 的接种比高,导致生物菌剂所分泌的胞外蛋白酶总量高,促进了胞内蛋白质的溶出和降解,产生更多的

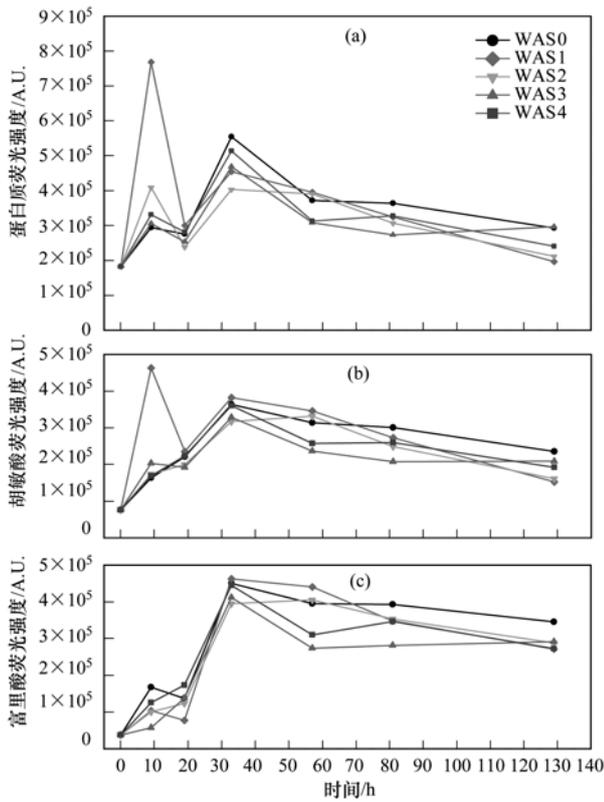


图7 不同生物菌剂接种比下污泥液相蛋白质、胡敏酸和富里酸的荧光强度变化趋势

Fig. 7 Temporal evolution of fluorescence intensity of protein, fulvic acid and humic acid per DOC under different inoculation ratios

氨氮以中和酸化过程中生成的有机酸. 在好氧消化 57 h 后, 5 个工况的 pH 均出现上升趋势, 表示此时氨氮的产生速率已经高于有机酸的产生速率. 可见, 接种一定量的地衣芽孢杆菌可以在一定程度上缓解消化过程中的酸化现象.

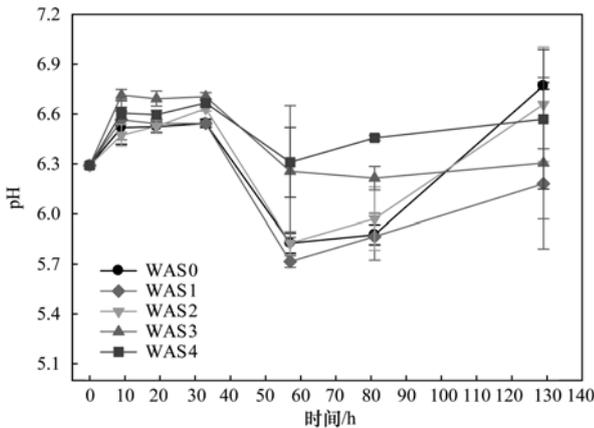


图8 生物菌剂不同接种比下污泥 pH 的变化趋势

Fig. 8 Temporal evolution of pH under different inoculation ratios

2.2.6 生物菌剂的添加对污泥脱水性能的影响

本实验采用模化 CST 值来衡量污泥的脱水性能, 图 9 显示了各工况在消化过程中模化 CST 值的变化趋势. 通过对照工况 WAS0 可以看出, 模化 CST 值随时间的延长而升高, 该现象符合普遍认识, 即污泥经过好氧消化后, 其脱水性能变差. 同时, 其余 4 个工况的模化 CST 值也随着时间的延长而升高, 且高于对照工况. 可见, 投加生物菌剂对污泥的脱水性能有不利影响. 从培养的前 80 h 可以看出, 生物菌剂的接种比越大, 对污泥脱水性能的不利影响越显著. 至培养 129 h 后, 各工况的污泥脱水性能已经基本相似.

能, 图 9 显示了各工况在消化过程中模化 CST 值的变化趋势. 通过对照工况 WAS0 可以看出, 模化 CST 值随时间的延长而升高, 该现象符合普遍认识, 即污泥经过好氧消化后, 其脱水性能变差. 同时, 其余 4 个工况的模化 CST 值也随着时间的延长而升高, 且高于对照工况. 可见, 投加生物菌剂对污泥的脱水性能有不利影响. 从培养的前 80 h 可以看出, 生物菌剂的接种比越大, 对污泥脱水性能的不利影响越显著. 至培养 129 h 后, 各工况的污泥脱水性能已经基本相似.

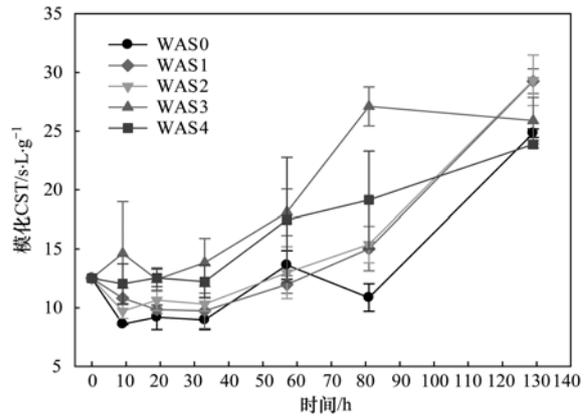


图9 不同生物菌剂接种比下污泥的模化 CST 值的变化趋势

Fig. 9 Temporal evolution of normalized CST under different inoculation ratios

2.3 讨论

剩余污泥生物预水解的实验结果表明, 不同的生物菌剂接种比工况下, 消化速率与反应程度、以及产物的脱水性能都有明显差异. 投加地衣芽孢杆菌有助于胞内物质的溶出, 且可以促进蛋白质和难降解类有机物的溶出和降解. 投加生物菌剂存在最优接种比, 过高的接种比并不会会有显著的促进作用. 本实验中, 在 1.16% 的地衣芽孢杆菌接种比条件下, 胞内物质的溶出效率及蛋白质的降解程度最佳. 同时, 有研究表明, 消化过程中的溶胞现象为污泥脱水性能变差的原因之一^[25]. 在本研究中, 投加地衣芽孢杆菌促进了细胞溶解, 但同时地衣芽孢杆菌本身也会分泌 EPS, 使得污泥的脱水性能进一步变差. 随着预处理时间的延长, 胞内物质的溶出效果显著改善. 通过 DOC 数据的变化趋势可以发现, 在预处理的前 57 h 内, 胞内物质快速溶出, 随后在短时间内不再有明显效果, 直到 129 h 后, 胞内物质才大量溶出. 蛋白质与 VS 比值的变化趋势也有类似特点, 在预处理的初期 33 h 内, 蛋白质被快速降解, 之后在短时间内数值上下波动, 直到 129 h 后, 蛋白质再

次被大量降解. 由本文研究结果可见,采用地衣芽孢杆菌进行生物预处理,从仅改善污泥消化性能的角度来说,最佳预处理时间为 129 h;在时间和经济条件受限,以及综合考虑脱水性能的情况下,则可缩短预处理时间至 33 ~ 57 h.

3 结论

(1)在剩余污泥的消化过程中,以地衣芽孢杆菌为接种物进行生物预处理,会加速胞内物质的溶出,促进溶解性有机碳(DOC)的积累.当接种比为 1.16%时,DOC的累积达到最大值,再继续提高接种比并不会增加DOC的累积量.

(2)接种地衣芽孢杆菌促进了污泥中蛋白质的溶出和降解.与对照工况相比,污泥液相的最大总氮浓度增加了 47% ~ 59%,污泥液相的最大氨氮浓度为对照工况的 1.73 ~ 1.89 倍,污泥絮体的最大氨氮浓度也均高于对照工况.

(3)经过消化培养后,污泥的脱水性能劣化,且以地衣芽孢杆菌为菌剂的生物预水解对脱水性能有不利影响.

参考文献:

- [1] Ge H Q, Jensen P D, Batstone D J. Temperature phased anaerobic digestion increases apparent hydrolysis rate for waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2011, **45**(4): 1597-1606.
- [2] Dwyer J, Starrenburg D, Tait S, *et al.* Decreasing activated sludge thermal hydrolysis temperature reduces product colour, without decreasing degradability [J]. *Water Research*, 2008, **42**(18): 4699-4709.
- [3] Mikkelsen L H, Keiding K. Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to dewatering [J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2451-2462.
- [4] 陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 等. 温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 629-634.
Chen H L, Yan Y Y, He Q B, *et al.* Effects of mild thermal pretreatment on anaerobic digestibility of sludge with low organic content [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 629-634.
- [5] 袁光环, 周兴求, 伍健东. 酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1918-1922.
Yuan G H, Zhou X Q, Wu J D. Enhancement of anaerobic digestion of excess sludge by acid-alkali pretreatment [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(6): 1918-1922.
- [6] 罗琨, 杨麒, 李小明, 等. 外加酶强化剩余污泥水解的研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 763-767.
Luo K, Yang Q, Li X M, *et al.* Enhanced hydrolysis of excess sludge by external enzymes [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(3): 763-767.
- [7] 贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝, 等. 基于微波预处理的酶强化污泥水解酸化研究 [J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(1): 156-165.
Jia R L, Wei Y S, Liu J B, *et al.* Enhancement of enzymatic hydrolysis acidification for sewage sludge pretreated by microwave-H₂O₂-alkaline process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(1): 156-165.
- [8] 刘吉宝, 倪晓棠, 魏源送, 等. 微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3455-3460.
Liu J B, Ni X T, Wei Y S, *et al.* Enhancement for anaerobic digestion of sewage sludge pretreated by microwave and its combined processes [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3455-3460.
- [9] Lü F, Wang J W, Shao L M, *et al.* Enzyme disintegration with spatial resolution reveals different distributions of sludge extracellular polymer substances [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2016, **9**: 29.
- [10] Dursun D, Turkmen M, Abu-Orf M, *et al.* Enhanced sludge conditioning by enzyme pre-treatment: comparison of laboratory and pilot scale dewatering results [J]. *Water Science and Technology*, 2006, **54**(5): 33-41.
- [11] Chen Z, Zhang W J, Wang D S, *et al.* Enhancement of activated sludge dewatering performance by combined composite enzymatic lysis and chemical re-flocculation with inorganic coagulants: kinetics of enzymatic reaction and re-flocculation morphology [J]. *Water Research*, 2015, **83**: 367-376.
- [12] Sesay M L, Özcengiz G, Sanin F D. Enzymatic extraction of activated sludge extracellular polymers and implications on bioflocculation [J]. *Water Research*, 2006, **40**(7): 1359-1366.
- [13] Lü F, Ji J Q, Shao L M, *et al.* Bacterial bioaugmentation for improving methane and hydrogen production from microalgae [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2013, **6**(1): 1-11.
- [14] Zhang J, Guo R B, Qiu Y L, *et al.* Bioaugmentation with an acetate-type fermentation bacterium *Acetobacteroides hydrogenigenes* improves methane production from corn straw [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **179**: 306-313.
- [15] Lü F, Li T S, Wang T F, *et al.* Improvement of sludge digestate biodegradability by thermophilic bioaugmentation [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, **98**(2): 969-977.
- [16] Kavitha S, Stella P B C, Kaliappan S, *et al.* Enhancement of anaerobic degradation of sludge biomass through surfactant-assisted bacterial hydrolysis [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, **99**: 207-215.
- [17] Merrylin J, Kaliappan S, Kumar S A, *et al.* Effect of extracellular polymeric substances on sludge reduction potential of *Bacillus licheniformis* [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2013, **10**(1): 85-92.
- [18] 张菊, 李金敏, 张志焱, 等. 地衣芽孢杆菌的研究进展 [J]. *中国饲料*, 2012, (17): 9-11.
- [19] 赵良启, 戚敬, 郜晋阳. 地衣芽孢杆菌产生碱性蛋白酶的动力学研究 [J]. *生物工程学报*, 1998, **14**(4): 395-400.
Zhao L Q, Qi J, Gao J Y. A kinetic study on the production of alkaline proteinase by *Bacillus licheniformis* 2709 [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 1998, **14**(4): 395-400.
- [20] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Stratification structure of sludge flocs with implications to dewaterability [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(21): 7944-7949.
- [21] Merlo R P, Trussell R S, Hermanowicz S W, *et al.* A

- comparison of the physical, chemical, and biological properties of sludges from a complete-mix activated sludge reactor and a submerged membrane bioreactor [J]. *Water Environment Research*, 2007, **79**(3): 320-328.
- [22] Lu F, Chang C H, Lee D J, *et al.* Dissolved organic matter with multi-peak fluorophores in landfill leachate [J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(4): 575-582.
- [23] Shao L M, Zhang C Y, He P J, *et al.* Comparison of different fluorescence spectrum analysis techniques to characterize humification levels of waste-derived dissolved organic matter [J]. *Environmental Technology*, 2012, **33**(22): 2569-2573.
- [24] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [25] 张峥嵘, 黄少斌, 蒋然等. 单级预热式自动升温高温好氧消化工艺处理剩余活性污泥 [J]. *化工进展*, 2007, **26**(12): 1798-1803.
- Zhang Z R, Huang S B, Jiang R, *et al.* Surplus activated sludge disposal by one-stage preheated autothermal thermophilic aerobic digestion [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2007, **26**(12): 1798-1803.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-rui, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggyery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行