

表面活性剂促进剩余污泥酶水解的研究

于静^{1,3}, 罗琨^{1,3}, 杨麒^{1,3*}, 李小明^{1,2,3}, 谢冰心^{1,3}, 杨国靖^{1,3}, 莫创荣²

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 广西大学环境学院, 南宁 530004; 3. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082)

摘要: 为了提高污泥酶水解的效率, 研究向污泥中投加表面活性剂十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)强化污泥酶水解的效果. 结果表明, SDS 极大促进了剩余污泥酶水解, 且复合酶的处理效果优于单酶. 复合酶的投加量为 0.06 g/g 时, SCOD 溶出率随 SDS 投加量成正比增加. SDS 为 0.20 g/g 时, SCOD/TCOD 从初始污泥的 1.3% 上升到 54.3%, 同时 VSS 去除率显著提高, 最高可达 43.2%. SDS 的加入提高了酶的活性, 当 SDS 为 0.10 g/g 时, 蛋白酶活和淀粉酶活分别是单独加酶组的 2.3 倍和 1.2 倍. 水解过程的前 4 h, SDS + 复合酶组的蛋白质、氨氮和可溶性糖浓度相应地分别提高了 85.4%、92.5% 和 64.0%. 此外, 污泥水解过程的前 4 h 符合一级反应动力学, 速率常数(K)值从空白组的 0.23 增加到 0.41, 说明 SDS + 复合酶的加入使得反应速率明显得到了提高.

关键词: 剩余污泥; 十二烷基硫酸钠(SDS); 外加酶; 水解; 酶活力

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)08-2328-06

Enhanced Enzymatic Hydrolysis of Excess Sludge by Surfactant

YU Jing^{1,3}, LUO Kun^{1,3}, YANG Qi^{1,3}, LI Xiao-ming^{1,2,3}, XIE Bing-xin^{1,3}, YANG Guo-jing^{1,3}, MO Chuang-rong²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Environment, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to enhance the efficiency of enzymatic hydrolysis of excess sludge, sodium dodecyl sulfate (SDS) was added to the system to explore the feasibility of promoting the enzyme hydrolysis. The results showed that the enzymatic hydrolysis of excess sludge could be greatly improved by SDS, and the mixed enzymes system was more effective than that by single enzyme system. SCOD releasing increased linearly with the increase of SDS dosage at the mixed enzymes concentration of 0.06 g/g. SCOD/TCOD increased from 1.3% to 54.3% and VSS reduction achieved to 43.2% at the SDS dosage of 0.20 g/g. Further studies indicated that SDS could improve the activity of external enzymes. At SDS dosage of 0.10 g/g, the protease activity of SDS + protease showed a 2.3-time increase and the amylase activity of SDS + amylase showed a 1.2-time increase compared with enzymatic treatment. After 4 h hydrolysis, the concentration of protein, NH_4^+ -N and soluble sugar in SDS + mixed enzymes system were improved by 85.4%, 92.5% and 64.0%, respectively. Correspondingly, sludge hydrolysis within prior 4 h was consistent with first-order reaction dynamics. The reaction rate constant(K) of soluble sugar increased from 0.23 to 0.41, which indicated that the reaction rate of hydrolysis increased significantly.

Key words: excess sludge; sodium dodecyl sulfate (SDS); external enzyme; hydrolysis; enzyme activity

根据“十一五”规划, 到 2010 年我国全年污泥产量最高将达 570 万 t, 折合湿污泥为 2 850 万 t (按含水率 80% 计算). 外加酶处理剩余污泥是一种经济高效的污泥处理方式^[1], 它能强化污泥水解, 改善污泥消化性能^[2], 其产物对环境也无污染副作用^[3]. 有研究表明, 使用蛋白酶、脂肪酶、内切葡聚糖酶等可显著加快城市污泥的溶解^[4-7], 有效促进剩余污泥的降解和提高甲烷产量^[8], 从而资源化利用污泥.

目前, 通过各种物理化学方法强化剩余污泥酶水解是解决我国城市污水处理厂大量污泥处理问题的有效途径之一. Yu 等^[9]报道指出, 超声波预处理能够提升各种酶的活性, 增加酶与底物的接触机会,

进而提高污泥消化效率. Jiang 等^[10]研究了单独投加表面活性剂提高污泥厌氧消化性能, 同时增加了污泥水解中间产物 VFA 的产量. 由于表面活性剂具有“两亲性”和“增溶作用”, 可以强化污泥水解, 同时还能大幅度提高水解产物在微生物作用下的产酸量. 然而, 有关同时投加酶和表面活性剂来强化污泥水解及其强化机制的研究国内尚鲜有报道. 因此, 本研究以十二烷基硫酸钠(SDS)为例, 考察单独

收稿日期: 2010-09-28; 修订日期: 2010-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078128, 50978088, 51039001); 湖南省科技计划重点项目(2007WK2004, 2009FJ1010); 湖南省科技计划项目(2009WK3048)

作者简介: 于静(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: yujing819@126.com

* 通讯联系人, E-mail: yangqi@hnu.cn

投加酶与同时投加酶 + SDS 对剩余污泥水解的影响,并对其促进污泥酶水解的机制进行了分析,对于污泥酶水解技术的研究和实际运用具有较好的借鉴和参考价值.

1 材料与方法

1.1 主要实验材料和试剂

实验所用剩余污泥取自长沙市第二污水处理厂二沉池污泥,污泥先经过 30 min 沉淀,弃去上清液,再经 0.71 mm 的筛网过滤去除杂质后,于 4℃ 冰箱中保存备用. 其特性如表 1 所示.

表 1 污泥的基本特性
Table 1 Characteristics of excess sludge

指标	pH	TCOD/mg·L ⁻¹	SCOD/mg·L ⁻¹	TSS/g·L ⁻¹	VSS/g·L ⁻¹	蛋白质/mg·L ⁻¹	可溶性糖/mg·L ⁻¹	氨氮/mg·L ⁻¹
数值	6.78	8110	105	8.62	4.95	105	22	19

表 2 酶的基本参数
Table 2 Enzymes used in this experiment

酶	酶活/ U·g ⁻¹	最适 pH	最适温度/℃
中性蛋白酶	6 000	7.0 ~ 7.8	40 左右
α-淀粉酶	3 700	5.5 ~ 7.5	50

1.3 实验方法

取 100 mL 污泥加入 250 mL 具塞锥形瓶中,投加一定量的 SDS 和一定量的外加酶[蛋白酶、淀粉酶或者复合酶,其中复合酶是 m (蛋白酶): m (淀粉酶) = 3:1 组成],然后向锥形瓶中通入氮气约 4 min 以驱除残留空气,加塞置于 50℃ 的水浴振荡器上保持恒温搅拌,4 h 后取样进行分析. 水解反应过程实验取 400 mL 污泥加入到 500 mL 具塞锥形瓶中,设立 3 个对比组,第 1 组只加入复合酶,第 2 组只加 SDS,第 3 组同时加入复合酶和 SDS,其它条件同前,0.5、1、1.5、2、3、4、5、6、8、12 h 后取样分析. 各实验同时设立空白对照组,所有数据均除去加入的物质本身带来的影响,每组实验在相同的条件下重复进行 3 次,且标准偏差 < 5% .

2 结果与分析

2.1 SDS 对污泥酶水解效果的影响分析

设立 3 组实验,每组污泥样品都投加一定量的 SDS,投加量为 0.02、0.05、0.10、0.15、0.20 g/g,然后向 3 组样品中分别加入蛋白酶、淀粉酶和复合酶,控制总酶投加量为 0.06 g/g. 反应 4 h 后,污泥中 SCOD/TCOD、VSS 去除率随 SDS 投加量的变化

实验中选用由 Solarbio 有限公司提供的中性蛋白酶、α-淀粉酶 2 种工业酶(表 2). 实验用 SDS 以及其它试剂均为分析纯.

1.2 分析项目及方法

TSS、VSS 采用称重法测定;TCOD、SCOD 采用标准重铬酸钾法测定,其中 SCOD 是在转速为 10 000 r/min 离心 10 min 后上清液的化学需氧量;上清液中的蛋白质采用 Folin-酚法测定;可溶性糖采用苯酚硫酸法测定;NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法测定;蛋白酶活力采用 Folin-酚试剂比色法测定^[11];淀粉酶活力采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[12].

情况如图 1、2 所示.

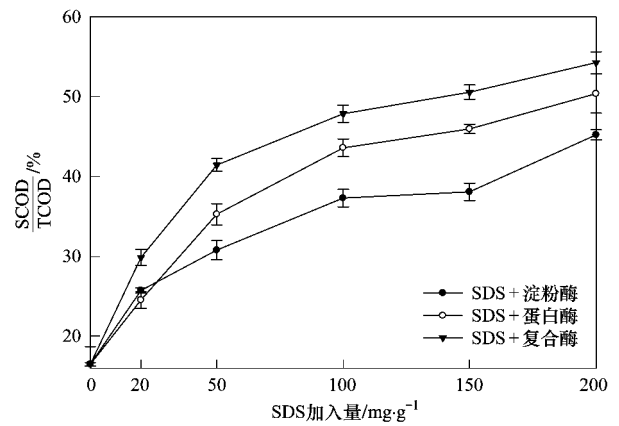


图 1 污泥中的 SCOD/TCOD 随 SDS 投加量的变化
Fig. 1 SCOD/TCOD of sludge with SDS dosage

如图 1 所示,污泥初始 SCOD/TCOD 值仅为 1.3%,反应 4 h 后,空白组 SCOD/TCOD 为 16.5% (图 1 中未显示). 当 SDS 的加入量为 0.20 g/g 时,SDS + 复合酶组的 SCOD/TCOD 达到最大值 54.3%,其次为 SDS + 蛋白酶组的 50.4%、SDS + 淀粉酶组的 45.2%. 在不同的 SDS 投加量下(0.02、0.05、0.1、0.15、0.20 g/g),SDS 和复合酶组合处理时,SCOD 溶出量较空白组增加幅度分别达到 81.1%、151.2%、190.1%、206.5%、228.9%,说明在低剂量条件下,污泥就有较好的水解效果. 随着 SDS 的不断增加,SCOD 增加幅度变缓,但蛋白酶组增加幅度明显大于淀粉酶组. 水解反应中 SCOD 迅速增加的同时,VSS 去除率显著提高,SDS + 复合

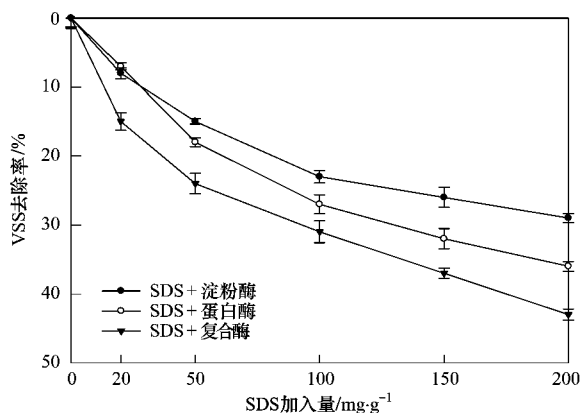


图2 污泥中的 VSS 去除率随 SDS 投加量的变化

Fig.2 Effect of SDS dosage on VSS reduction

酶组最大达到 43.2%。VSS 的减少趋势与 SCOD 的增加趋势基本一致,说明污泥中微生物细胞内的有机质溶出,转化为液相中可溶性有机物。

表面活性剂的“两亲作用”和“增溶作用”促使大量的碳水化合物和蛋白质脱离污泥颗粒表面并溶解到液相中,从而增加了酶与底物接触机会。在酶的催化作用下,污泥固体溶解的同时有机质不断被水解:蛋白质水解生成多肽、二肽、氨基酸,氨基酸进一步通过脱氨作用水解成低分子有机酸、氨及二氧化碳^[13];碳水化合物水解为小分子的多糖甚至单糖。从而提高了 SCOD 的浓度。从 SCOD 的溶出率和节约成本的角度来看,0.10 g/g 为 SDS 的最佳投加量。

污泥酶水解通过多步反应分解高分子物质(蛋白质、多糖、脂肪)。起初酶吸附在污泥基质上,能够对松散的束缚于污泥表面的小分子聚合物进行水解,结构越紧凑的污泥基质其溶解速率越低^[14],因为这限制了酶与污泥絮体中其它底物的接触。在单独投加酶时,水解反应进行到一定程度后,继续提高酶量对水解效果并无显著作用,可以认为酶水解过程中污泥的溶解率取决于酶表面活性中心在污泥基质中的分散程度^[15]。SDS 能够改变污泥的絮体形态,引发污泥絮体皂化从而减小污泥的絮体尺寸^[16],网状絮体结构的破坏有利于外加酶和细胞分泌的胞外酶脱离污泥的表面,均匀分布于污泥中,酶活也不会因为酶被束缚在污泥基质上而受到抑制,从而使酶水解效果得到显著提高。

图 3 反映了在 SDS 最佳投加量时,水解效果随酶投加量的变化情况。实验过程中复合酶水解效果始终优于单酶,这是因为剩余污泥是由许多不同的微生物包埋在聚合物组成的网络中形成的,这些聚

合物就是胞外多聚物(EPS)^[17],其主要组成物是蛋白质和碳水化合物^[18]。而投加单酶只能针对特定的有机物质产生水解效果^[19],同时加入蛋白酶和淀粉酶,可以专性高效水解组成污泥的主要成分。此外,有 SDS 存在的环境下污泥水解效果明显高于单独投加酶,在总酶加入量为 0.06 g/g 时,SDS + 复合酶组、SDS + 蛋白酶组和 SDS + 淀粉酶组的 SCOD/TCOD 相对于相应的单独酶处理分别增加了 80.2%、95.3% 和 61.4%。其中 SDS + 复合酶组外加酶投加量为 0.03 g/g 释放的 SCOD 是单独加酶量为 0.06 g/g 的 1.8 倍,表明少量 SDS 的加入能够减少酶的使用量,且能达到较好的污泥水解效果,从而降低了成本。

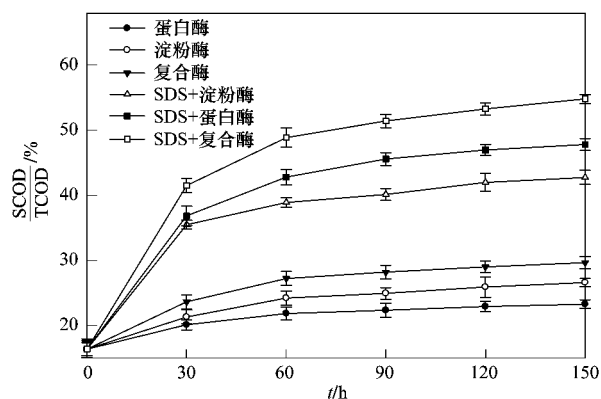


图3 污泥中的 SCOD/TCOD 随酶投加量的变化

Fig.3 SCOD/TCOD of sludge with enzyme dosage

2.2 SDS 对酶活的影响分析

图 4 反映了水解 4 h 后 SDS + 复合酶组与单独加酶组中蛋白酶和淀粉酶的相对酶活性(单独加酶组中 2 种酶活性设为 100%)。由于胞外酶易被截留于污泥基质内部颗粒物中或者吸附固着于污泥表面,从而限制了酶在污泥中的移动^[6]。一些由微生物自身产生的胞外酶主要存在于 EPS 中,表面活性剂的加入加速了 EPS 的溶解,使包埋或隐藏于 EPS 中的酶得到释放,从而使外加酶的稳定性得到了提高或者释放、激活了更多内源性酶^[20]。从反应 4 h 后酶活的变化可以看出,SDS 的投加量从 0.02 g/g 增加到 0.20 g/g,淀粉酶活性提高并不明显,最大为只加酶组的 1.3 倍。而蛋白酶活性提高显著,SDS 为 0.02 g/g 时,SDS + 复合酶组的蛋白酶活就达到了单独加酶组的 1.2 倍,SDS 增加到 0.10 g/g 时,蛋白酶活和淀粉酶活分别是单独加酶组的 2.3 倍和 1.2 倍,再提高 SDS 量,酶活增加幅度变缓。

研究表明 pH 对酶活性有很大的影响,当在本

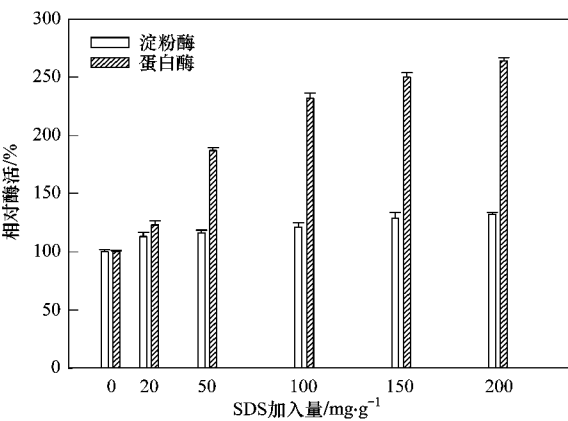


图 4 酶活力随 SDS 投加量的变化
Fig. 4 Variation of enzyme activity with SDS dosage

实验中加入 SDS 后污泥的 pH 与空白组相比变化不大,基本在 7.2 ~ 7.5 之间波动,没有超出蛋白酶和淀粉酶的最适 pH 值,表明实验中酶活的提高不是由于 pH 的变化而主要是投加 SDS 的作用。Dimock 等^[21]认为打破较大的污泥团聚体结构能够提高酶与底物的接触机会。加入表面活性剂促进了胞外蛋白质,碳水化合物和酶由污泥絮凝体内层向外层转移,酶被底物包埋而使酶活不能增加的现象得到控制,酶活性得到提高。

2.3 酶水解反应过程分析

污泥溶解包括 2 个过程:固体物质的溶解和有机物的水解。有机固体物质和无机固体物质都会发生溶解,但有机物的溶解是主要的。溶解性的多糖和蛋白质等大分子有机物在微生物的体外被微生物产生的水解酶或者是外加酶进一步分解为低分子有机物,这一过程反复进行直到水解产物可以被微生物细胞直接吸收同化。实验对污泥酶水解过程中主要溶出性物质浓度变化进行了分析,同时探究了表面活性剂 SDS 对污泥酶水解的强化机制。

污泥水解过程中蛋白质浓度随水解时间的变化如图 5 所示。反应 4 h 后,SDS + 复合酶组的蛋白质溶出较空白组增加了 142.1%, SDS 组增加了 89.2%,而复合酶组只比空白组增加了 31.5%, SDS + 复合酶组比单独加酶组提高了 85.4%。这说明反应初期,SDS 的增溶作用使大量的蛋白质脱离污泥固体,并溶解于液相中。通常污泥中的大分子物质被吸附在污泥的表面,但是 SDS 增溶作用能够使这些大分子溶解并转移至液相^[22]。同时,SDS 对污泥聚合物溶解性的增强有利于打破污泥基质的紧密连接,从而释放出更多的蛋白质和糖类。所以反应初

期蛋白质的释放速率大于降解速率,蛋白质得到积累。随着反应时间的延长,蛋白质不断转化为多肽、二肽、氨基酸、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 等物质,其浓度出现了一定的波动下降趋势,呈现溶出-水解动态平衡现象。

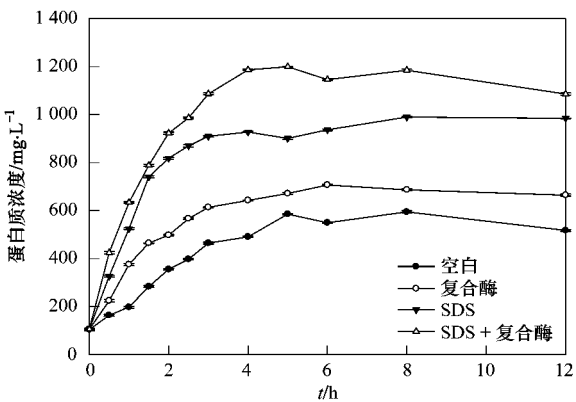


图 5 蛋白质浓度随水解时间的变化
Fig. 5 Variation of soluble protein concentration with hydrolysis time

从图 6 可以看到,反应 4 h 后 SDS + 复合酶组的氨氮浓度比单独加酶组提高了 92.5%。在污泥中蛋白质不断溶出的同时,液相中的氨氮浓度也在不断增加。这说明水解过程中除了溶解作用之外,还发生了一系列化学反应。事实上,蛋白质一方面在溶解,另一方面也在蛋白酶的作用下不断水解,生成多肽、二肽、氨基酸,氨基酸进一步水解成低分子有机酸、氨及二氧化碳^[23],因此氨氮浓度也随之增大。在酶解和热解作用下,细胞内溶出的蛋白质不断水解,其水解程度不仅影响后续的升级 AS 系统的运行负荷,也严重影响着污泥的脱水性能^[24]。加入表面活性剂强化剩余污泥水解有利于改善污泥脱水性能和提高消化气中的甲烷含量,同时还有利于后续酸化阶段短链脂肪酸的积累^[25],大量增加的短链脂肪酸是脱氮除磷微生物的首选碳源^[26],也是合成可生物降解性塑料聚羟基脂肪酸酯的原材料^[27]。

从图 7 可以看到,水解反应的前 4 h 可溶性糖浓度和水解时间呈一级反应关系,一级反应动力学方程为:

$$\ln \frac{c}{c_0} = Kt$$

式中 c 是 t 时刻可溶性糖浓度, c_0 是初始可溶性糖浓度, K 是生成可溶性糖的反应速率常数,从空白组到 SDS + 复合酶组 K 值从 0.23 增加到 0.41,这说明 SDS + 复合酶的加入使得反应速率明显得到了提高(如表 3)。

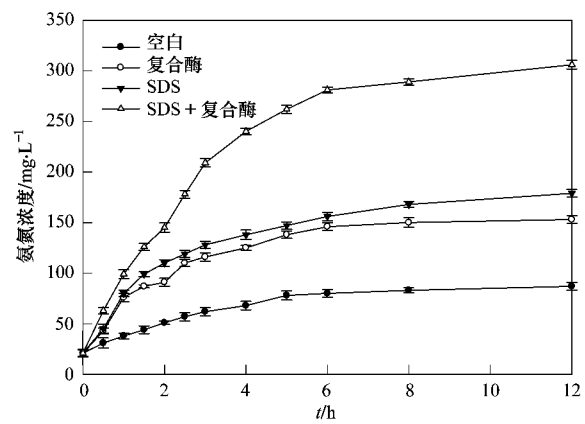


图 6 氨氮浓度随水解时间的变化

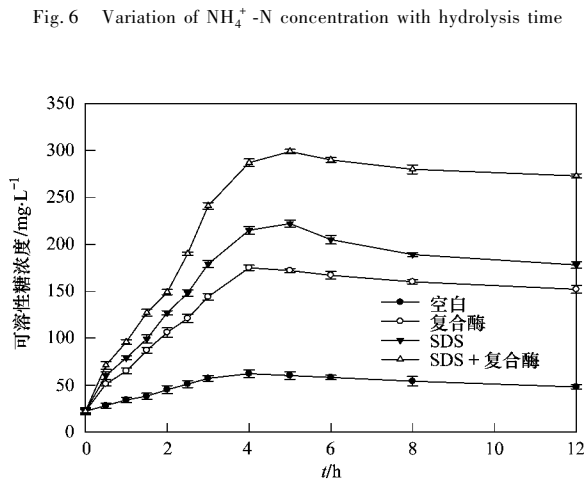


图 7 可溶性糖浓度随水解时间的变化

Fig.7 Variation of soluble carbohydrate concentration with hydrolysis time

表 3 可溶性糖一级反应动力学方程

Table 3 First- order reaction kinetics equation of soluble sugar			
组别	动力学方程	速率常数 K/h^{-1}	相关系数 R^2
空白组	$y=0.2334x+0.1977$	0.23	0.9527
复合酶组	$y=0.3551x+0.7685$	0.36	0.9610
SDS 组	$y=0.3705x+0.9212$	0.37	0.9656
SDS + 复合酶组	$y=0.4065x+1.0765$	0.41	0.9675

SDS 的增溶作用使污泥水解过程中可溶性糖类含量显著增加,反应 4 h 时 SDS + 复合酶组的可溶性糖浓度 287 mg/L,复合酶组为 175 mg/L,前者比后者提高了 64.0%,而空白组仅为 62 mg/L。溶解性的碳水化合物在淀粉酶催化和热水解的共同作用下不断分解成小分子可溶性糖,部分低分子量的中间产物成为能源或碳源又被污泥中的微生物进一步利用,或者进一步被分解成 VFA、CO₂ 和 H₂O,CO₂ 挥发至气相,随着水解反应酶催化活性的降低,糖的

生成速率低于其分解和挥发速率,糖浓度逐渐下降。另外,加入 SDS 后 EPS 溶解形成的反应底物(如蛋白质、还原糖等)浓度增加,一方面使得反应速率提高,另一方面水解过程也相应延长,因此水解达到峰值的时间较单独酶处理稍有延长。

3 结论

(1)SDS 极大促进了剩余污泥酶水解,且复合酶组的处理效果优于单酶组。SCOD/TCOD 从初始污泥的 1.3% 上升到 54.3%,同时 VSS 去除率也显著提高,最高达 43.2%。

(2)SDS 的加入提高了酶的活性,当 SDS 为 0.10 g/g 时,蛋白酶活和淀粉酶活分别是单独加酶组的 2.3 倍和 1.2 倍。

(3)前 4 h 的污泥水解过程符合一级反应动力学,从空白组到 SDS + 复合酶组速率常数 K 值从 0.23 增加到 0.41,这说明 SDS + 复合酶的加入使得反应速率明显得到了提高。

参考文献:

[1] Ronja B. Enzymatic treatment of wastewater sludge in presence of a cation binding agent improved solubilisation and increased methane production [D]. Sweden: Linkopings University, 2008.

[2] Wawrzynczyk J, Recktenwald M, Norrlof O, *et al.* The function of cation-binding agents in the enzymatic treatment of municipal sludge [J]. Water Research, 2008, **42**(6-7): 1555-1562.

[3] Ahuja S K, Ferreira G M, Moreira A R. Utilization of enzymes for environmental applications [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2004, **24**(2-3): 125-154.

[4] Ayol A. Enzymatic treatment effects on dewaterability of anaerobically digested biosolids-I: performance evaluations [J]. Process Biochemistry, 2005, **40**(7): 2427-2434.

[5] Ayol A, Dentel S K. Enzymatic treatment effects on dewaterability of anerobically digested biosolids-II: laboratory characterization of drainability [J]. Process Biochemistry, 2005, **40**(7): 2435-2442.

[6] Roman H J, Burgess J E, Pletschke B I, *et al.* Enzyme treatment to decrease solids and improve digestion of primary sewage sludge [J]. African Journal Biotechnology, 2006, **5**(10): 963-967.

[7] Watson S D, Akhurst T, Whiteley C G, *et al.* Primary sludge floc degradation is accelerated under biosulphidogenic conditions: enzymological aspects [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2004, **34**(6): 595-602.

[8] Lagerkvist A, Chen H. Control of two step anaerobic degradation of municipal solid waste (MSW) by enzyme addition [J]. Water Science and Technology, 1993, **27**(2): 47-56.

[9] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Enzyme activities in

activated sludge flocs [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **77**(3): 605-612.

[10] Jiang S, Chen Y G, Zhou Q, *et al.* Biological short-chain fatty acids (SCFAs) production from waste-activated sludge affected by surfactant [J]. Water Research, 2007, **41**(6-7): 3112-3120.

[11] SB/T 10317-1999, 蛋白酶活力测定法[S].

[12] 胡琼英, 狄浏. 生物化学实验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. 24-26.

[13] Shanableh A, Jomaa S. Production and transformation of volatile fatty acids from sludge subjected to hydrothermal treatment [J]. Water Science and Technology, 2001, **44**(10): 129-135.

[14] Venugopal V, Alur M D, Nerkar D P. Solubilization of fish proteins using immobilized microbial cells [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1989, **33**(9): 1098-1103.

[15] Venugopal V, Alur M D, Nerkar D P. Solubilization of fish proteins using immobilized microbial cells [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1998, **33**(9): 1098-1103.

[16] Liwarska-Bizukoje E, Bizukoje M. Effect of selected anionic surfactants on activated sludge flocs [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, **39**(4): 660-668.

[17] Snaidr J, Amann R, Huber I, *et al.* Phylogenetic analysis and in situ identification of bacteria in activated sludge [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, **63**(7): 2884-2896.

[18] Blackall L L, Burrell P C, Gwilliam H. The use of 16S rDNA clone libraries to describe the microbial diversity of activated sludge communities [J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(4): 451-454.

[19] Zhou J, Wang Y H, Chu J, *et al.* Optimization of cellulase mixture for efficient hydrolysis of steam-exploded corn stover by statistically designed experiments [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(2): 819-825.

[20] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Enzyme extraction by ultrasound from sludge flocs [J]. Journal of Environmental Science, 2009, **21**(2): 204-210.

[21] Dimock R, Morgenroth E. The influence of particle size on microbial hydrolysis of protein particles in activated sludge [J]. Water Research, 2006, **40**(10): 2064-2074.

[22] Mayer A S, Zhong L, Pope G A. Measurement of mass-transfer rates for surfactant-enhanced solubilization of nonaqueous phase liquids [J]. Environmental Science and Technology, 1999, **33**(17): 2965-2972.

[23] Shanableh A, Joma S. Production and transformation of volatile fatty acids from sludge subjected to hydrothermal treatment [J]. Water Science and Technology, 2001, **44**(10): 129-135.

[24] Zhou J P, Mavinic D S, Kelly H G, *et al.* Effects of temperatures and extracellular proteins on dewaterability of the thermophilically digested biosolids [J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2002, **1**(6): 409-415.

[25] Ji Z Y, Cheng G L, Cheng Y G. Effects of waste activated sludge and surfactant addition on primary sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(10): 3457-3462.

[26] Elefsiniotis P, Wareham D G, Smith M O. Use of volatile fatty acids from an acid-phase digester for denitrification [J]. Journal of Biotechnology, 2004, **114**(3): 289-297.

[27] Lemos P C, Serafim L S, Reis M A M. Synthesis of polyhydroxyalkanoates from different short-chain fatty acids by mixed cultures submitted to aerobic dynamic feeding [J]. Journal of Biotechnology, 2006, **122**(2): 226-238.