

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.22.005

酶促污泥原位减量研究现状

林佳琪^{1,2,3}, 姚毅^{1,2,3}, 王龙⁴, 徐宇峰^{1,2,3}, 王敦球^{1,2,3}

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541006; 2. 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 广西生态环保现代产业学院, 广西 桂林 541004; 4. 重庆市计量质量检测研究院, 重庆 401123)

摘要: 生物处理是城市污水处理领域的主流工艺,其在运行过程中会产生大量的剩余污泥,而剩余污泥的处理已经成为环境领域的一大难题。对酶促污泥原位减量进行了综述,认为胞外酶对污泥死亡微生物残留物的水解有推动作用,继而强化了隐性增长型污泥减量;通过对胞外水解酶在污泥絮体中分布的回顾,认为胞外聚合物(EPS)是阻碍酶促污泥原位减量的一个重要原因,因此强化酶促的关键是打破污泥絮体。研究表明,超声、辐射及低温热解等都具有强化酶促功能,除此以外,还有部分强化酶促工艺如酶复合、辐射及反硫化等可以直接提高酶的活性,强化污泥原位减量。

关键词: 污泥减量; 胞外酶; 酶促; 胞外聚合物(EPS); 强化方式

中图分类号: TU993.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)22-0028-07

Current Situation of In-situ Enzymatic Sludge Reduction

LIN Jia-qi^{1,2,3}, YAO Yi^{1,2,3}, WANG Long⁴, XU Yu-feng^{1,2,3}, WANG Dun-qiu^{1,2,3}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin 541004, China; 3. Guangxi Modern Industry College of Ecology and Environmental Protection, Guilin 541004, China; 4. Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing 401123, China)

Abstract: Biotechnology is a mainstream process in the field of urban sewage treatment. During the operation process, a large amount of excess sludge will be generated. The disposal of the excess sludge has become an urgent environmental problem. This article reviews the in-situ reduction of enzymatic sludge, and believes that extracellular enzymes can promote the hydrolysis of dead microbial residues in sludge, and then reinforce the reduction of recessive growth sludge. Based on the review of the distribution of enzymes in sludge flocs, this work suggests that extracellular polymeric substance(EPS) is an important factor that hinders in-situ enzymatic sludge reduction. Thus, the key to enhanced enzymatic production is to break the sludge flocs which could be achieved by existing enzymatic processes such as sonication, radiation, and low-temperature pyrolysis. In addition, some improvement processes such as enzymatic complexing, radiation, and reverse sulfidation can directly increase the activity of the enzyme

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52260019、52260023)

通信作者: 徐宇峰 E-mail: jackstarfly@126.com; 王敦球 E-mail: wangdunqiu@sohu.com

and strengthen the in-situ sludge reduction.

Key words: sludge reduction; extracellular enzyme; enzymatic; EPS; enhanced method

剩余污泥含有大量病原菌、寄生虫卵、病毒及重金属离子等,如不加处理就任意堆放或不当排放,不但会对社会秩序造成严重的损害,还会对生态环境产生二次污染。而传统剩余污泥处理多着眼于焚烧、填埋等末端治理方法,在耗资巨大(占污水处理厂运行费用的25%~60%)的同时,还面临一系列政策、环境和技术问题。因此,污泥的处理与处置已经成为环境领域的一大难题。解决此问题的关键不仅是优化剩余污泥的处理处置技术,更重要的是结合污水处理过程中的污泥原位减量技术进行联合整治。

污泥减量,即在保证污水处理效果的基础上,通过技术手段降低处理等量污水所产生的污泥量。现阶段主流污泥原位减量技术的理论基础主要为溶胞-隐性生长、代谢解偶联和原后生动物捕食^[1-3],大多通过影响微生物生长的三个途径实现:①降低微生物的真实产率;②增加微生物的自身衰亡速率;③强化污泥的自身水解效率。酶是具有催化作用的蛋白质,能够有效水解细菌细胞,降低污泥含固量,促进隐性增长型污泥减量。除此之外,酶还能促进大分子难降解有机物的分解,提高出水水质^[4]。因此,众多学者对酶促污泥原位减量进行了广泛研究,并取得一系列成果。为此,综述近20年在酶促污泥减量方面的成果,对污泥原生酶进行分类整理,概述了酶的位置、作用、影响因素及强化方式,比较全面地介绍了酶的特征,并提出了其规范性和可借鉴之处。

1 活性污泥原生胞外酶的作用

活性较好的污泥主要由活性微生物、活性微生物表面的胞外聚合物(EPS)、吸附在EPS上的微生物氧化残余物、吸附在活性污泥表面的尚未降解或难以降解的有机物和无机物等四部分组成,活性污泥法处理污水的过程实质上就是活性微生物对污染物的降解过程。由于细胞膜的选择通过性,活性污泥中大部分原核微生物及部分真核微生物只能直接利用分子质量<1 000 u的小分子物质,这就决定了微生物对底物的摄取需要在胞外酶的参与下才能完成。

活性污泥的减量离不开胞外酶的参与。活性微生物在外界环境中基质匮乏时,以其自身为底物进行新陈代谢,细胞贮存的有机物会随微生物的生长循环而以二氧化碳的形式进入大气,总碳含量降低,污泥产生量也会随之减少,称之为内源衰减;而在基质匮乏时部分活性污泥中的微生物进入程序化死亡,残留物质在胞外酶的参与下完成水解作用(隐性增长的限速步骤),进而被微生物摄取、利用等。这种微生物靠死亡微生物残留有机物生长的形式为隐性生长(污泥减量的一种方式)。其中死亡微生物残留物质并不能在胞外酶的作用下完成水解是隐性增长的限速步骤,也是关键步骤。

胞外酶是水解的主要作用体,直接决定水解速度的大小。胞外酶是一类由大量混合菌群分泌或释放的包含不同类别的综合酶,其包括蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶等,是污泥絮体解聚、氧化和水解过程的首要作用者,也是大分子有机质降解及转化的关键因素。通过胞外酶作用,活性污泥中某些难溶性大分子有机物会被水解为小分子物质及生物易降解成分,如蛋白质可以被转化为多肽、二肽、氨基酸等,氨基酸则可以被进一步转化为低分子有机酸、氨和二氧化碳等。

2 活性污泥原生胞外酶的主要分类

2.1 溶菌酶

破解死亡微生物的细胞膜并释放胞内物是隐性生长-污泥减量的一个关键所在。溶菌酶是一种能以细胞壁中黏多糖为底物的糖苷水解酶,又称胞壁质酶或N-乙酰胞壁质聚糖水解酶。其主要通过破坏细胞壁中的N-乙酰胞壁酸和N-乙酰氨基葡萄糖之间的 β -1,4糖苷键,使细胞壁不溶性黏多糖分解成可溶性糖肽,进而细胞壁破裂而使细菌溶解。溶菌酶不仅具有溶胞效果,同时还具有降解大分子有机物的能力^[5],与蛋白酶和淀粉酶相比,溶菌酶对微生物细胞壁的分解能力更强。因此将溶菌酶用于污泥预处理,可有效裂解细胞,溶解污泥。Song等^[6]发现,通过溶菌酶作用,SBR反应器中的剩余污泥产量减量率可高达100%。Lakshmi等^[5]从污泥(WAS)中分离出Jerish 03和Jerish 04两种具备

溶菌酶分泌能力的芽孢杆菌属菌,并将其用于污泥预处理,与对照组相比,Jerish 03 和 Jerish 04 处理污泥后可使 SCOD 分别增加 29% 和 28.5%。He 等^[7]研究证实,溶菌酶可快速提高污泥溶解率(4 h 内),与对照相比,SCOD 增加比率可提高近 30%。而 Chen 等^[8]发现溶菌酶预处理不仅能够改善污泥的水解作用,还能嵌入 EPS,促进 EPS 的溶解。

2.2 蛋白酶

蛋白质是生物体中广泛存在的以氨基酸为基本单位的生物大分子物质,在活性污泥中主要存在于微生物细胞及 EPS 中,是活性污泥主要成分之一,占活性污泥总量的 60%~70%。蛋白质的水解及转化主要依靠蛋白酶活性,蛋白酶具有催化肽键的水解特性,可将蛋白质降解为小分子的多肽或氨基酸等,为下一步被微生物利用做准备。除水解蛋白质之外,部分蛋白酶还会攻击和破坏微生物细胞壁,并降解细胞死亡所释放的胞内蛋白。Parawira 等^[9]认为蛋白酶催化肽键断裂是污泥裂解过程中主要的酶反应,蛋白酶活性对污泥减量至关重要。Wang 等^[10]验证了蛋白酶等强化污泥水解的效果。张宇等^[11]发现经蛋白酶处理后,污泥减量效果提高至 28.8%。总体来说,蛋白酶不仅可以强化污泥减量效果,还具有一定的水质改善功能。目前发现的具有蛋白酶分泌功能的菌种有部分细菌及丝状真菌,如不动杆菌属的 *Raoultella* 和 *Pandoraea* 等。

2.3 纤维素酶

蛋白质与碳水化合物是活性污泥中的两大主要成分^[6,8],而纤维素是碳水化合物中分布最广、含量最多的一类多糖,大量存在于污水处理厂活性污泥的部分微生物中。纤维素降解酶是一种高效复合酶,主要包括内切葡聚糖酶、外切葡聚糖酶和 β -葡萄糖苷酶等,具有强化污泥水解的能力^[11],主要来源为丝状真菌,如木霉属、曲霉属、青霉属、根霉属及漆斑霉属等。

2.4 脂肪酶

活性污泥中除蛋白质(占 60%~70%)和碳水化合物(占 7%~10%)外,还含有一定量的脂肪。脂肪分子质量大,很难被直接分解或利用,但可在脂肪酶的作用下进行水解^[12]。脂肪酶不仅可以催化脂肪,还具备多种催化效果,如催化三酰甘油酯及其他一些脂溶性酯类的水解、醇解、酯化及转酯化等。Okwute 等^[13]研究发现,铜绿假单胞菌、枯草芽孢杆

菌和白色念珠菌是棕榈油厂废水的良好降解物,所产生的酶(脂肪酶)能够催化油污中复杂底物的分解;Suganthi 等^[14]基于 *Shewanella chilikensis*、*Bacillus firmus* 及 *Halomonas hamiltonii* 组成的微生物群对油污进行生物降解,发现该微生物群产生的脂肪酶含量为 80 U/mL,能够有效催化油泥,并去除了 96% 的石油烃。张宇等^[11]利用柠檬酸结合酶制剂对活性污泥增溶及减量效果进行了研究,发现经脂肪酶处理后,污泥减量效果提高至 20.8%。虽然脂肪在污泥中含量较少,但脂肪的破坏易引发污泥水解的连锁反应,脂肪酶在污泥减量方面具有很大的潜力^[15]。已公布的具有脂肪酶分泌能力的菌类有 33 种,其中丝状真菌 18 种,细菌 7 种。

3 活性污泥原生胞外酶的分布

3.1 胞外酶分布

胞外酶在活性污泥上清液中的酶活性可近似忽略不计,其主要通过吸附作用贮存在微生物细胞表面或嵌入 EPS 聚合体。Goel 等^[16]分析了活性污泥混合液、离心污泥混合液上清液及 25~30 W 超声波处理 5 min 并离心的污泥混合液上清液中的碱性磷酸酶、酸性磷酸酶、蛋白酶及 α -葡萄糖苷酶的活性,发现离心污泥混合液上清液中未检测出酶活性,而 EPS 中碱性磷酸酶、酸性磷酸酶和蛋白酶的最大活性分别相当于活性污泥混合液中酶总活性的 33%、47% 和 98%,并认为活性污泥胞外酶主要贮存于胞外聚合物(EPS)中,这与以往一些学者的研究相似,同时也契合了 EPS 的主要成分^[17];Nielsen 等^[18]通过 ELF(enzyme-linked fluorescence)技术确认活性污泥中的胞外酶部分贮存于 EPS,部分吸附于微生物细胞表面。Kloeke 等^[19]测算出位于 EPS 中的胞外酶约占酶总活性的 5%~44%,而吸附于微生物细胞表面的酶活性约占酶总活性的 56%~95%。胞外酶的这种分布模式有助于活性污泥降解污染物,主要体现在:①胞外酶停留时间与污泥停留时间等长,有利于大分子有机物的扩散和水解;②EPS 给酶活性累积创造了良好的内部环境;③可在 EPS 中完成对大分子有机物的水解,并就近供给微生物。但不利的是,在这种分布模式下,由于受到 EPS 的束缚和保护作用,胞外酶很难与死亡微生物进行充分接触,因而其残留物的水解效率较低,进而降低了隐性生长-污泥减量效率。

3.2 活性污泥原生胞外酶与EPS的交互性

胞外酶主要分布在污泥絮体及微生物细胞表面,大多数难溶性有机物在胞外酶的作用下首先在EPS内被水解为小分子易降解物质,其次就近被微生物摄取利用。因此,EPS对胞外酶的活性具有至关重要的影响。EPS是吸附于微生物细胞表面的由某一生长阶段微生物细胞分泌或释放的具有絮凝性质的高分子物质,其主要成分为多糖、蛋白质、腐殖酸、糖醛酸、酯类及其他非确定成分等^[20],可生物降解性差,BOD₅/COD值仅在0.1左右。EPS一般具有两种形态,一种是以胶体或溶解态松散存在于液相主体中的黏性聚合物,即溶解性EPS,另一种是附着于微生物表面的包囊聚合物,即附着性EPS,附着性EPS又可根据吸附在细胞表面的紧密程度分为松散附着型EPS和紧密附着型EPS^[20]。EPS在胞外酶水解大分子有机物的过程中具有重要的生化作用。首先,EPS可以作为活性微生物与外界环境接触的中间介质进行物质和能量传输;其次,在物质传输过程中EPS可以作为胞外酶水解大分子有机物的重要场所;再次,EPS可以抵御重金属或有毒物质等对酶及细胞的侵害^[20]。但是正因为EPS的这种工作机制,胞外酶往往被EPS吸附、包埋及束缚,降低了酶与底物的接触效率,进而影响胞外酶对大分子物质的水解速率^[20]。Degeest等^[21]认为EPS会降低底物在絮体中的扩散效率,阻碍底物与胞外酶的接触范围。Dey等^[22]通过加入阳离子结合剂打散EPS后发现,其对蛋白质、碳水化合物和腐殖质等的降解速率均有显著提高。但是打散EPS已经破坏了污泥的原始结构,在这种分布模式下,必然会影响活性污泥工艺的出水水质。因此,如何在不打散EPS的条件下,提高污泥中大分子物质的水解效率,是一个关键的问题。

4 活性污泥原生胞外酶水解效率强化方式

由于EPS对胞外酶的包裹作用,胞外酶的活性得不到充分发挥,仅依靠酶促污泥裂解效率较低。因此实际工程中往往采用多种溶胞工艺的联合应用方式。

4.1 复合酶作用

虽然各类胞外酶对污泥减量均有一定的促进作用,但活性污泥是蛋白质、碳水化合物及脂肪等共同组成的综合体,因此各类酶之间的复合更有利

于污泥减量效率的提升。杨秀清等^[23]通过对丝状真菌的混合培养,认为混合菌群分泌的胞外酶发生叠加作用,可以提高对难溶性物质的降解速率。Rahman等^[24]通过对比 *Penicillium corylophilum* 及 *Aspergillus niger* 的混合培养与单独培养时的数据验证了胞外酶的叠加强化作用。

4.2 中低强度的超声波

超声波是一种弹性机械波,作为一种物理能量形式,近年来被广泛应用于污泥减量处理领域。超声波可以通过空化作用产生的剪切力和局部高温(5 000 K)和高压(180 MPa)破坏EPS和微生物细胞壁,并催化活性自由基形成,具有促进污泥解体、强化胞外酶水解效率的功能。但是高频超声波膨胀相的时间短,难以诱发空化核增长至空化泡,或空化泡形成后易崩溃,频率过高不利于超声空化作用产生。因此,常利用中低强度超声波促进污泥水解,在低强度范围内,超声波即可有效提高酶活性、促进生物体细胞的生长和代谢^[25]。Wang等^[26]的试验表明,在一定范围内酶活性与超声波辐射功率呈正相关关系,超声功率每增加10 W,酶活性提高20%左右。同时超声波在介质中传播,可使介质质点进入振动状态,有效促进有机物的扩散和传输,增加底物与酶的互动性强度,提高了酶反应活性。谢敏等^[27]研究发现,低强度的超声波能够通过破坏污泥的结构从而改变污泥的絮体形态和污泥的活性,增强污泥的流变性并提高酶活性。Schläfer等^[28]则对低强度超声辐射下的微生物细胞膜通透性进行了研究,发现低强度超声辐射可提高微生物细胞分泌胞外酶能力,并强化酶对有机物的水解能力。Zhang等^[29]研究了超声波辐照时间对胞外酶活性的作用,发现在经短时间的超声波辐射后,微生物细胞因超声波机械剪切力形成微创,并激发其自身防御效应,强化微生物胞外酶分泌量,水解能力增强。

4.3 辐射

辐射技术用于污泥处理是近些年来才出现的新热点,其可以氧化有机污染物、增强难溶性物质的可溶性、提高污泥降解效率、灭活污泥中的病原体、去除异味,并对酶的活性造成一定影响。采用辐射+酶的联合方式可直接破坏絮体乃至细胞壁,释放其中的胞内物质,提高胞外酶与底物的接触概率,辐射作用也会导致部分酶的轻微失活,但总的来说提高了污泥的液化效率。Kim等^[30]采用 γ -射

线辐照活性污泥,发现经一段时间的辐射后活性污泥絮体被打破,蛋白质及碳水化合物等被释放,提高了酶与底物的有效接触率。Chu等^[31]发现经 γ -射线辐照后,污泥出现液化现象,并有蛋白质、多糖和胞外酶等的释放,其作用似乎与超声波类似,但经活性测试后发现蛋白酶、超氧化物歧化酶和过氧化氢在辐射过程中会轻微失活。总体上来说,适度的辐射对酶促污泥裂解有一定的促进作用。

4.4 低温热解

污泥热处理相对其他方式来说是一个简单而实用的污泥裂解方式,其基本原理是在高温作用下,微生物细胞由于压力差作用而破裂,细胞内有机物被释放出来。热效应不但可促使污泥热解,而且还能强化酶的活性。吴静等^[32]认为污泥低温热解预处理(60℃左右)在某种程度上可被看作是一个预水解步骤,并发现经低温热解预处理后许多高温厌氧消化细菌的生物活性明显提高。采用低温热解+酶解的联合方式一方面可有效热解污泥,另一方面还可以促进酶的降解效率,是一种较有潜力的处理方式,这种方式在日本已进入工程实用阶段。Ferrer等^[33]将污泥置于70℃的反应器中预处理9h后进行厌氧消化试验,发现甲烷产量比未预处理污泥提高了30%~40%,混合气体中的甲烷含量也由原来的64%提高至69%;Borges等^[34]研究亦表明,低温热解预处理7h($T=75^{\circ}\text{C}$)能使剩余污泥中的有机物释放量提高30~35倍,甲烷产量提高50%。

4.5 反硫化

有学者发现厌氧消化池反硫化反应器(SRB)中若含有大量硫酸盐,则对初沉污泥的消化速率比一般厌氧消化池(产甲烷消化池)高出许多,主要表现为SRB中污泥絮体粒径小、达到污泥最大溶解率的时间短等。采用反硫化+酶解的联合方式,一方面可以去除污泥中残留的硫化物,另一方面可以达到减量的目的,具有一举多得功效,但其不具有普遍性。Whiteley等^[35]针对硫酸盐强化酶促现象,研究了硫酸盐、亚硫酸盐及硫化物对平行运行的SRB消化池与产甲烷消化池中脂肪酶的特性以及脂肪酶活力的影响。发现硫酸盐能够强化甲烷消化池污泥中脂肪酶的活性,在添加400 mg/L的硫酸盐后,甲烷消化池污泥中的脂肪酶降解速率提高1200%;但继续增大硫酸盐浓度,则对SRB中的脂肪酶活性无显著影响(SRB中硫酸盐的初始浓度为2000 mg/L);

亚硫酸盐虽然可以最大程度地强化SRB中脂肪酶的活性(提高200%),但对产甲烷消化池污泥的脂肪酶反而表现出一定的抑制作用;硫化物对两种工艺中污泥脂肪酶活性都有极大的增强作用,在添加600 mg/L的硫化物后,产甲烷消化池与SRB消化池中脂肪酶的活性分别增至原始速率的4000%和6000%。此外,硫化物也被证明可提高活性污泥中蛋白酶的水解活性。这可能是由于硫化物、硫酸盐、碳酸氢盐以及 OH^- (硫化物、硫酸盐与反应器中其他物质的反应产物)具有中和污泥絮体表面电性的能力,使得污泥絮体解体,强化了与底物的接触效率,提高了酶的水解活性。

5 结语

① 对胞外酶的回顾与总结表明,具有胞外酶分泌能力的菌种多为不动杆菌属、丝状真菌等。这些菌种均具有强大的胞外酶系统,其胞外酶对污水中难溶性大分子及污泥的裂解具有极大的促进作用,因此在传统活性污泥工艺中适度引进部分丝状菌类或许对提高污水处理效率及隐性生长污泥减量具有积极的意义。

② 胞外酶主要分布在EPS内部或细胞表面与EPS的临界处,这种分布对降解进水中的某些物质有利,但并不利于污泥裂解的进行。

③ 通过反絮凝作用可以解除EPS对胞外酶的束缚,从而增强胞外酶与底物的接触几率,可提高胞外酶活性,除此之外,部分物质如硫化物等对胞外酶有着特殊的促进作用。

通过以上的回顾,认为酶促污泥裂解具有很强的发展潜力,但现阶段对胞外酶裂解污泥的机理、酶的复合作用及具有胞外酶分泌能力的菌种来源的研究还较为薄弱;同时已在投入生产的联合处理工艺中,对胞外酶的水解机理、影响参数及交互作用的研究也较少,对实际生产的理论指导意义尚不明显。即使如此,酶促污泥裂解也显示了良好的减量化效果。因此,随着对酶促污泥裂解的进一步研究,将对未来工艺的发展有着重要的指导意义。

参考文献:

- [1] GUO W Q, YANG S S, XIANG W S, *et al.* Minimization of excess sludge production by in-situ activated sludge treatment processes—a comprehensive review [J]. *Biotechnology Advances*, 2013, 31 (8):

- 1386-1396.
- [2] 孟宪荣, 刘东方, 刘范嘉, 等. 臭氧氧化污泥减量和碳源回收利用研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(1): 18-21.
- MENG Xianrong, LIU Dongfang, LIU Fanjia, *et al.* Study on ozonation for sludge reduction and carbon source recovery[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(1): 18-21(in Chinese).
- [3] 汪顺丽, 查君茹, 张宏才, 等. 污泥减量菌剂及其水解污泥条件优化[J]. 环境化学, 2016, 35(4): 817-825.
- WANG Shunli, ZHA Junru, ZHANG Hongcai, *et al.* Compound sludge-disintegration bacteria agent and the optimization of culture conditions [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(4): 817-825(in Chinese).
- [4] 周海滨, 黄瑞敏, 黄黎明. 固定化生物催化剂用于污水厂污泥减量的研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(15): 12-15.
- ZHOU Haibin, HUANG Ruimin, HUANG Liming. Application of immobilized biocatalyst to sludge reduction in wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(15): 12-15(in Chinese).
- [5] LAKSHMI M V, MERRYLIN J, KAVITHA S, *et al.* Solubilization of municipal sewage waste activated sludge by novel lytic bacterial strains[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(4): 2733-2743.
- [6] SONG Y, SHI Z, CHEN S Y, *et al.* Feasibility of using lysozyme to reduce excess sludge in activated sludge process[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(9): 2472-2477.
- [7] HE J G, XIN X D, QIU W, *et al.* Performance of the lysozyme for promoting the waste activated sludge biodegradability[J]. Bioresource Technology, 2014, 170: 108-114.
- [8] CHEN J, LIU S, WANG Y, *et al.* Effect of different hydrolytic enzymes pretreatment for improving the hydrolysis and biodegradability of waste activated sludge [J]. Water Science & Technology, 2018, 2017(2): 592-602.
- [9] PARAWIRA W. Enzyme research and applications in biotechnological intensification of biogas production[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2012, 32(2): 172-186.
- [10] WANG W Y, GAO X M, ZHANG J, *et al.* Effect of SDS and neutral protease on the release of extracellular polymeric substances (EPS) from mechanical dewatered sludge [J]. Waste & Biomass Valorization, 2017(9): 1-12.
- [11] 张宇, 李明智, 梅荣武, 等. 应用柠檬酸和酶制剂协同减量处理活性污泥[J]. 环境工程学报, 2017, 11(3): 1947-1952.
- ZHANG Yu, LI Mingzhi, MEI Rongwu, *et al.* Reduction of excess activated sludge production by combined citric acid and enzyme treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(3): 1947-1952(in Chinese).
- [12] YILMAZ D E, SAYAR N A. Organic solvent stable lipase from *Cryptococcus diffluens* D44 isolated from petroleum sludge [J]. Journal of Molecular Catalysis B (Enzymatic), 2015, 122: 72-79.
- [13] OKWUTE O L, STEPHEN E, ANYANWU P I. Biodegradation of palm oil mill effluent (POME) and lipase activity by *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis* and *Candida albicans* [J]. British Microbiology Research Journal, 2015, 9:1-10.
- [14] SUGANTHI S H, MURSHID S, SRIRAM S, *et al.* Enhanced biodegradation of hydrocarbons in petroleum tank bottom oil sludge and characterization of biocatalysts and biosurfactants [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 220: 87-95.
- [15] SELVAKUMAR P, SIVASHANMUGAM P. Multi-hydrolytic biocatalyst from organic solid waste and its application in municipal waste activated sludge pre-treatment towards energy recovery [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 117: 1-10.
- [16] GOEL R, MINO T, SATOH H, *et al.* Enzyme activities under anaerobic and aerobic conditions in activated sludge sequencing batch reactor [J]. Water Research, 1998, 32(7): 2081-2088.
- [17] ZHANG P, FANG F, CHEN Y P, *et al.* Composition of EPS fractions from suspended sludge and biofilm and their roles in microbial cell aggregation [J]. Chemosphere, 2014, 117: 59-65.
- [18] NIELSEN P H, ROSLEV P, DUEHOLM T E, *et al.* *Microthrix parvicella*, a specialized lipid consumer in anaerobic-aerobic activated sludge plants [J]. Water Science & Technology, 2002, 46(1/2): 73-80.
- [19] KLOEKE F V O, GEESEY G G. Localization and identification of populations of phosphatase-active bacterial cells associated with activated sludge flocs [J]. Microbial Ecology, 1999, 38(3): 201-214.
- [20] SHENG G P, YU H Q, LI X Y. Extracellular polymeric

- substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28(6): 882-894.
- [21] DEGEEST B, JANSSENS B, VUYST L D. Exopolysaccharide (EPS) biosynthesis by *Lactobacillus sakei* 0-1: production kinetics, enzyme activities and EPS yields[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, 91(3): 470-477.
- [22] DEY E S, SZEWCZYK E, WAWRZYNCZYK J, *et al.* A novel approach for characterization of exopolymeric material in sewage sludge [J]. *Journal of Residuals Science & Technology*, 2006, 3(2): 97-103.
- [23] 杨秀清, 王婧人, 赵晓霞, 等. *Trametes* sp.SQ01 和 *Chaetomium* sp.R01 混合培养对四种染料的脱色[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(3): 518-524.
- YANG Xiuqin, WANG Jingren, ZHAO Xiaoxia, *et al.* Decolorization of four dyes by a mixed culture of *Trametes* sp. SQ01 and *Chaetomium* sp. R01 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(3): 518-524 (in Chinese).
- [24] RAHMAN R A, MOLLA A H, BARGHASH H F A, *et al.* Optimization of process parameters for pilot-scale liquid-state bioconversion of sewage sludge by mixed fungal inoculation [J]. *Environmental Technology*, 2016, 37(1): 1-15.
- [25] 王梦杰, 员建, 马华继, 等. 低强度超声波对膨胀活性污泥沉降性能及污泥减量的影响[J]. *化工进展*, 2017, 36(3): 1134-1139.
- WANG Mengjie, YUAN Jian, MA Huaji, *et al.* Effects of low intensity ultrasonic treatment on settle ability of bulking sludge and sludge reduction [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(3): 1134-1139 (in Chinese).
- [26] WANG D L, YAN L F, MA X B, *et al.* Ultrasound promotes enzymatic reactions by acting on different targets: enzymes, substrates and enzymatic reaction systems [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 119: 453-461.
- [27] 谢敏, 王成, 徐瑶, 等. 超声波溶胞预处理对污泥溶出物和分形结构的影响[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(6): 2348-2352.
- XIE Min, WANG Cheng, XU Yao, *et al.* Impact of the ultrasonic lysis pretreatment on the dissolved substances and sludge fracture composition [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(6): 2348-2352 (in Chinese).
- [28] SCHLÄFER O, SIEVERS M, KLOTZBÜCHER H, *et al.* Improvement of biological activity by low energy ultrasound assisted bioreactors [J]. *Ultrasonics*, 2000, 38(1): 711-716.
- [29] ZHANG G M, ZHANG P Y, YANG J M, *et al.* Ultrasonic reduction of excess sludge from the activated sludge system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 145(3): 515-519.
- [30] KIM T H, NAM Y K, PARK C, *et al.* Carbon source recovery from waste activated sludge by alkaline hydrolysis and gamma-ray irradiation for biological denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(23): 5694-5699.
- [31] CHU L B, WANG J L, WANG B. Effect of gamma irradiation on activities and physicochemical characteristics of sewage sludge [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, 54(1): 34-39.
- [32] 吴静, 姜艳, 曹知平, 等. 剩余污泥低温热水解中试 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015, 55(1): 93-97, 121.
- WU Jing, JIANG Yan, CAO Zhiping, *et al.* Pilot study of the thermal hydrolysis of excess waste sludge at low temperatures [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, 55(1): 93-97, 121 (in Chinese).
- [33] FERRER I, PONSÁ S, VÁZQUEZ F, *et al.* Increasing biogas production by thermal (70 °C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2008, 42(2): 186-192.
- [34] BORGES E S M, CHERNICHARO C A L. Effect of thermal treatment of anaerobic sludge on the bioavailability and biodegradability characteristics of the organic fraction [J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2009, 26(3): 469-480.
- [35] WHITELEY C G, MELAMANE X, PLETSCHKE B, *et al.* The enzymology of sludge solubilisation utilising sulphate reducing systems: the role of lipases [J]. *Water Science & Technology*, 2003, 48(8): 159-167.

作者简介: 林佳琪(1989-), 女, 四川乐山人, 在读博士, 讲师, 主要从事污泥资源化领域的教学及科研工作。

E-mail: 2021006@glut.edu.cn

收稿日期: 2019-11-18

修回日期: 2020-03-26

(编辑: 丁彩娟)