

不同碳源培养的成熟好氧颗粒污泥的分形表征

高景峰, 苏凯, 张倩, 陈冉妮, 王金惠, 彭永臻

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要: 为了表征不同碳源培养的好氧颗粒污泥的密实以及规则程度, 试验利用不同碳源培养的成熟好氧颗粒污泥 SEM 照片, 采用 Photoshop、Fips2 对图形进行处理并且对图像进行分形计盒维数的计算。其中, 1 号(葡萄糖膨胀颗粒)好氧颗粒的计盒维数最低, 达到 1.794 ± 0.011 。3 号(蛋白胨颗粒)与 5 号(生活污水颗粒)的分形维数较高, 达到了 1.866 ± 0.018 和 1.880 ± 0.015 , 较为致密。不同碳源培养的好氧颗粒污泥的边界计盒维数主要分布在 1.14 左右, 其中 6 号(啤酒颗粒)的形状较为规则, 计盒维数达到 1.115 ± 0.003 , 7 号(垃圾渗滤液颗粒)污泥的形状最不规则。结果表明, 利用二维分形维数能够较好地表征、区分不同好氧颗粒污泥的密实程度、规则程度, 并且能够表征好氧颗粒污泥的状态, 如膨胀等。分形表征一定程度上弥补其他现有表征好氧颗粒污泥的理化特性方法的缺陷, 为研究好氧颗粒污泥的组成、结构及物化特征的关系提供重要依据。

关键词: 好氧颗粒污泥; 碳源; 密实程度; 规则程度; 分形特征; 计盒维数

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)08-1871-06

Fractal Characteristics of Mature Aerobic Granular Sludge Cultivated by Different Carbon Sources

GAO Jing-feng, SU Kai, ZHANG Qian, CHEN Ran-ni, WANG Jin-hui, PENG Yong-zhen

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to characterize the dense and regular level of aerobic granular sludge (AGS) which was cultivated by different carbon sources, the SEM images of mature AGS were used in the study. The calculation process using Photoshop and Fips2 on fractal characteristics of these granules was built. The lowest box-counting dimension was bulking aerobic granular sludge cultivated by glucose (No. 1), which was 1.794 ± 0.011 ; the box-counting dimension of AGS cultivated by peptone (No. 3) and domestic sewage (No. 5) were reached up to 1.866 ± 0.018 and 1.880 ± 0.015 . The boundary box-counting dimension of the AGS was also calculated and the average value was 1.14. The AGS cultivated by beer (No. 6) was more regular in shape and the boundary box-counting dimension was 1.115 ± 0.003 . The AGS cultivated by landfill leachate (No. 7) was the most irregular in shape. This study indicates that fractal dimension provides an approach for quantification of dense and regular level of AGS, furthermore, it could be used to characterize the status of AGS, such as bulking.

Key words: aerobic granular sludge (AGS); carbon source; dense level; regular level; fractal characteristics; boxing-counting dimensions

大量的研究表明, 好氧颗粒污泥的微生物结构与培养好氧颗粒污泥时所用的碳源密切相关。有研究认为利用葡萄糖培养的好氧颗粒污泥结构松散, 丝状菌容易生长繁殖, 从而影响其稳定性^[1,2]; 醋酸盐为底物培养的好氧颗粒污泥结构紧凑, 细胞在其内部紧密连接, 杆菌在其中占优势^[3]; Sun 等^[4]利用葡萄糖、醋酸盐、蛋白胨培养好氧颗粒污泥, 结果发现以蛋白胨为碳源形成的好氧颗粒污泥最密实、稳定。高景峰等^[5,6]利用实际生活污水培养好氧颗粒污泥, 发现生活污水培养的好氧颗粒污泥结构致密。这些研究主要是围绕不同碳源对好氧颗粒污泥的生物相的影响以及去除效果等进行探讨, 对于其物理化学特征却研究甚少, 而物理化学特性(沉速、孔隙率、粒径、疏水性、机械强度等)是决定好氧颗粒污泥高效吸附、传质、沉降、稳定维持的重要指标^[7];

在实际工程运行中, 好氧颗粒污泥的稳定维持是制约好氧颗粒污泥规模化的主要因素, 因此深入表征好氧颗粒污泥的理化特性有助于强化好氧颗粒污泥的稳定性, 推动其走向实际应用^[8-10]。分形作为表征复杂图形和复杂过程的非线性规律, 已被研究者重视: 如卢家娟等^[11]对厌氧颗粒污泥的电镜照片进行分形表征, 用此方法描述厌氧颗粒污泥的密实程度以及圆规维数。本研究利用分形理论对不同碳源培养的成熟好氧颗粒污泥进行分形表征, 利用分形维数确定好氧颗粒污泥的密实以及规则程度, 对好氧颗粒污泥的理化特性的表征具有积极的意义。

收稿日期: 2009-10-20; 修订日期: 2010-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(50508001); 北京市自然科学基金项目(8082007); 北京市科技新星计划项目 A 类(2006A10)

作者简介: 高景峰(1974~), 男, 副教授, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: gao.jingfeng@bjut.edu.cn

分形的概念是在 20 世纪 70 年代为了表征复杂图形和复杂过程首先引入自然科学领域的,它与混沌一同成为研究自然界自相似现象的有力数学工具.分形理论在水环境与水处理领域的研究也越来越成为当今前沿研究课题之一^[12-16].一般来说,分形是局部和整体有某种方式相似的形,该定义强调图形中局部和整体之间的值相似性.分形维数的定义来自 Hausdorff 维数的定义.设 X 是 n 维空间中的一个集合,用边长为 ε 的 n 维体积元覆盖着整个集合,设含有该集合元素的体积元的数目为 $N(\varepsilon)$,则其数学表达式为^[12]:

$$N(\varepsilon) \sim (1/\varepsilon)^D \quad (1)$$

对于上式两边取自然对数,在进行简单运算后,可得下式:

$$D = \ln N(\varepsilon) / \ln(1/\varepsilon) \quad (2)$$

式中 D 称为 Hausdorff 维数,它可以是整数,也可以是分数.对于严格自相似的分形集,很容易测定出其 Hausdorff 维数.然而对于自然界中大量存在的统计自相似的分形体, Hausdorff 维数难以测定.因此产生了许多分形维数的定义,其中计盒维数具有概念清晰、计算简单等特点,所以应用最广泛.计盒维数与 Hausdorff 维数的测定不同之处在于:计盒维数是使用不同边长的小方格去覆盖分形图形,计算网格中有图形像素的方格数目,不断减小网格尺度 ε ,直至最小的网格尺寸达到像素为止,得到一系列 $N(\varepsilon)$ 、 ε 的数据,如果该图形具有分形特征,则式(1)成立:其中 D 即图形的计盒维数,通过 $\lg N(\varepsilon)$ 与 $\lg \varepsilon$ 间线性关系的斜率可以计算出.

1 材料与方 法

1.1 污泥和废水

试验进水组成为: NH_4Cl 229.3 mg/L, KH_2PO_4 43.9 mg/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 90 mg/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 14 mg/L 以及 0.4 mL/L 的微量元素.微量元素的配制如下:每 L 水含 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1.5 g, H_3BO_3 0.15 g, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g, KI 0.18 g, $\text{MnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.12 g, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.06 g, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.12 g, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.15 g 和 EDTA 10 g.其中初始进水 COD 浓度控制在 600 mg/L.种泥来源于北京市方庄污水处理厂二次沉淀池排放的剩余污泥.根据反应器的具体情况调整负荷,培养好氧颗粒污泥.各反应器的进水碳源种类和所培养获得的好氧颗粒污泥的特征如表 1 所示.

1.2 试验装置

好氧颗粒污泥培养所用 SBR 反应器均为圆柱形,直径 $d=9$ cm,有效高度为 $H=90$ cm, $H/d=10$,总有效容积 6 L,有机玻璃制,容积交换率为 67%.反应器的运行方式为进水(2 min),曝气(290 min),沉淀(5 min),排水(2 min).采用时间程序控制器自动控制各反应阶段的开关,每天 4 个周期.

表 1 不同碳源培养好氧颗粒污泥电镜照片的特征

Table 1 Characteristics of scanning electron microscopy (SEM) images of aerobic granular sludge cultivated by different carbon sources

编号	碳源	特征表述
1	葡萄糖	颗粒表面有大量的丝状菌缠绕,为膨胀的颗粒污泥
2	葡萄糖	较密实,颗粒表面形状不规则
3	蛋白胨	非常密实,颗粒形状较规则
4	醋酸钠	较密实,颗粒表面大多为杆菌
5	生活污水	非常密实,颗粒形状较规则
6	啤酒	较密实,颗粒表面孔隙较大,形状规则
7	垃圾渗滤液	较密实,颗粒表面形状不规则

1.3 分析方法

1.3.1 成熟好氧颗粒污泥的扫描电镜观察

各反应器的好氧颗粒污泥经戊二醛固定、乙醇梯度脱水、乙酸异戊酯置换、临界点干燥、离子溅射喷金处理后使用日立 S-4300 进行扫描电镜观察.

1.3.2 好氧颗粒污泥的分形特征分析^[11,12]

采用 Photoshop 和 Fips2^[12]相结合的方法,从 1~7 号反应器中各挑选 4~6 组好氧颗粒污泥进行处理计算,通过图 1 所示流程,可以获得 1~7 号好氧颗粒污泥的边界曲线以及去除背景的灰度图像,采用 Fips2 软件计算处理图像和边界闭合曲线的计盒维数,最后将数值进行统计分析.

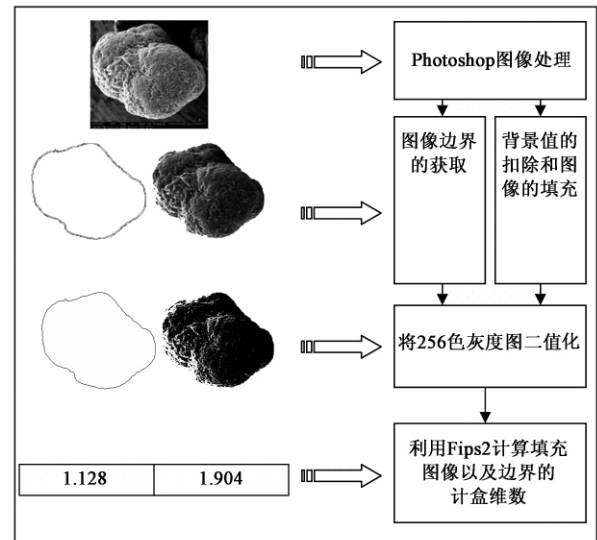


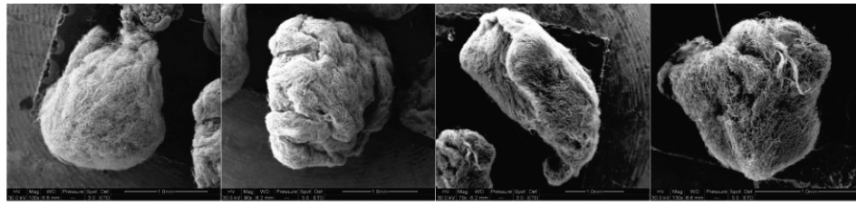
图 1 好氧颗粒污泥电镜图像处理流程和分形计算

Fig. 1 Treatment process and analysis of fractal calculation for SEM images of aerobic granular sludge

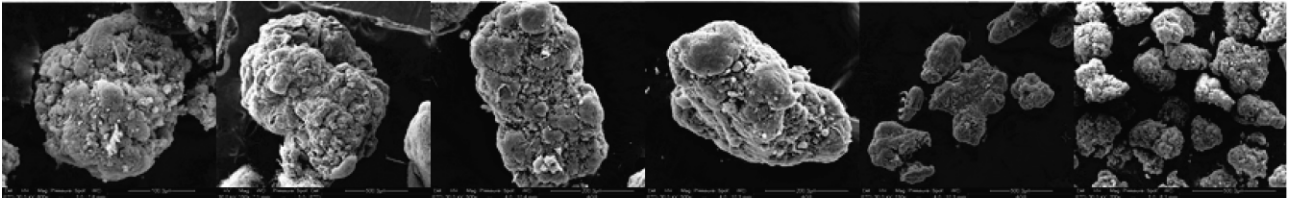
2 结果与讨论

2.1 好氧颗粒污泥的 SEM 图像

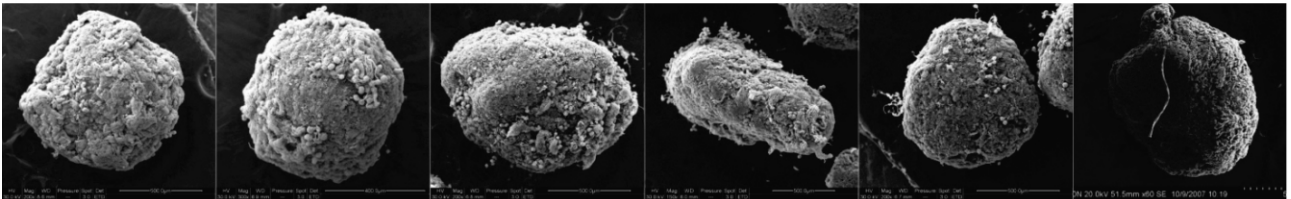
图 2 中所示为利用各种碳源培养好氧颗粒污泥的电镜图片,各种碳源培养的颗粒具有不同的特点,如表 1 所示.



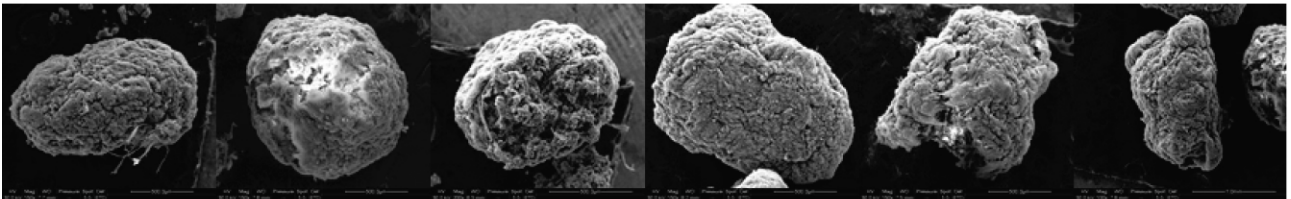
(a) 葡萄糖 (膨胀)



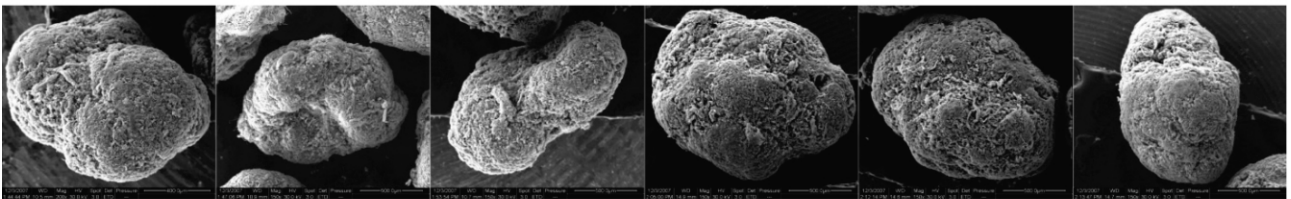
(b) 葡萄糖



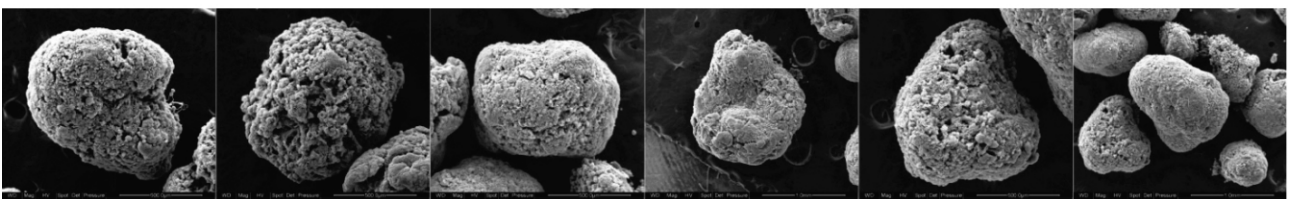
(c) 蛋白胨



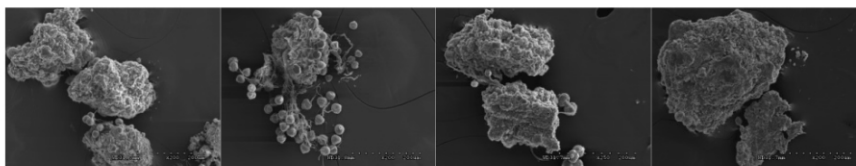
(d) 醋酸钠



(e) 生活污水



(f) 啤酒



(g) 垃圾渗滤液

图 2 不同碳源培养的好氧颗粒污泥电镜图像

Fig. 2 SEM images of aerobic granular sludge cultivated with different carbon sources

2.2 好氧颗粒污泥的图像处理过程

根据图 1 的流程对好氧颗粒污泥进行处理. 以图 3 中典型的好氧颗粒污泥为例, SEM 图像处理后变为二值填充图像与二值边界图像. 在此基础上, 对各好氧颗粒污泥进行分形维数的计算. 值得注意的是, 在对图像填充过程中, 阈值对分形维数的计算有影响^[17], 因此, 所有图像二值化的阈值选取为 120.

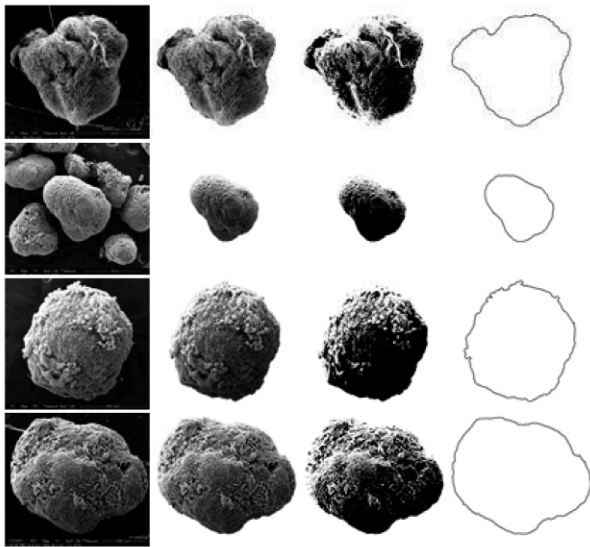


图 3 典型好氧颗粒污泥图像处理过程
Fig. 3 Treatment process of SEM images of typical aerobic granular sludge

2.3 不同碳源培养的好氧颗粒污泥的分形特征

2.3.1 好氧颗粒污泥的计盒维数

利用 Fips2 依次对上述二值填充图像进行计盒维数计算, 计算结果见表 2. 计盒维数可以表征好氧颗粒污泥的二维平面投影图形的空间填充程度, 计盒维数越高, 表明填充度越高, 也表明他们越密实, 图 4 给出了不同碳源培养的好氧颗粒污泥的分形维数平均值, 其中蛋白胨颗粒与生活污水颗粒的分形维数较高, 达到了 1.866 ± 0.018 和 1.880 ± 0.015 , 说明 3 号蛋白胨好氧颗粒污泥和 5 号生活污水好氧颗粒污泥很密实, 这也与好氧颗粒污泥的 SEM 照片的特征描述基本相符. 2 号、4 号、6 号、7 号好氧颗粒污泥的平均分形维数分别为 1.835 ± 0.006 、 1.838 ± 0.010 、 1.825 ± 0.012 、 1.825 ± 0.009 , 分形维数基本维持在 1.825 左右. 1 号葡萄糖膨胀颗粒的分形维数最低, 计盒维数为 1.794 ± 0.011 . 通过计盒维数数值可以判断颗粒污泥的密实程度, 当颗粒处于异常状态(如膨胀等), 在分形维数值上有明显的区别.

表 2 不同碳源培养好氧颗粒污泥的计盒维数

Table 2 Box-counting dimensions of aerobic granular sludge cultivated by different carbon sources

编号	计盒维数						平均值	方差
	颗粒 1	颗粒 2	颗粒 3	颗粒 4	颗粒 5	颗粒 6		
1	1.774	1.803	1.793	1.807			1.794	0.011
2	1.832	1.823	1.839	1.849	1.830	1.836	1.835	0.006
3	1.888	1.862	1.839	1.894	1.87	1.841	1.866	0.018
4	1.86	1.833	1.821	1.846	1.837	1.831	1.838	0.010
5	1.904	1.851	1.863	1.888	1.884	1.887	1.880	0.015
6	1.836	1.839	1.828	1.792	1.833	1.824	1.825	0.012
7	1.828	1.835	1.811				1.825	0.009

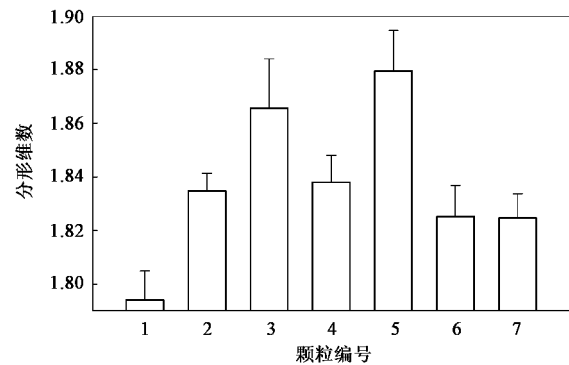


图 4 不同碳源培养好氧颗粒污泥的计盒维数平均值
Fig. 4 Average box-counting dimensions of aerobic granular sludge cultivated by different carbon sources

2.3.2 好氧颗粒污泥边界的计盒维数

好氧颗粒污泥边界的计盒维数可以表征好氧颗粒污泥边界的不规则程度, 分形维数值越高, 表明颗粒的边界不规则程度越高, 在一定程度上可以表征好氧颗粒表面的规则程度. 表 3 显示出不同碳源培养的好氧颗粒污泥边界的分形维数值. 图 5 比较了各编号好氧颗粒污泥边界分形维数的平均值. 其中, 5 号、6 号颗粒的边界分形维数较小, 分别为 1.122 ± 0.008 、 1.115 ± 0.003 , 说明 5 号生活污水颗粒污

表 3 不同碳源培养好氧颗粒污泥的边界计盒维数

Table 3 Boundary box-counting dimensions of aerobic granular sludge cultivated by different carbon sources

编号	边界计盒维数						平均值	方差
	颗粒 1	颗粒 2	颗粒 3	颗粒 4	颗粒 5	颗粒 6		
1	1.139	1.152	1.126	1.129			1.137	0.009
2	1.124	1.167	1.129	1.130	1.139	1.127	1.136	0.011
3	1.117	1.144	1.144	1.145	1.124	1.129	1.134	0.011
4	1.144	1.089	1.131	1.132	1.136	1.134	1.128	0.013
5	1.128	1.101	1.123	1.127	1.132	1.119	1.122	0.008
6	1.114	1.122	1.117	1.112	1.116	1.109	1.115	0.003
7	1.150	1.172	1.18	1.147			1.162	0.014

泥与 6 号啤酒颗粒污泥的形状较规则. 7 号颗粒的边界计盒维数平均值最大, 达到 1.162 ± 0.014 , 说明 7 号颗粒的表面不规则程度较高, 这也与 SEM 照片的直观的表述相符.

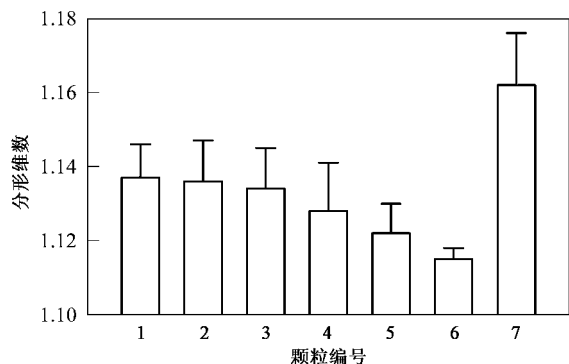


图 5 不同碳源培养好氧颗粒污泥的边界计盒维数平均值

Fig. 5 Average box-counting dimensions of aerobic granular sludge boundary cultivated by different carbon resources

3 好氧颗粒污泥理化特性与分形维数关系的分析

碳源种类不是导致 SBR 中好氧颗粒化的主要因素:好氧颗粒污泥能在多种不同的碳源下形成,与碳源种类无关,或者说对碳源的特性不是非常敏感.然而,上述不同碳源培养的好氧颗粒污泥的 SEM 照片呈现出不同的微生物结构以及微生物种类,这是因为碳源充当了一种微生物选择压,可以选择、富集特定的微生物,因此造成了颗粒结构以及理化性质上的差异.本研究利用分形对不同碳源培养的好氧颗粒污泥的分形维数以及边界分形维数进行了对比分析,从分形维数计算结果可以界定好氧颗粒污泥的计盒维数在 1.825 以上,称为密实颗粒.同时,比较同一种碳源,不同状态(1 号、2 号)的好氧颗粒污泥的分形维数,其数值具有较高的辨识度,这也有利于研究者判断好氧颗粒的状态正常与否,为建立与总结好氧颗粒污泥状态类别提供了依据与思路.

好氧颗粒的稳定维持、传质、吸附、沉降性能都与好氧颗粒污泥的结构密切相关.近些年来,关于好氧颗粒污泥理化特性的表征主要围绕在好氧颗粒污泥的粒径、沉速、颗粒密度、孔隙率、机械强度、形态学和表面吸附力等方面:Li 等^[18]认为好氧颗粒污泥没有固定的形状、多孔而又不规则;Li 等^[19]采用 SEM 表征了污泥好氧颗粒化过程中的形貌和结构特征;Mu 等^[20]建立方法确定好氧颗粒污泥的孔隙阻力系数;Su 等^[21]利用分形几何学描述好氧颗粒污泥的理化性质;Mikkelsen 等^[22]将好氧颗粒污泥

的形成过程定义为在反应器内,通过曝气与搅拌,普通污泥在剪切力的作用下,形成特殊的聚集体,剪切力成为表征颗粒污泥理化特性的重要指标;Zheng 等^[23]利用体积排阻色谱(SEC)测定好氧颗粒污泥的孔隙率,确定了好氧颗粒污泥孔隙率的范围;Adav 等^[24]利用 SEC 研究了好的氧颗粒污泥的水力特性;Chen 等^[25]利用多重荧光染色研究了胞外多聚物对好氧颗粒污泥稳定性的影响.然而,这些研究所针对的都是某一类型的好氧颗粒污泥,在不同碳源条件下培养出的好氧颗粒污泥的理化性质由于微生物菌种种类以及结构不同,导致各类型的好氧颗粒污泥的理化性质大不相同,而通过分形维数能很好地表征好氧颗粒污泥的密实程度、规则程度,可以将密实度、规则度作为指标,进一步解析好氧颗粒污泥的稳定维持、传质、吸附、底物降解等与颗粒污泥结构的关系.

4 结论

(1)好氧颗粒污泥 SEM 的计盒分形维数能够直观表征不同碳源培养的好氧颗粒污泥的密实程度;本试验中,界定好氧颗粒污泥的计盒维数在 1.825 以上时,称为密实颗粒;结果表明蛋白胨颗粒和实际生活污水颗粒最为密实,葡萄糖膨胀颗粒结构较为松散.

(2)不同碳源培养颗粒污泥边界的计盒维数能够表征好氧颗粒污泥表面的规则程度.其中啤酒颗粒污泥与生活污水颗粒污泥表面较规则,垃圾渗滤液培养的颗粒污泥的表面最不规则.

(3)分形维数能很好地表征好氧颗粒污泥的密实程度、规则程度,为研究好氧颗粒污泥的稳定维持、传质、吸附、底物降解等与颗粒污泥结构的关系提供了重要依据.

参考文献:

- [1] Tay S, Moy B, Jiang H L, et al. Rapid cultivation of stable aerobic phenol-degrading granules using acetate-fed granules as microbial seed [J]. J Biotechnol, 2005, 115(4): 387-395.
- [2] Tay S, Moy B, Maszenan A M, et al. Comparing activated sludge and aerobic granules as microbial inocula for phenol biodegradation [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2005, 67(5): 708-713.
- [3] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor [J]. J Appl Microbiol, 2001, 91(1): 168-175.
- [4] Sun F Y, Yang C Y, Li J Y, et al. Influence of different substrates on the formation and characteristics of aerobic granules

- in sequencing batch reactors [J]. *J Environ Sci-China*, 2006, **18** (5): 864-871.
- [5] 高景峰, 郭建秋, 毕环宇, 等. 间歇式除磷好氧颗粒污泥反应器的快速启动 [J]. *环境工程*, 2008, **26**(1): 15-18.
- [6] 高景峰, 周建强, 彭永臻. 处理实际生活污水短程硝化好氧颗粒污泥的快速培养 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(10): 1604-1611.
- [7] Gonzalez-Gil G, Lens P, Van Aelst A, *et al.* Cluster structure of anaerobic aggregates of an expanded granular sludge bed reactor [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2001, **67**(8): 3683-3692.
- [8] Schwarzenbeck N, Borges J M, Wilderer P A. Treatment of dairy effluents in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2005, **66**(6): 711-718.
- [9] Zheng Y M, Yu H Q, Liu S H, *et al.* Formation and instability of aerobic granules under high organic loading conditions [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(10): 1791-1800.
- [10] Ni B J, Xie W M, Liu S G, *et al.* Granulation of activated sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor for the treatment of low-strength municipal wastewater [J]. *Water Res*, 2009, **43**(3): 751-761.
- [11] 芦家娟, 王毅力, 侯立安, 等. ABR 成熟颗粒污泥的分形特征与尺度效应 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 118-123.
- [12] 孙霞, 吴自勤. 分形原理及其应用 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2006.
- [13] Serra T, Logan B E. Collision frequencies of fractal bacterial aggregates with small particles in a sheared fluid [J]. *Environ Sci Technol*, 1999, **33**(13): 2247-2251.
- [14] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature* [M]. San Francisco: Freeman, 1982.
- [15] 李乐勇, 王毅力, 廖柏寒. 官厅水库底泥对染料的吸附特征研究 [J]. *安全与环境学报*, 2006, **6**(1): 91-95.
- [16] 王毅力, 黄承贵. 好氧污泥絮体与厌氧颗粒污泥的剪切稳定性分析 [J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(4): 380-385.
- [17] 石英, 全书海, 李志俊, 等. SEM 图像分形维数的影响因素研究 [J]. *黄石理工学院学报*, 2007, **23**(3): 27-30.
- [18] Li X Y, Yuan Y A. Settling velocities and permeabilities of microbial aggregates [J]. *Water Res*, 2002, **36**(12): 3110-3120.
- [19] Li J, Chen Y, Li J, *et al.* Morphological and structural characteristics of aerobic granulation [J]. *J Chem Technol Biotechnol*, 2006, **81**(5): 823-830.
- [20] Mu Y, Ren T T, Yu H Q. Drag coefficient of porous and permeable microbial granules [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, **42**(5): 1718-1723.
- [21] Su K Z, Yu H Q. Formation and characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor treating soybean-processing wastewater [J]. *Environ Sci Technol*, 2005, **39**(8): 2818-2827.
- [22] Mikkelsen L H, Kelding K. The shear sensitivity of activated sludge: An evaluation of the possibility for a standardised floc strength test [J]. *Water Res*, 2002, **36**(12): 2931-2940.
- [23] Zheng Y M, Yu H Q. Determination of the pore size distribution and porosity of aerobic granules using size-exclusion chromatography [J]. *Water Res*, 2007, **41**(1): 39-46.
- [24] Adav S S, Chang C H, Lee D J. Hydraulic characteristics of aerobic granules using size exclusion chromatography [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2008, **99**(4): 791-799.
- [25] Chen M Y, Lee D J, Tay J H, *et al.* Staining of extracellular polymeric substances and cells in bioaggregates [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2007, **75**(2): 467-474.