

好氧颗粒污泥特质及其在工业废水处理中的应用

郑晓英, 陈 卫

(河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 好氧颗粒污泥具有沉降性能好、承受有机负荷高等特质, 较高的水力剪切力有助于形成结构密实、沉降性能良好的颗粒污泥, 并可促进微生物的代谢活性, 能有效地去除重金属和结构复杂的高分子有机物等难降解物质。

关键词 好氧颗粒污泥; 微生物生态; 水力剪切力; 难降解物质

中图分类号 X703 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2005)03-0035-04

Properties of aerobic granular sludge and its application to hardly degradable wastewater treatment

ZHENG Xiao-ying, CHEN Wei

(College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Aerobic granular sludge has specific features of good sedimentation characteristic and high organic loading. High hydraulic shear stress helps to cultivate the more compact and settleable aerobic granular sludge and promote the metabolisms of microorganisms. The application of aerobic granular sludge to industrial wastewater treatment shows that hardly degradable substances such as heavy metals and high molecular organic matters of complicated structure can be removed efficiently.

Key words aerobic granular sludge; microbial ecology; hydraulic shear stress; hardly degradable substance

我国城市污水处理以活性污泥好氧生物处理为主, 活性污泥结构及其沉降性能是保证处理效果的关键。运行中常见问题是曝气池中的污泥浓度低, 容易产生大量的剩余污泥, 同时反应器容积负荷较低(一般 $0.2 \sim 2.0 \text{ kg}(\text{m}^3 \cdot \text{d})$)^[1]、体积庞大, 抗冲击负荷能力弱, 极易引起丝状菌大量生长, 导致污泥膨胀, 处理效率下降, 甚至引起处理工艺瘫痪。近年来, 将生物自絮凝原理应用于好氧反应系统中, 实现好氧污泥的颗粒化, 在反应器中留存大量沉降性好的好氧颗粒状活性污泥, 降低了对污泥沉淀系统的要求, 减少了剩余污泥的排放。好氧颗粒污泥不仅能承受高的有机负荷, 而且集不同性质微生物(好氧、兼氧和厌氧微生物)于一体, 因此它可以应用于工业废水中难降解有机物的去除。国内外对好氧颗粒污泥的研究均尚处在起步阶段。本文结合近年来

国内外最新研究成果, 从水力剪切力对颗粒污泥特质、水力剪切力的影响及其在处理工业废水难降解物质的应用进行讨论, 并提出研究与应用的建议。

1 好氧颗粒污泥特性

1.1 好氧颗粒污泥物化性质

成熟的好氧颗粒污泥外观呈橙黄色, 表面光滑、近似圆形或椭圆形, 粒径一般为 $0.5 \sim 3.0 \text{ mm}$ 。与传统絮状污泥相比, 好氧颗粒污泥具有良好的沉降性, 能保持高污泥浓度, 并能承受高有机负荷。

Dangcong P 等^[2]采用以醋酸钠为有机基质的人工配置城市污水为进水, 溶解氧为 $0.7 \sim 1.0 \text{ mg/L}$ 范围内, 在 SBR 反应器中培养出好氧颗粒污泥。显微镜观察发现, 颗粒污泥的形态近似球形, 直径为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$, 颗粒外观轮廓非常清晰。颗粒

污泥具有良好的沉降性,污泥体积指数(SVI)为 80~100 mL/g,对 COD 的去除率高(2.16 gTOC/(gSS·d)),硝化活性好(0.24 gNH₃-N/(gSS·d))。当溶解氧在 0.7~1.0 mg/L 时,反应器的 NH₃-N 和 COD 容积负荷可分别达到 0.15~0.18 kgNH₃-N/(m³·d),1.5~2.0 kgCOD/(m³·d)。Beun J J 等^[3]在完全混合序批式气提反应器(sequencing batch airlift reactor,SBAR)中培养好氧颗粒污泥。进水有机负荷为 2.5 kg 醋酸酯-COD/(m³·d),接种污泥为传统活性污泥曝气池中的悬浮污泥,在该反应器中一周内就实现了颗粒化。在生物混合液中出现颗粒密度的选择,这是因为颗粒(快速沉淀)、丝状菌及絮状污泥(慢速沉降)有不同沉降速度。稳定运行期中颗粒污泥的平均粒径为 2.5 mm,污泥浓度为 60 g VSS/L 颗粒污泥,沉降速度大于 10 m/h。在该反应器中实现了硝化与反硝化同步进行,较长时间的运行证明了颗粒污泥的稳定性。与序批式鼓气塔(sequencing batch bubble column,SBBC)相比,在进水有机负荷和混合条件相同时,更多的高密度低粒径的颗粒污泥在 SBAR 反应器中获得。与连续流的生物膜气提式反应器(biofilm airlift suspension,BAS)相比,也有更多的高密度颗粒污泥在 SBAR 反应器中生成。Etterer T 等^[4]使用 SBR 反应器,研究不同颗粒污泥在好氧和厌氧/好氧交替环境条件下的生长。反应器进水为人工合成废水,进水有机负荷为 3.6 kgCOD/(m³·d),形成了异养细菌的颗粒化。在实验第一阶段进行 8 周后,颗粒污泥的平均直径为 3.2 mm。第二阶段,采用厌氧/好氧交替操作方式对平均粒径为 3.0 mm 的颗粒污泥进行继续培养。测定两阶段好氧颗粒污泥平均密度分别为 1.044 g/mL,1.048 g/mL。在自由沉淀实验中,测定的单个污泥沉降速度用于评价污泥的孔隙率。试验中只测出沉淀速度大于 2.0 cm/s 的颗粒污泥。计算结果表明,第一阶段实验中的颗粒污泥的孔隙率为 72%,第二阶段实验培养的颗粒污泥孔隙率为 65%。Am Jang 等^[5]使用 SBR 反应器,研究在好氧/缺氧交替条件下的好氧颗粒污泥培养。在反应器运行 50 d 后有不同大小的污泥生成,大部分污泥的粒径为(1±0.35)mm 到(1±0.45)mm,很少超过 2 mm。采用零级反应动力学对硝化反应进行分析,发现大多数硝化反应发生在污泥颗粒表面 300 μm 厚度的区域内。不同反应器中培养的颗粒污泥的性质见表 1。

1.2 好氧颗粒污泥的微生物相

营养物质进入颗粒污泥内部需要克服传质阻力,溶解氧从颗粒外部经表面空隙传递到颗粒内部,形成溶解氧梯度,在颗粒内部造成缺氧区,为兼氧和厌

表 1 不同反应器中培养的颗粒污泥的性质

| 反应器类型 | 颗粒直径/mm | SVI/(mL·g ⁻¹) | 沉降速度/(m·h ⁻¹) | 表观氧利用率/[mgO ₂ /(g·h ⁻¹)] | 比重[(mL) ⁻¹] |
|---------------------|---------|---------------------------|---------------------------|---|-------------------------|
| SBR ^[6] | 平均 1.0 | | | | |
| AUSB ^[7] | 2.0~8.0 | 40.8~143 | | | |
| AUSB ^[8] | 0.5~2.5 | 86.4 | | | |
| SBR ^[9] | 2.35 | 30~40 | | 96.3 | |
| SBR ^[10] | 0.5~1.6 | 20~45 | | 76.2 | 1.0068~1.0072 |
| SBR ^[11] | 大约 1.0 | >16.2 | | | |
| SBR ^[12] | 1.1~2.4 | 50~85 | 30~35 | 55.9~69.4 | |

注:AUSB(aerobic upflow sludge blanket)为上流式好氧污泥床反应器。

氧微生物提供了适宜的生长条件。有研究表明^[13,14],在控制合适的溶解氧条件下,可使得颗粒污泥中多种微生物共存,颗粒污泥具有丰富的生物相。颗粒污泥主要由异养菌和硝化菌组成^[3],颗粒本身的生物相主要有球菌、长短不一的各种杆菌等。显微镜观察发现,在同步脱氮的颗粒污泥外部主要由好氧的丝状菌构成,并作为污泥的颗粒框架,周围附着椭圆状菌体,颗粒污泥的内部丝状菌减少,球菌增多。观察还发现,颗粒污泥外部丝状菌结构紧密且污泥表面孔隙率小,颗粒污泥内部结构相对松散,孔隙率较大。

Dangcong P 等^[2]采用高倍显微镜发现颗粒污泥主要由杆菌类组成,杆菌的头部均指向颗粒中心,同时没有发现丝状菌。Morgenroth 等^[9]采用光电扫描显微镜观察到颗粒污泥是由细菌及其附着生长的酵母菌丝组成,该酵母菌属于地霉菌属(*Geotrichum* sp.)通常在碱性条件下生长。但是酵母菌是作为颗粒的骨架还是作为降解 COD 的主要微生物,仍需要进行深入地研究。Am Jang 等^[5]采用微电极技术和荧光杂交分析(FISH)发现氨氧化细菌主要存在于颗粒的外中层区域。王强等^[15]采用电子扫描显微镜观察到的颗粒污泥中有大量真菌和丝状菌,不同的丝状菌大量缠绕,形成了颗粒的骨架,污泥通常由各种各样的杆菌和球菌组成,它们或单独或呈絮状随机分布在颗粒内部。阮文权等^[16]对同步脱氮好氧颗粒污泥的内部和外部进行电镜扫描,发现大量的球菌主要分布于颗粒污泥的外部,且颗粒外部结构密实,而杆菌主要分布于颗粒污泥的内部,且颗粒内部结构较为松散。

2 水力剪切力对颗粒污泥影响

2.1 对颗粒污泥形成和结构的影响

好氧颗粒污泥可以看成是生物自固定化。与生物膜的形成相似,水力剪切力对好氧颗粒污泥的形成和结构具有重要影响^[17]。Tay 等^[12]报道,当表面

空气上升流速较低时(如 0.8 cm/s),SBR 反应器中没有颗粒污泥发现,仅发现结构松散的絮状污泥(如图 1(a))。但是当表面空气上升流速(2.5 cm/s)较高时,在 SBR 反应器中成功地培养出外形轮廓清晰的颗粒污泥(如图 1(b))。Tay 等^[18]研究了水力剪切力对于 SBR 反应器中颗粒污泥结构的影响。在 SBR 反应器中,表面空气上升流速是颗粒污泥菌群主要的水力剪切力。研究发现,颗粒污泥的比重随着水力剪切力的增加而增加,同时污泥体积指数 SVI 从 180 mL/g 减少到 40 mL/g (如图 2)。需要指出的是,当表面空气上升流速为 0.3 cm/s 时,好氧颗粒化并没有发生,仅观察到松散的絮状污泥(与图 1(a)中相似)。与絮状污泥相比,颗粒污泥的沉降性有很大改善。从图 2 可清晰地看出,表面气体上升流速大,有助于形成结构更为密实的颗粒污泥。事实上,高密度的污泥有着较低的 SVI 值,它能确保泥水分离,这是保证污水处理工艺成功运行、出水稳定的重要条件。Beun 等^[3]的研究也发现表面空气上升流速低在 SBR 反应器中不能培养出颗粒污泥;然而,在表面空气上升流速较高时颗粒化立即发生。这主要是因为高剪切力的作用,才形成了表面光滑、密实和性质稳定的颗粒污泥。Shin 等^[8]采用纯氧曝气的上流式污泥床反应器进行研究,得出污泥的颗粒化受剪切力控制。但是,过高的水力剪切力会引起反应器中大量好氧颗粒污泥的解体并随出水排放,导致反应中 MLSS 下降。好氧颗粒污泥机械强度低,稳定性差,与反应器中水力剪切力较大亦有直接关系^[15]。这些研究充分说明好氧颗粒化与反应器中的水力剪切力有着非常紧密的联系。

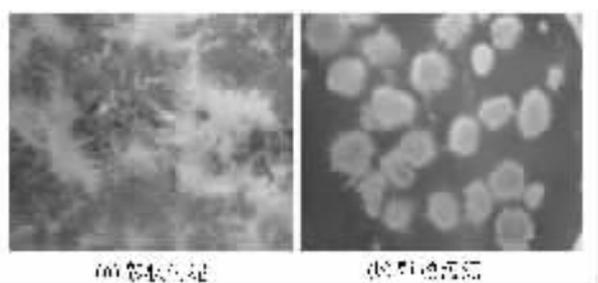


图 1 SBR 反应器中的污泥

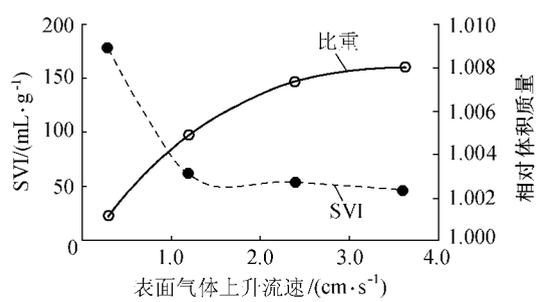


图 2 表面气体上升流速对污泥相对体积质量和 SVI 的影响

2.2 对胞外聚合物的影响

胞外聚合物是与剪切力有关的产物,最早的研究报道与生物膜有关。近来 Tay 等^[18]的研究揭示,在 SBR 反应器中表面空气上升流速对于细胞外聚合物的产量具有重要的影响。污泥胞外聚合物(polysaccharides,PS)和污泥细胞蛋白(proteins,PN)的比值(PS/PN)随着剪切力的增加而增加。值得注意的是,胞外聚合物的浓度远远高于颗粒污泥蛋白的浓度。Vandevivere 等^[19]发现附着生长的生物膜细胞中与蛋白相当的胞外聚合物浓度是自由单一生长细胞的 5 倍。聚合物对于附着生长细菌和自絮凝细菌的积累有重要作用。相比较而言,细胞蛋白对颗粒污泥细菌结构和稳定性的影响相对次要。事实上 SBR 反应器中颗粒污泥的消失与细胞聚合物的急速下降紧密相关^[20]。水力剪切力高能促使好氧颗粒污泥和生物膜分泌更多的细胞聚合物,保证好氧颗粒污泥在现有水力条件下生物结构的平衡。因此细胞聚合物是维持好氧颗粒污泥稳定的非常重要因素之一。

2.3 对微生物代谢活性的影响

微生物代谢活性可用细胞表观氧利用率(specific oxygen utilization,SOUR)描述,通常定义为每单位细胞蛋白每小时消耗的氧量($\text{mgO}_2/(\text{mg}\cdot\text{h})$)。图 3^[15]描述了好氧颗粒污泥在不同水力剪切力作用下的 SOUR^[18]。随着表面剪切力(表面空气上升流速)的增加,好氧颗粒污泥的 SOUR 呈半直线增加。从图 3 可知,好氧颗粒污泥的代谢与水力剪切力紧密相关,显然水力剪切力能刺激颗粒污泥的代谢。微生物代谢的变化也显示了在有压水力条件下有助于形成更为紧密、稳定的生物群体。

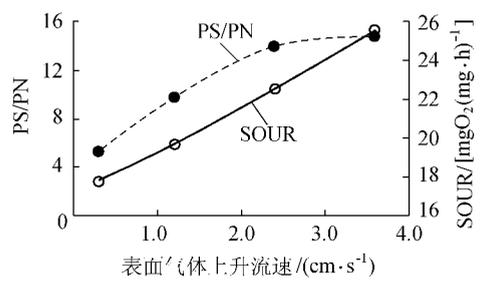


图 3 表面气体上升流速对好氧颗粒污泥 PS/PN 和 SOUR 的影响

3 颗粒污泥处理工业废水中难降解物质

Yu Liu 等^[21]研究好氧颗粒污泥作为新型生物吸附剂用于工业废水中镉离子去除的可行性,进行了不同镉离子(Cd^{2+})浓度和颗粒污泥浓度进水的间歇实验。由实验数据建立动力学模型,描述颗粒污泥对镉离子的生物吸附。结果显示,好氧颗粒表

面对镉离子的生物吸附与进水的 Cd^{2+} 浓度和好氧颗粒浓度紧密相关。研究得出颗粒污泥对 Cd^{2+} 的最大吸附能力为 566 mg/g , 揭示了好氧颗粒污泥对 Cd^{2+} 的高吸附能力, 将其作为高效生物吸附剂, 可用于工业废水中 Cd^{2+} 及其它重金属的去除。SBR 反应器运行参数为: 单周期时间为 $3 \sim 4 \text{ h}$, 实验温度 26°C , pH 值 7.0 , 进水 Cd^{2+} 质量浓度为 $10 \sim 200 \text{ mg/L}$, 颗粒粒径为 1 mm , 污泥浓度为 $50 \sim 200 \text{ mg/L}$ 。

偶氮染料可在厌氧/好氧环境共存的反应器中得到完全的降解, 其关键是确保偶氮染料的还原发生在有氧的生物膜内。Nico C. G. 等^[22]将染料 MO1 (Mordant Orange 1) 作为试验对象, 研究供氧对产甲烷颗粒污泥还原偶氮染料的影响。不同供氧条件下进行间歇实验, 研究得出颗粒污泥的偶氮染料还原速率。如果有其它基质存在, 如乙醇或乙酸酯, 偶氮染料在有氧条件下即可发生还原。染料的还原速率与污泥的氧利用活性紧密相关。研究结果显示, 多种基质的存在有助于污泥对氧的利用, 微量的供氧保证污泥表层有低浓度的氧存在, 同时在污泥内部形成厌氧环境使得偶氮染料得到还原。

B. Tartakovsky 等^[23]研究限制供氧条件下, 颗粒污泥反应器中氯化二苯(1242)的降解。采用两个反应器进行了对比试验, 反应器 1 中同时加入了颗粒污泥和在好氧条件下降解联苯的特殊菌种, 红球菌 (*Rhodococcus sp. M5*); 反应器 2 中只投加了普通颗粒污泥, 对比试验结果显示两个反应器的运行基本没有区别。检测发现, 两个反应器中的氯化二苯得到了有效去除, 仅测出总量为进水 $16\% \sim 19\%$ 的氯化二苯残留在污泥和出水中。同时, 从氯平衡计算中发现表观脱氯速率为 $1.43 \text{ mgPCB}/(\text{gVSS} \cdot \text{d})$ (其中 PCB 为 polychlorinated biphenyl, 多氯联苯)。两个反应器中检测到的中间产物有联甲苯、苯酸以及单联苯酸。在单级厌氧-好氧反应器中, 利用氧化还原的综合作用基本实现了对氯化二苯的生物降解。

4 发展与展望

好氧颗粒污泥利用微生物的自絮凝形成结构密实的菌体, 能承受较高的有机负荷, 具有良好的沉降性能。水力剪切力是对好氧颗粒污泥的结构、形成, 微生物胞外聚合物的产生及其代谢活性等方面的重要影响因素。同时好氧颗粒污泥还可用于工业废水中难降解物质(重金属和复杂有机物)的处理, 具有良好的应用前景。

在有关好氧颗粒污泥的形成机理、微生物生理生态及其微生态系统特性等方面的研究尚不够深入, 对于好氧颗粒污泥应用于工业废水处理也仅局

限于部分单一难降解基质的研究。随着对废水处理要求的提高, 废水高效生物处理技术的不断开发和应用, 相关问题亟待进一步深入研究与探索。

参考文献:

- [1] 高廷耀. 水污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 164 ~ 165.
- [2] Dangcong P, Bernet N, Delgenes J P, et al. Aerobic granular sludge—a case report[J]. Water Research, 1999, 33: 890 ~ 893.
- [3] Beun J J, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor[J]. Water Research, 2002, 36: 702 ~ 712.
- [4] Etterer T, Wilderer P A. Generation and properties of aerobic granular sludge[J]. Water Sci Technol, 2001, 43(3): 19 ~ 26.
- [5] Jang Am, Yoon Young-Han. Characterization and evaluation of aerobic granules in sequencing batch reactor[J]. Journal of Biotechnology, 2003, 105: 71 ~ 82.
- [6] Liu Y, Woon K. Influence of phenol on cultures of acetate-fed aerobic granular sludge[J]. Lett Appl Microbiol, 2002, 3: 162 ~ 165.
- [7] Mishima K, Nakamura M. Self-immobilization of aerobic activated sludge: a pilot study of the aerobic upflow sludge blanket process in municipal sewage treatment[J]. Water Sci Technol, 1991, 23: 981 ~ 990.
- [8] Shin H S, Lim K H, Park H S. Effect of shear stress on granulation in oxygen aerobic upflow sludge reactor[J]. Water Sci Technol, 1992, 26: 601 ~ 605.
- [9] Morgenroth E, Sherden T. Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor[J]. Water Research, 1997, 31: 3191 ~ 3194.
- [10] Zhu J R, Liu C X. Cultivation and physico-chemical characteristics of granular activated sludge in alternation of anaerobic/aerobic process[J]. Chin J Environ Sci, 1999, 20: 38 ~ 41.
- [11] Beun J J, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Aerobic granulation[J]. Water Sci Technol, 2000, 41(4 ~ 5): 41 ~ 48.
- [12] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge reactor[J]. J Appl Microbiol, 2001, 91: 168 ~ 175.
- [13] 阮文权, 陈坚. 同步硝化反硝化(SND)好氧颗粒污泥脱氮过程初步研究[J]. 安全与环境学报, 2003, 3(5): 3 ~ 6.
- [14] 白晓慧. 利用好氧颗粒污泥实现同步硝化反硝化[J]. 中国给水排水, 2002, 18(2): 26 ~ 28.
- [15] Wang Qiang, Du Guo-cheng, Chen Jian. Aerobic granular sludge cultivated under the selective pressure as a driving force[J]. Process Biochemistry, 2004, 39: 557 ~ 563.
- [16] 阮文权, 陈坚. 同步脱氮好氧颗粒污泥的特性及其反应过程[J]. 中国环境科学, 2003, 23(4): 380 ~ 384.

(下转第 41 页)

年之前开工建设一批山丘区的供水水库、新建部分平原水库、新建和续建地下水库,完成大中型病险水库加固工程,完成 60% 以上的小型险库除险任务。重点开工建设南水北调东线山东段、胶东调水和沂沭泗东调南下三大重点工程,确保贯穿全省 T 型供水大动脉的按时通水,实现黄河水、长江水、当地水的联合调度。南水北调东线工程实施后,遇到特枯或者连续枯水年份,应加长调引长江水的时间,多引长江水,以保证山东省生态用水的需求。

3.2 加快建设节水型社会

目前山东省灌溉水利用系数平均在 0.50 左右,平均每立方米水生产粮食仅 1 kg 左右,而瑞典、英国等发达国家水的利用效率均在 80% 以上。2002 年山东省灌溉用水 170 亿 m^3 ,如利用效率提高到 60%,就可以节约 20 多亿 m^3 的水资源。在工业节水方面,应积极推行清洁生产,实现废水资源化,鼓励综合利用海水、微咸水等非传统水资源。根据水资源条件,合理调整产业结构和工业布局,缺水地区要严格限制新建高耗水项目^[4]。对水资源实行计量定额管理,充分发挥经济杠杆在水资源配置中的基础性作用,引导人们自觉调整用水结构和数量,调动全社会节水和防治水污染的积极性。

3.3 严格控制排放总量,继续削减污染

根据水资源状况和水功能区的要求,确定各流域内各地区水体纳污排放总量,实行排污许可制度,并逐步实行排污权交易制度。合理布局和建设城市污水处理厂,提高全省城市生活污水处理能力。加大工业废水治理力度,确保达标排放。尤其是造纸及纸制品业、食品制造业、化学原料及化学制品制造业三个重污染行业,其 COD 排放量占工业排放总量的 68.3%,而工业增加值合计仅占 12.21%。应加快技术改造,实施清洁生产,减少重污染行业 COD

产生量,同时在工业结构调整时应降低重污染行业的比重。

3.4 着力完善水资源监测网络,建立应急反应系统

尽快完善山东省水资源质量监测站网,在现有地表水水质监测站网基础上,增设地下水水质监测站网,形成一个从地表水到地下水的比较完整的水质监测站网,并完善监测制度,搞好监测工作。在此基础上,全面监控全省水环境安全状况,按照统一领导、分级负责、反应及时、措施果断、依靠科学、加强合作的原则,建立山东省水环境安全危机应急系统,做到发现早、抢救及时,最大限度地减少损失。

3.5 提高公众参与意识,为水资源保护体系建设营造良好的社会氛围

充分利用广播、电视、报刊等新闻媒介,广泛开展多层次、多形式的水情和水法规宣传教育活动,不断提高全民水资源意识,把建设节水防污型社会变成每个公民的自觉行动。借助新闻媒体加强舆论监督,对浪费水、破坏水的行为及时予以曝光。同时要采取措施,大力宣传和推广科学用水、节约用水,使全社会形成“珍惜水、节约水、保护水”的良好生产和生活方式。

参考文献:

[1]《山东水利年鉴》编辑部. 山东水利年鉴 2003[M]. 济南:山东省地图出版社 2003.41~67.
 [2]山东省统计局. 山东省统计年鉴 2003[M]. 北京:中国统计出版社 2004.32~37.
 [3]刘江,肖辉,李欣,等. 山东省水资源衰减与水环境破坏状况分析[J]. 水资源保护, 2003(5):47~49.
 [4]曹永凯. 山东省地下水资源开发与保护综合研究[J]. 中国地质灾害与环境学报, 2003(4):39~43.

(收稿日期 2004-11-09 编辑 舒建)

(上接第 38 页)

[17]Liu Yu ,Tay Joo-hwa. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge[J]. Water Research 2002, 36 :1653 ~ 1665.
 [18]Tay J H ,Liu Q S ,Liu Y. The effects of shear force on the formation ,structure and metabolism of aerobic granules[J]. Appl Microbiol Biotechnol 2001, 57 227 ~ 233.
 [19] Vandevivere P ,Kirchman D L. Attachment stimulates exopolysaccharide synthesis by a bacteria[J]. Appl Environ Microbiol ,1993, 59 3280 ~ 3286.
 [20]Tay J H ,Liu Q S ,Liu Y. The role of cellular polysaccharides in the formation and stability of aerobic granules[J]. Lett Appl

Microbiol 2001, 33 222 ~ 226.
 [21]Liu Yu ,Yang Shu-fang ,Xu Hui ,et al. Biosorption kinetics of cadmium(II) on aerobic granular sludge [J]. Process Biochemistry 2003, 38 997 ~ 1001.
 [22]Tan Nico C G ,Lettinga Gatzke ,Field Jim A. Reduction of the azo dye Mordant Orange 1 by methanogenic granular sludge exposed to oxygen[J]. Bioresource Technology ,1999, 67 35 ~ 42.
 [23]Tartakovsky B ,Michotte A ,Cadieux J C A ,et al. Degradation of Aroclor 1242 in a single-stage coupled anaerobic/aerobic bioreactor[J]. Water Research 2001, 35 4323 ~ 4330.

(收稿日期 2004-06-11 编辑 舒建)