

微孔曝气器孔径与运行气量对微孔曝气氧传质的影响研究

贾荣畅¹ 刘颖² 朱燕³ 庄健³ 尹训飞³ 齐鲁³ 王洪臣³ 张源凯^{3#}

(1.山东省化工研究院,山东 济南 250014;2.中国科学院生态环境研究中心,北京 100085;

3.中国人民大学环境学院,北京 100872)

摘要 曝气是污水生物处理最重要的单元之一,也是能耗最高的单元,微孔曝气氧传质影响因素的探究一直是污水处理领域的研究热点。微孔曝气器的孔径与其运行气量是影响微孔曝气氧传质的重要因素。在 1.5 m 水深条件下对不同孔径的钟罩型刚玉微孔曝气器在不同运行气量条件下的充氧性能进行了评价。结果表明,随微孔曝气器孔径增大,标准氧总转移系数(K_{L,a_s})、标准氧转移速率(SOTR)、阻力损失(RL)、标准氧转移效率(SOTE)及理论动力效率(SAE)减小;随运行气量增大, K_{L,a_s} 、SOTR、RL 显著增大,而 SAE、SOTE 减小。

关键词 微孔曝气 氧传质 孔径 运行气量 充氧性能

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.08.014

Effects of pore diameter and air flow rate on oxygen mass transfer in fine pore aeration JIA Rongchang¹, LIU Ying², ZHU Yan³, ZHUANG Jian³, YIN Xunfei³, QI Lu³, WANG Hongchen³, ZHANG Yuankai³, (1. Chemical Technology Academy of Shandong Province, Jinan Shandong 250014; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085; 3. School of Environment & Natural Resource, Renmin University of China, Beijing 100872)

Abstract: Aeration system was one of the most important parts in the wastewater treatment plants, and accounted for the largest fraction of energy consumption. Research on the impact factors of oxygen mass transfer had received considerable attention in wastewater treatment field. Pore diameter and air flow rate were two important factors that affected the oxygenation performance. The paper studied the impacts through a pilot test using the corundum bell-type fine bubble diffusers at 1.5 m water depth. The results showed that K_{L,a_s} , SOTR, RL, SOTE and SAE decreased with the pore diameter increasing; however, K_{L,a_s} , SOTR, RL increased with the air flow rate increasing and SAE, SOTE decreased with air flow rate increasing.

Keywords: fine bubble aeration; oxygen mass transfer; pore diameter; air flow rate; oxygenation performance

截至 2013 年 6 月,我国已建成污水处理厂 3 500 座,基础建设已基本完成,污水处理行业进入提效改造阶段。作为污水处理的一个必要单元,曝气系统运行能耗占污水处理总能耗的 45%~75%^[1],节能潜力巨大。通过研究微孔曝气氧传质的影响因素,以此为依据,改善微孔曝气的充氧性能对污水处理节能降耗意义巨大^[2-5]。

在污水处理曝气系统的设计运行中,影响曝气系统充氧性能的因素很多^[6-12],微孔曝气器的孔径与其运行气量是最重要的两个因素。目前,国内外对微孔曝气器充氧性能与孔径、运行气量的关系研究不多,加强这些方面研究对完善曝气的氧传质理论体系具有一定价值,对曝气环节的节能降耗也具

有重要的现实意义。

本研究使用国内污水处理领域常见的不同孔径的微孔曝气器,测定其在不同运行气量条件下的充氧性能,得到充氧性能与孔径、运行气量变化的规律,为指导污水处理曝气系统的设计与运行提供参考。

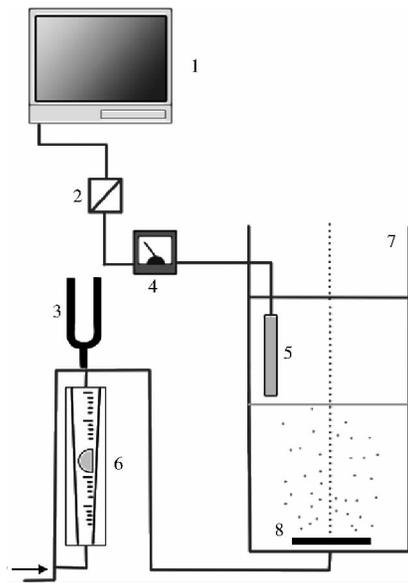
1 试验装置与方法

1.1 试验装置

充氧性能试验装置如图 1 所示,测试主体为一个 $\Phi 0.5 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ 的有机玻璃圆柱形曝气池,曝气时水深 1.5 m,顶端开口。底部安装一个微孔曝气器,与空压机气管相连。在曝气池水下 0.5 m 处安

第一作者:贾荣畅,男,1981 年生,本科,高级工程师,主要从事化工环保、污水处理工作。# 通讯作者。

置一个溶解氧探头,并连接在线数据采集系统,在线动态存储溶解氧数据。



1—数据采集系统;2—无纸记录仪;3—U型管;4—溶解氧控制器;
5—溶解氧探头;6—气体转子流量计;7—曝气池;8—微孔曝气器

图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental set-up

1.2 设备与仪器

钟罩 178 型刚玉微孔曝气器(直径 178 mm); WWA-0.4/7 型空压机(全无油润滑空气压缩机);气体转子流量计(量程 10.00 m³/h,精度±2%);压力表(精度±2%);气温、水温表(精度±0.1℃);DO4200 微电脑溶解氧控制器(精度±0.5%);XSR10R 无纸记录仪;自制 U 型管。

1.3 试验材料

脱氧剂(Na₂SO₃,工业纯);催化剂(CoCl₂·6H₂O,工业纯);试验用水(自来水,总溶解性固体(TDS)约为 300 mg/L)。

1.4 原理与方法

本试验的原理为气液传质双膜理论^[13]。试验按照《曝气器清水充氧性能测定》(CJ/T 3015.2—1993)进行,同时采用美国最新的清水氧传质测试标准^[14]提供的修正方法对 TDS 进行了修正。

微孔曝气器孔径分 90~140 μm 9 个梯度,运行气量为 0.25~1.50 m³/h 5 个梯度。

2 结果与讨论

评价微孔曝气器的充氧性能主要有 5 个指标:

(1)标准氧总转移系数(K_La_s),是指曝气器在一个大气压、20℃的标准条件下和单位传质推动力作用下,单位时间内向单位体积液体中传递的氧量;(2)

标准氧转移速率(SOTR),是曝气器在单位时间内向液体中传递的氧量;(3)理论动力效率(SAE),表示在测试工况下消耗单位电能使通入的氧气转移到水体中的量;(4)标准氧转移效率(SOTE),是曝气器在标准状态、测试工况下,传递到水中的氧量占曝气器供气量的体积分数;(5)阻力损失(RL),是指由于具有黏性,空气通过曝气器时与曝气器接触并发生相对运动时产生的摩擦阻力。

2.1 微孔曝气器孔径对氧传质的影响

2.1.1 K_La_s、SOTR 与微孔曝气器孔径的关系

由图 2 和图 3 可知,运行气量一定时,随着微孔曝气器孔径的增大,K_La_s、SOTR 整体呈减小趋势,如运行气量为 0.25 m³/h 时,K_La_s由 90 μm 微孔曝气器的 0.063 8 min⁻¹下降至 140 μm 微孔曝气器的 0.047 8 min⁻¹,SOTR 由 90 μm 微孔曝气器的 0.013 5 kg/h 下降至 140 μm 微孔曝气器的 0.010 1 kg/h。

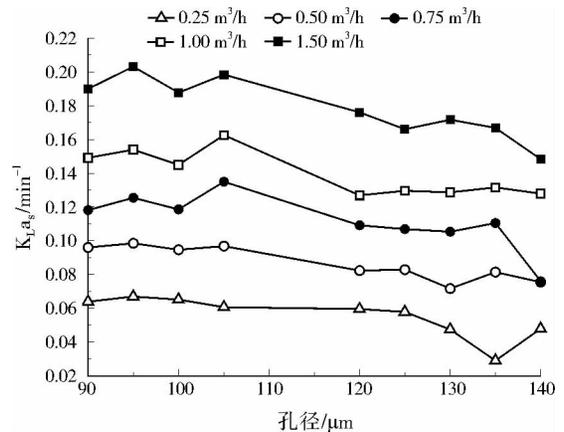


图 2 K_La_s随微孔曝气器孔径变化曲线

Fig.2 K_La_s changes with pore diameter

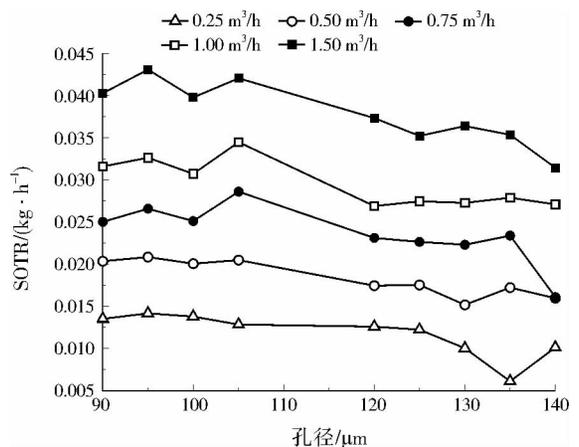


图 3 SOTR 随微孔曝气器孔径变化曲线

Fig.3 SOTR changes with pore diameter

微孔曝气器孔径对于微孔曝气器产生气泡的尺寸有直接影响。一般认为,相同运行气量下,孔径越大,微孔曝气器出气气泡越大,从而对微孔曝气产生

正反两方面的影响。一方面,气泡越大,对于测试液体的搅动作用越强,测试液体的紊动程度越强,既可加快气泡周围待测液体的更新速度,保证冲入液体的氧能迅速扩散,保持较大的氧亏,又可减小液膜厚度,减小传质阻力,均有利于氧传质;另一方面,气泡越大,比表面积会减小,使得气液传质界面面积大大减小,不利于氧传质。由于上述正反两方面的作用, K_{L,a_s} 与SOTR呈现下降的趋势,但幅度不大。这表明,本试验条件下,随着微孔曝气器孔径的增大,传质界面面积的减小对于氧传质的影响更直接明显,成为影响的主要因素。

2.1.2 RL与微孔曝气器孔径的关系

由图4可知,运行气量一定时,RL随着微孔曝气器孔径增大而整体呈现减小的趋势,如运行气量为 $0.25\text{ m}^3/\text{h}$ 时,RL由 $90\ \mu\text{m}$ 微孔曝气器的 $3\ 300\text{ Pa}$ 下降至 $140\ \mu\text{m}$ 微孔曝气器的 $1\ 600\text{ Pa}$ 。

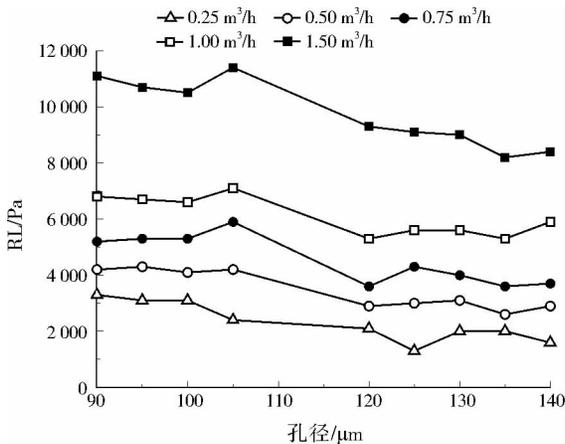


图4 RL随微孔曝气器孔径变化曲线
Fig.4 RL changes with pore diameter

RL与气体流速的平方成正比,与过流断面的直径成反比。张祝新等^[15]的研究表明,通过曝气器的气体流速越大,RL增加越迅速,其推导出RL与气体流速的关系为式(1)。因此,微孔曝气器孔径越大,过流断面的直径越大,同时可导致出气面积变大,在运行气量一定时,气体流速减小,RL减小。

$$R = kv^2/2g + c \quad (1)$$

式中: R 为RL,Pa; k 为阻力系数, N/m^3 ; v 为气体流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; c 为常数,Pa。

2.1.3 SOTE与微孔曝气器孔径的关系

由图5可知,运行气量一定时,随着微孔曝气器孔径的增大,SOTE整体呈减小趋势,如运行气量为 $0.25\text{ m}^3/\text{h}$ 时,SOTE由 $90\ \mu\text{m}$ 微孔曝气器的 17.9% 下降至 $140\ \mu\text{m}$ 微孔曝气器的 13.5% 。据2.1.1节,由于微孔曝气器孔径增大,出气气泡变大,从而显著

减小气液传质界面面积,使得传递到水中的氧量减少。因此,在同一运行气量条件下,SOTE随孔径增大呈现下降的趋势。

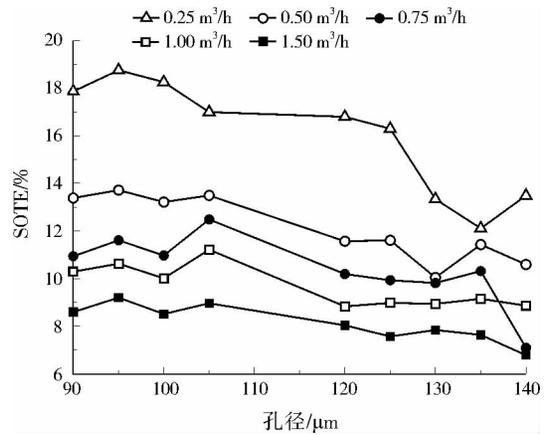


图5 SOTE随微孔曝气器孔径变化曲线
Fig.5 SOTE changes with pore diameter

2.1.4 SAE与微孔曝气器孔径的关系

由图6可知,运行气量一定时,随着微孔曝气器孔径增大,SAE整体呈减小趋势,如运行气量为 $0.25\text{ m}^3/\text{h}$ 时,SAE由 $90\ \mu\text{m}$ 微孔曝气器的 $10.7\text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 下降至 $140\ \mu\text{m}$ 微孔曝气器的 $8.8\text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

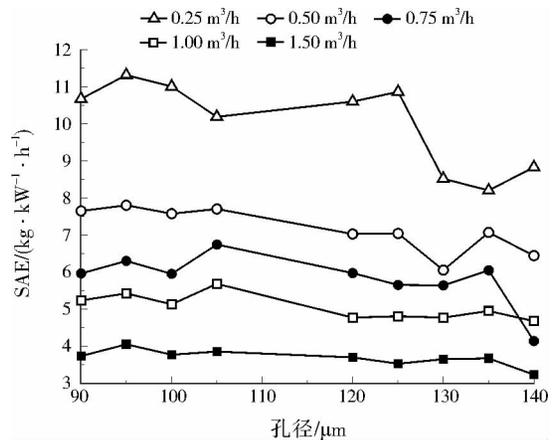


图6 SAE随微孔曝气器孔径变化曲线
Fig.6 SAE changes with pore diameter

SAE为SOTR与理论电耗的比值。根据2.1.1节的分析,SOTR随着微孔曝气器孔径的增大而减小。本试验中理论电耗主要与RL有关,根据2.1.2节的分析,RL随着微孔曝气器孔径增大而减小,理论电耗减小。这表明,在试验条件下,微孔曝气器孔径增大对微孔曝气氧传质的抑制作用大于对于能耗的抑制作用。但5个运行气量下, $95\ \mu\text{m}$ 微孔曝气器的SAE要高于 $90\ \mu\text{m}$,表明微孔曝气器在该试验条件下可能在 $95\ \mu\text{m}$ 左右存在拐点。

2.2 微孔曝气器运行气量对氧传质的影响

2.2.1 K_{L,a_s} 及 SOTR 与微孔曝气器运行气量的关系

为了定性研究运行气量对曝气器充氧性能的影响规律和试验成本,单独选取 5 种孔径(90、100、120、130、140 μm)的微孔曝气器在不同运行气量下试验。 K_{L,a_s} 与 SOTR 随运行气量变化关系如图 7 和图 8 所示。

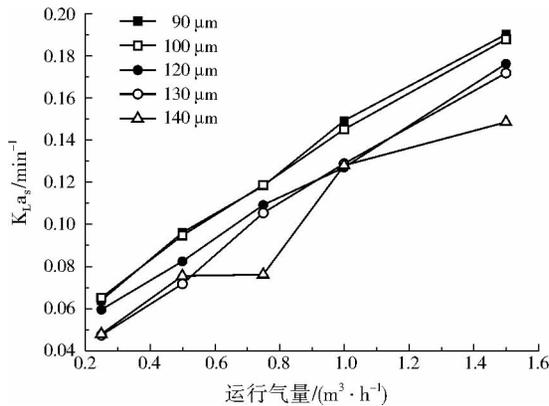


图 7 K_{L,a_s} 随运行气量变化曲线
Fig.7 K_{L,a_s} changes with air flow rate

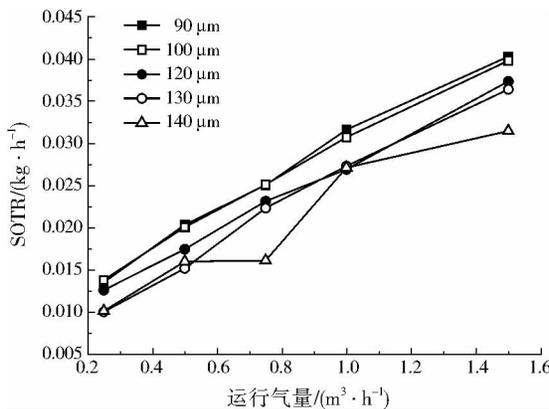


图 8 SOTR 随运行气量变化曲线
Fig.8 SOTR changes with air flow rate

当微孔曝气器一定时, K_{L,a_s} 、SOTR 随着运行气量的增大而明显增大。运行气量从 0.25 m^3/h 增大至 1.50 m^3/h 时,90 μm 微孔曝气器的 K_{L,a_s} 从 0.063 8 min^{-1} 单调上升至 0.190 0 min^{-1} ,增加了近两倍;SOTR 从 0.013 8 kg/h 单调升高到 0.039 8 kg/h 。

运行气量越大,气体的搅拌作用越明显,这就增大了所测液体的紊动程度,根据 2.1.1 节,加大紊动程度对于氧的传质有正面效果。同时,运行气量越大,含气率越大,使 K_{L,a_s} 和充氧能力随着运行气量的增加而显著增大。但运行气量增大,一方面使气泡直径变大,一定程度上减小气液传质界面面积,另一方面又使气泡运动速度增大,从而减小停留时间,这两方面均不利于氧的传质。从总体上看,运行气量的

增大带来的正面效应强于负面效应,表现在 K_{L,a_s} 和 SOTR 的显著增大。

2.2.2 RL 与微孔曝气器运行气量的关系

由图 9 可知,RL 随着运行气量的增大明显增大,而且增大幅度越来越大。运行气量从 0.25 m^3/h 增大至 1.50 m^3/h 时,140 μm 微孔曝气器的 RL 从 1 600 Pa 单调升高到 8 400 Pa。由 2.1.2 节的分析可知,当微孔曝气器一定时,运行气量增大,气体流速增大,因此 RL 与气体流速的平方成正比,增速更明显。

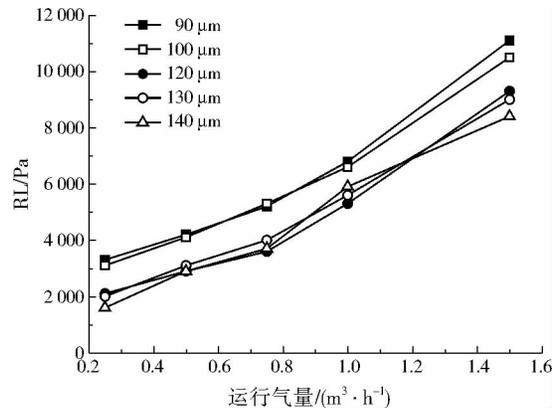


图 9 RL 随运行气量变化曲线
Fig.9 RL changes with air flow rate

2.2.3 SOTE 与微孔曝气器运行气量的关系

由图 10 可知,SOTE 随着运行气量的增大而减小。运行气量从 0.25 m^3/h 增大至 1.50 m^3/h 时,90 μm 微孔曝气器的 SOTE 从 17.9% 单调下降至 8.6%。运行气量增大,气泡直径增大,从而使得气液传质界面面积一定程度上减小;另一方面,运行气量增大,气体流速显著增大,从而使得气体停留时间减小,也即气液实际接触时间减小。但同时,由于停留时间的增大,气泡因碰撞而并聚的可能性减小,一定程度下有利于氧的传质。从整体上看,运行气量的增大带来的正面效应弱于负面效应,SOTE 随着运行气量的增大而降低。

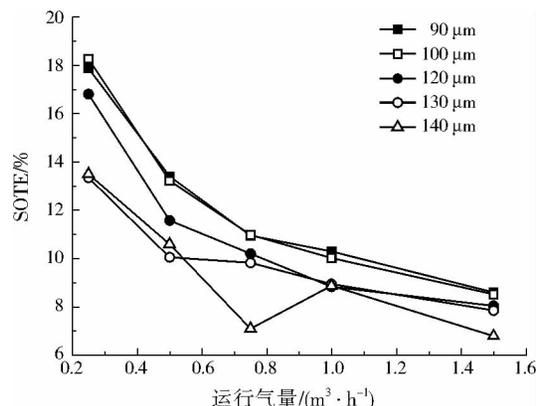


图 10 SOTE 随运行气量变化曲线
Fig.10 SOTE changes with air flow rate

2.2.4 SAE 与微孔曝气器运行气量的关系

由图 11 可知,SAE 随着运行气量的增大呈现下降的趋势。运行气量从 0.25 m³/h 增大至 1.50 m³/h 时,90 μm 微孔曝气器的 SAE 从 10.67 kg/(kW·h) 降低至 3.74 kg/(kW·h)。微孔曝气器一定时,运行气量越大,气体流速明显增大,也即通过微孔曝气器的气体流量越大,RL 显著增大。在增大运行气量,使得 SOTR 与理论能耗都显著增大,但理论能耗增大更显著,因此表现为 SAE 降低。

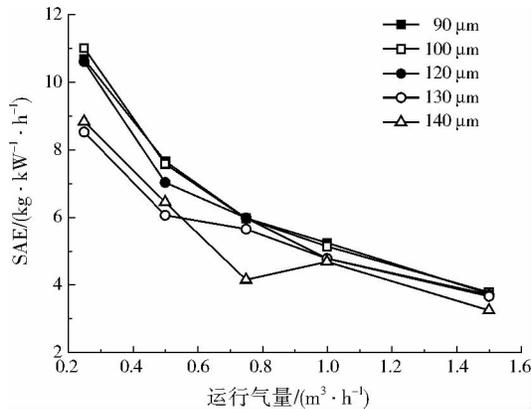


图 11 SAE 随运行气量变化曲线
Fig.11 SAE changes with air flow rate

3 结 论

(1) 运行气量一定时,随微孔曝气器孔径增大, K_{L,a_s} 、SOTR、RL、SOTE 及 SAE 减小。

(2) 微孔曝气器孔径一定时,随运行气量增大, K_{L,a_s} 、SOTR、RL 显著增大,而 SAE、SOTE 减小。

参考文献:

[1] REARDON D J. Turning down the power[J]. Civil Engineering, 1995, 65(8): 54-56.

[2] 梁远, 王佳伟, 李洁, 等. 微孔曝气器充氧性能变化对污水处理厂能耗的影响[J]. 给水排水, 2011, 37(1): 42-45.

[3] 林荣忱, 李金河, 林文波. 污水处理厂泵站与曝气系统的节能途径[J]. 中国给水排水, 1999, 15(1): 21-23.

[4] 张传义, 袁丽梅, 张雁秋. 曝气强度对膜污染的影响[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(8): 580-582.

[5] ROSSO D, STENSTROM M K. Surfactant effects on α -factors in aeration systems[J]. Water Research, 2006, 40(7): 1397-1404.

[6] 庄健, 王洪臣, 刘国华, 等. 曝气密度对曝气系统充氧性能的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(7): 50-54.

[7] WEUSTER BOTZ D, ALTENBACH REHM J, HAWRYLENKO A. Process-engineering characterization of small-scale bubble columns for microbial process development[J]. Bioprocess

and Biosystems Engineering, 2001, 24(1): 3-11.

[8] 张闯, 陶涛, 李尔, 等. 两种曝气设备的清水曝气充氧实验研究[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(1): 25-27.

[9] 汤利华, 孟广耀. 曝气器的最优孔径分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(7): 775-780.

[10] 范海涛, 王洪臣, 齐鲁, 等. 污泥浓度对微孔曝气氧传质过程的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(12): 4305-4309.

[11] 罗涛, 王洪臣, 齐鲁, 等. 总溶解性固体及表面活性剂对微孔曝气氧传质过程影响的中试研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2066-2070.

[12] 李军, 商卫纯, 蔡娟, 等. 不同曝气强度下活性污泥中松散束缚型胞外聚合物组分含量及其对污泥沉降性能的影响[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(4): 6-10.

[13] 高习群. 气液界面传质机理与强化[D]. 天津: 天津大学化工学院, 2008.

[14] ASCE/EWRI 2-06. Measurement of oxygen transfer in clean water[S].

[15] 张祝新, 程晓新. 对工程流体力学中节流孔口流量特性的讨论[J]. 机床与液压, 1999(6): 68.

编辑: 黄 苇 (收稿日期: 2015-01-27)

保尔森基金会与国家发展与改革委员会开展合作

北京—保尔森基金会与国家发展与改革委员会日前在北京举行签约仪式, 正式宣布为期 3 年的建设中国国家公园体制合作框架。双方此次合作将探索国家公园体制最佳建设和管理模式, 助力中国在全国 9 个省试点国家公园体制建设, 使之既符合中国国情, 又与国际接轨。

目前, 中国共有各种类型数千个保护地, 包括自然保护区、风景名胜区、世界文化自然遗产、森林公园、地质公园等。保护地总面积约占中国陆地国土面积的 18%, 高于世界平均水平。这些保护地却因法律、政策和管理等障碍, 未能充分发挥其在保护中国丰富且独特的生物多样性、重要生态系统和珍贵文化自然遗产资源等方面作用。

保尔森基金会将帮助中国有选择地吸收和借鉴包括美国在内的世界上其他国家成功的国家公园管理模式, 应对中国国家公园体制建设面临的诸多挑战。

根据合作框架协议约定, 保尔森基金会将邀请美国国家公园方面的顶尖专家为在协议框架下与国家发改委共同开发的研究和规划项目提供技术支持。此外, 保尔森基金会还将为中国国家公园管理者和决策者提供能力培训。

(摘自《中国环境报》2015-06-12)