

通气量及曝气密度对微孔曝气器充氧性能影响的中试研究*

尹训飞 范海涛 齐鲁 王洪臣 魏延苓 蒋松竹

(中国人民大学 环境学院 北京 100872)

摘要: 通气量及曝气密度是曝气系统重要的运行参数,在中试条件下,以充氧能力和氧利用率为评价指标,研究了橡胶膜及刚玉微孔曝气器在不同通气量及曝气密度下充氧性能的变化规律。结果表明:橡胶膜微孔曝气器的充氧能力随通气量及曝气密度的增大而增大,氧利用率随通气量及曝气密度的提高先增大后减小。刚玉微孔曝气器充氧能力随曝气密度的增大而增大,氧利用率随通气量的增大而减小,而随曝气密度的增大先增大后减小。橡胶膜微孔曝气器氧利用率最大时,其最佳通气量为 $3.0\text{ m}^3/\text{h}$,最佳曝气密度为 $4.5\% \sim 5.5\%$,刚玉微孔曝气器最佳曝气密度为 $11\% \sim 15\%$ 。

关键词: 微孔曝气器; 通气量; 曝气密度; 充氧能力; 氧利用率

DOI: 10.13205/j.hjgc.201507007

PILOT STUDY ON INFLUENCE OF AIR FLOW RATE AND DIFFUSER DENSITY ON OXYGENATION PERFORMANCE OF FINE-PORE DIFFUSER IN AERATION SYSTEM

Yin Xunfei Fan Haitao Qi Lu Wang Hongchen Wei Yanling Jiang Songzhu

(School of Environment & Natural Resource, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Air flow rate and diffuser density are two important parameters of aeration system. In order to study the rules of oxygenation performance of fine-pore membrane and ceramic diffuser under different air flow rate and diffuser density on pilot scale research, oxygenation capacity and oxygen transfer efficiency were used as evaluation indexes. For the fine-pore membrane diffuser, the results showed that the oxygenation capacity increased with improving air flow rate and diffuser density. Oxygen transfer efficiency increased when air flow rate was from 0 to $3.5\text{ m}^3/\text{h}$, and then decreased when air flow rate was from $3.5\text{ m}^3/\text{h}$ to $8.0\text{ m}^3/\text{h}$. As diffuser density increased, the oxygen transfer efficiency decreased first, then increased. For the ceramic diffuser, the results showed that the oxygenation capacity increased with improving diffuser density. Oxygen transfer efficiency decreased with air flow rate increased. As diffuser density increased, the oxygen transfer efficiency increased firstly, then decreased. The optimum air flow rate of single fine-pore membrane diffuser was about $3.0\text{ m}^3/\text{h}$ and the optimum range of diffuser density was $4.5\% \sim 5.0\%$, the optimum range of diffuser density of ceramic diffuser was $11\% \sim 15\%$.

Keywords: fine bubble diffuser; air flow rate; diffuser density; oxygenation capacity; oxygen transfer efficiency

0 引言

曝气系统作为污水处理厂的核心单元,能耗占整个厂能耗的 $45\% \sim 75\%$ ^[1-3]。曝气器作为曝气系统的核心设备,充氧性能的好坏对污水处理厂能否高效运行至关重要。在污水处理过程中,影响曝气充氧性

能的因素有很多^[4-7],其中通气量和曝气密度是2个非常重要的因素^[8-9]。通气量大小和污水厂能耗高低直接相关,曝气密度(指曝气面积占曝气系统服务总面积的比率)间接反映了曝气系统曝气器的数量。因此,通气量和曝气密度与污水厂建设及运营成本密切相关。

目前,橡胶膜及刚玉微孔曝气器广泛应用于国内外污水处理厂^[10-11],橡胶膜及刚玉微孔曝气器分别

* 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA063404);国家水体污染控制与治理重大专项(2013EX07314-001)。

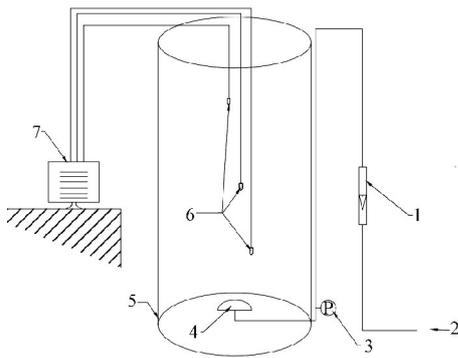
收稿日期:2014-10-14

为刚性孔和柔性孔材质,其充氧性能并不完全相同。文献认为,对于微孔曝气器,通气量会影响氧转移系数,通过改变产生气泡的直径大小,改变气泡运动速率和影响液体主相搅拌,进而影响充氧性能;国内外对曝气密度影响充氧性能机理以及曝气密度范围研究较少,特定评价指标下微孔曝气器的最佳通气量及曝气密度范围并未明确^[12-14],国内对不同通气量及曝气密度对微孔曝气器充氧性能的中试研究甚少。本研究采用国内应用较多的橡胶膜及刚玉微孔曝气器,以充氧性能(SOTR)和氧利用率(SOTE)为评价指标,在中试条件下研究了不同通气量及曝气器密度下橡胶膜及刚玉微孔曝气器充氧性能的变化规律,初步得出橡胶膜微孔及刚玉微孔曝气器运行的最佳通气量、最佳曝气密度范围,为曝气系统的设计与运行控制提供参考。

1 试验部分

1.1 试验装置

中试装置如图1所示,主体为 $\phi 1.5\text{ m} \times 7\text{ m}$ 的圆柱形曝气池。有效水深为6 m,橡胶膜及刚玉微孔曝气器安装在曝气池底部,在曝气池水面中部及距底0.5 m处各安装1个溶解氧传感器,并连接溶氧仪、无纸记录仪和计算机,在线动态存储DO数据。



1—流量计; 2—进气口; 3—压力测量装置; 4—曝气器;
5—测试装置; 6—溶解氧测定仪; 7—溶解氧记录仪。

图1 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experiment

1.2 设备与仪器

SKK 橡胶膜微孔曝气器: 盘式,直径为235 mm,材质为三元乙丙橡胶(EPDM);刚玉微孔曝气器: 盘式,2种直径分别为178,300 mm,材质为陶瓷;空压机: 上海鲁辛实业有限公司,全无油润滑空气压缩机,WWA-0.4/7;气体转子流量计: 量程为 $16\text{ m}^3/\text{h}$,精度为 $\pm 2\%$;压力表: 精度为 $\pm 2\%$;气温、水温表: 精度为

$\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$;在线溶解氧测定仪: 精度为0.5%;U型管: 自制U型管。中试曝气器塔如图2所示。



图2 中试曝气器塔

Fig. 2 A pilot scale aeration tank

1.3 试验材料

脱氧剂: Na_2SO_3 ,工业纯;催化剂: $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,工业纯;试验用水: 自来水,初始总溶解性固体(TDS)约为300 mg/L。

1.4 测试方法

试验原理是由Whitman和Lewis提出的双膜理论^[15]。

$$dc/dt = K_{La}(c_s - c) \quad (1)$$

式中: dc/dt 为氧传质速率, $\mu\text{g}/(\text{L} \cdot \text{s})$; K_{La} 为氧总转移系数, min^{-1} ; c_s 为液相主体中的饱和溶解氧值, mg/L ; c 为液相主体中的实测溶解氧值, $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

试验按照标准CJ/T 3015.2—93《曝气器清水充氧性能测定》进行。考虑到TDS对饱和溶解氧浓度的影响,采用美国最新的清水氧传质测试标准^[16]提供的修正方法对TDS进行修正。

$$K_{La_s} = K_{La} \exp [0.0000965(1000 - c_{\text{TDS}})] \quad (2)$$

式中: K_{La_s} 为标准氧总转移系数, min^{-1} ; K_{La} 为氧总转移系数, min^{-1} ; c_{TDS} 为TDS质量浓度, mg/L 。

2 结果与讨论

2.1 充氧能力

图3为橡胶膜曝气器充氧能力的变化曲线。可以看出: 通气量从 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 $16\text{ m}^3/\text{h}$,曝气密度为2.45%时,SOTR从0.201 kg/h增加到1.356 kg/h;曝气密度为4.90%时,SOTR从0.242 kg/h增加到1.706 kg/h;曝气密度为9.82%时,SOTR从

0.1231 kg/h增加到0.2498 kg/h。SOTR 随通气量和曝气密度的增大而增大,通气量和 SOTR 呈线性相关。在通气量 $< 6 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,曝气密度对 SOTR 的影响较小。

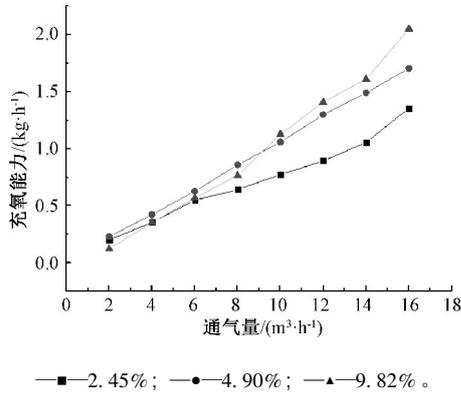


图3 橡胶膜曝气器充氧能力的变化曲线

Fig. 3 Oxygenation capacity changes with air flow rate of fine-pore membrane diffuser

刚玉曝气器充氧能力的变化曲线如图4所示。可以看出:刚玉178微孔曝气器曝气密度从1.41%增大到11.30%时,SOTR从0.257 kg/h增加到0.429 kg/h;刚玉300微孔曝气器曝气密度从2.57%增大到20.55%时,SOTR从0.332 kg/h增加到0.456 kg/h。SOTR随曝气密度的增大而增大,不同型号刚玉微孔曝气器充氧能力变化趋势相同。

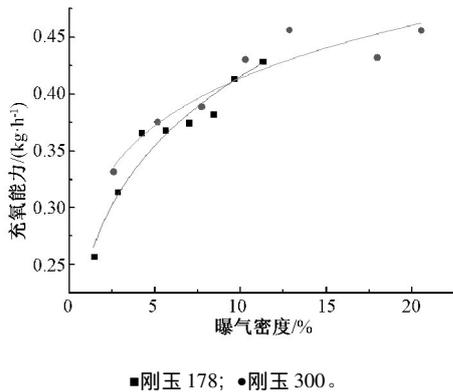


图4 刚玉曝气器充氧能力的变化曲线

Fig. 4 Oxygenation capacity changes with different aeration density of ceramic diffuser

曝气密度的增大带来曝气面积的增大,对于橡胶膜微孔曝气器,在总通气量 $< 6 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,单纯增大曝气密度导致单个微孔曝气器的通气量降低,橡胶膜微孔曝气器表面部分膜孔未张开或未完全张开,有效曝气面积减小,所以曝气密度和通气量对充氧效果影响相互抵消,这同时也与充氧能力随着通气量和曝气密

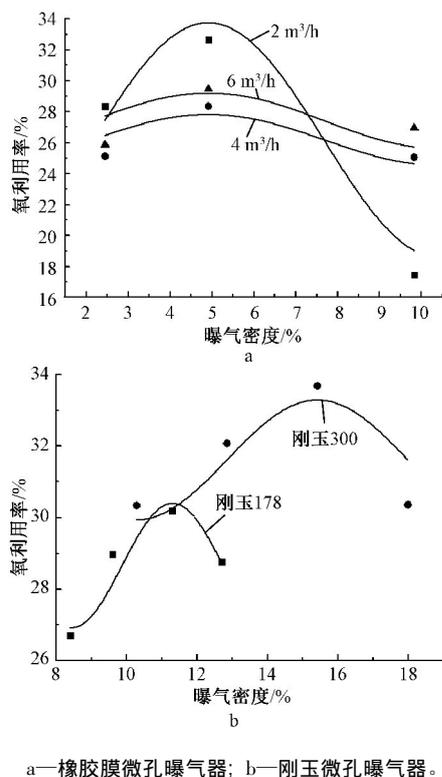
度的增大而增大的规律相一致。在总通气量 $> 6 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,随着通气量和曝气密度增大,液体气含率增大,气泡运动速率变大,并且液体搅拌、紊动程度效果加强,气泡表面更新速率加快导致传质推动力加大,有利于氧传质^[17-18]。对于刚玉微孔曝气器,随着曝气密度增大,单个曝气器通气量减小,刚性孔形成的气泡运动速度及气泡直径减小,气液接触面积增大,标准氧转移系数增大,SOTR增大;刚玉300微孔曝气器的服务面积及曝气面积较大,同等条件下比刚玉178微孔曝气器更有利于氧的转移,进而SOTR较大,充氧能力较强。综上所述,对于橡胶膜微孔曝气器,通气量及曝气密度增大有利于SOTR的增大;对于刚玉微孔曝气器,曝气密度增大有利于SOTR的增大。

2.2 氧利用率

图5为不同曝气密度下2种曝气器的氧利用率变化曲线。如图5a所示:对于同一通气量,曝气密度从2.45%到9.82%过程中,橡胶膜微孔曝气器SOTE呈现先增大后减小的趋势。并且不同通气量SOTE随曝气密度的变化趋势基本一致。显然,当曝气器密度为4.5%~5.5%时,即为最优曝气密度范围,SOTE存在最大值。总通气量为2,4,6 m^3/h ,不同曝气密度下SOTE的最大值分别为32.6%、28.4%、29.5%。如图5b所示,刚玉微孔曝气器SOTE呈现先增大后减小的趋势,并且不同型号刚玉微孔曝气器SOTE随曝气密度的变化趋势基本一致。显然,刚玉178微孔曝气器最优曝气密度为11%~12%,刚玉300微孔曝气器最优曝气密度为15%~16%,二者在最优曝气密度下SOTE的最大值分别为30.2%、33.69%。

同一通气量,单位面积内随曝气器数量的增多,即曝气密度的增大,橡胶膜微孔曝气器出气面积增大,避免了曝气死区现象,气液接触面积相对变大,有利于氧的转移。但当单位面积内曝气器数量增大到一定程度,橡胶膜微孔曝气器之间产生的气泡群空间相对“拥挤”,气泡发生并聚现象^[19],气泡直径变大,气泡比表面积减小,气泡停留时间减小,不利于氧的转移,造成SOTE下降。

图6为不同通气量下微孔曝气器氧利用率变化曲线。可以看出:橡胶膜微孔曝气器通气量为0~2.5 m^3/h ,SOTE随着通气量的增大而增大;当通气量在2.5~8.0 m^3/h 时,SOTE随着通气量的增大而降低。对于刚玉微孔曝气器,当通气量为1.5~6.5 m^3/h 时,SOTE随着通气量的增大而减小。试验过程中,

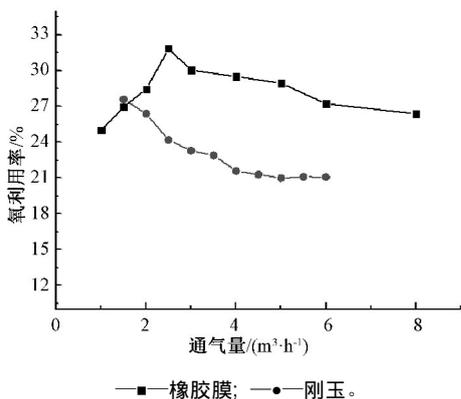


a—橡胶膜微孔曝气器; b—刚玉微孔曝气器。

图5 不同曝气密度下氧利用率变化曲线

Fig.5 Oxygen transfer efficiency changes under different diffuser density

橡胶膜微孔曝气器的最大 SOTE 为 32.8% ,刚玉微孔曝气器的最大 SOTE 为 27.6%。综上所述 橡胶膜微孔曝气器最佳通气量为 3.0 m³/h; 而刚玉微孔曝气的通气量越低越好。

图6 不同通气量下微孔曝气器氧利用率变化曲线
Fig.6 Oxygen transfer efficiency changes under different diffuser airflow rates

橡胶膜微孔曝气器为柔性孔,通气量较低时,橡胶膜膜孔未张开或未完全张开,橡胶膜曝气器有效曝气面积较低,膜孔随着通气量的增大张开的数量逐渐增多,产生的气泡增多,气液接触面积增大,SOTE 逐步提高;随着通气量的增大,橡胶膜有效膜孔全部张

开,流速逐渐变大,产生的气泡直径随之增大,气泡的比表面积及停留时间相对降低,SOTE 降低^[20]。刚玉微孔曝气器为刚性孔,孔的大小不会随着通气量的改变而改变,通气量越大,流速越快,气泡的停留时间越短,SOTE 越低。

综上所述,污水厂曝气系统曝气量过大会造成 SOTE 降低,能耗增加,因此,在满足处理效果的前提下,污水处理厂应尽量减小曝气量以降低能耗;虽然 SOTR 随着曝气密度的增大而增大,但是 SOTE 会先升高后降低,因此污水厂在布置曝气器时应选择最佳的曝气密度范围,合理布置单位服务面积内的曝气器数量,既能节省设备成本,又能保证良好的运行效果。

3 结论

1) 橡胶膜微孔曝气器 SOTR 随着通气量及曝气密度的增大而增加,呈线性相关,但低通气量运行时,增大曝气密度充氧能力变化不大。刚玉微孔曝气器 SOTR 随着曝气密度的增大而增大,不同型号刚玉微孔曝气器的充氧能力不同。

2) 2种微孔曝气器 SOTE 均随通气量及曝气密度的增大先变大后减小。橡胶膜微孔曝气器最佳通气量为 3.0 m³/h,最佳曝气密度为 4.5% ~ 5.5% 时 SOTE 最大,刚玉微孔曝气器最佳曝气密度为 11% ~ 15%。

3) 污水处理厂在设计和优化运行阶段,应考虑最佳曝气密度和通气量,在达到处理效果的前提下,尽量降低曝气密度和通气量,使微孔曝气器在最佳工况条件下运行,进而降低污水厂基建和运营能耗。

参考文献

- [1] Reardon D J. Turning down the power [J]. Civ Eng, 1995, 65(8): 54-56.
- [2] Rosso D, Stenstrom M, Larson L. Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: State of the art [J]. Water Science & Technology, 2008, 57(7): 973-978.
- [3] Rosso D, Larson L, Stenstrom M. Surfactant effects on alpha factors in full-scale wastewater aeration systems [J]. Water Science & Technology, 2006, 54(10): 143-153.
- [4] 魏延苓, 齐鲁, 刘国华, 等. 微孔曝气器充氧性能的影响因素 [J]. 水处理技术, 2014, 40(2): 1-7.
- [5] Larson L, Rosso D, Leu S Y B, et al. Energy-Conservation in Fine Pore Diffuser Installations in Activated Sludge Processes [D]. Los Angeles: University of California, 2007.
- [6] Mahendrakar V, Mavinic D S, Rabinowitz B. Comparison of oxygen transfer parameters from four testing methods in three activated sludge processes [J]. Water Quality Research Journal of Canada, 2005, 40(2): 164-176.

(下转第 121 页)

到最低。

4 结论

1) 环境风险事故发生具有突发性和不确定性, 本文在以西北某焦化厂为例, 通过风险源项分析、污染气象条件假定、预测模型的选择对粗苯泄露扩散进行污染预测, 为焦化项目环境风险防范提供一定参考。

2) 将苯储罐泄露扩散确定为重大危险源并作为最大可信事故进行预测。

3) 通过对比分析选取 AEGLs-2 及 AEGLs-3 作为风险评价标准, 并同时考虑 LC₅₀ 作为比较; 本项目粗苯为重质气体, 采用重质气体平板模型对其风险影响进行模拟预测。

4) 预测结果表明 AEGLs-2 的影响范围为 1 990 m, AEGLs-3 的影响范围为 432 m, LC₅₀ 的影响范围为 126 m, 项目卫生防护距离为 900 m, 采用 LC₅₀ 标准计算结果明显偏小, 存在适用局限性, 本项目需要对项目边界为 900 ~ 1 990 m 内的敏感点进行风险防范。

参考文献

[1] HJ/T 169—2004 建设项目环境风险评价技术导则[S].

[2] 郭丽岗. 煤化工行业环境风险评价与控制研究[D]. 保定: 河北大学, 2009.

[3] 齐志宁. 焦化行业大气环境风险评价体系及应用的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[4] 崔永辉. 焦化行业荒煤气风险事故应急预案[J]. 环境工程, 2009, 27(增刊): 512-514.

[5] GBZ 230—2010 职业性接触毒物危害程度分级[S].

[6] GB 18218—2009 危险化学品重大危险源辨识[S].

[7] GB 11661—2012 炼焦业卫生防护距离[S].

[8] 陈郁, 杨凤林, 宋国宝, 等. 化工企业突发大气环境风险评价标准的探讨[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2310-2318.

[9] 刘佳亮. 工业园区危险化学品扩散数值模拟及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

[10] 郑远攀. 工业危险物质(重气)扩散数学模型研究综述[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(3): 106-110.

[11] 李冰晶, 仝纪龙, 潘峰, 等. 高斯烟团模型在石化类项目大气环境风险评价中的应用[D]. 环境工程, 2013, 31(3): 139-143.

[12] 朱红亚, 王青松, 李一帆, 等. 有毒气体在不同泄漏模式下的事故后果分析[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(6): 216-222.

[13] 孙汉坤, 钱永涛. 关于突发风险事故大气环境影响预测: 不利气象条件选择的分析[C]. 中国环境科学学会论文集, 2009: 925-933.

第一作者: 马岩(1990-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为环境影响评价、规划与管理. lanzhoufujinbei@163.com

(上接第30页)

[7] Bischof F, Höfken M, Durst F. Design and construction of aeration systems for optimum operation of large wastewater treatment plants [J]. Water Science and Technology, 1996, 33(12): 189-198.

[8] 庄健, 齐鲁, 刘国华, 等. 总溶解性固体(TDS)对微孔曝气氧总转移系数的影响研究[J]. 环境工程, 2013, 31(6): 45-48.

[9] 李小冬, 齐鲁, 刘国华, 等. 通气量对微孔曝气器充氧性能影响的中试研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(5): 81-84.

[10] Kaliman A, Rosso D, Leu S Y, et al. Fine-pore aeration diffusers: Accelerated membrane ageing studies[J]. Water Research, 2008, 42(1): 467-475.

[11] Kaliman A, Stenstrom M K, Leu S Y, et al. Fine-pore aeration diffusers: Accelerated membrane ageing studies [J]. Water Research, 2008, 42(1/2): 467-475.

[12] Tremier A, de Guardia A, Massiani C, et al. Influence of the airflow rate on heat and mass transfers during sewage sludge and bulking agent composting [J]. Environmental Technology, 2005, 26(10): 1137-1150.

[13] Wagner M R, Pöpel H J. Oxygen transfer and aeration efficiency: Influence of diffuser submergence, diffuser density, and blower type [J]. Water Science and Technology, 1998, 38(3): 1-6.

[14] 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): 65-69.

[15] Whitman W G. The two film theory of gas absorption [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1962, 5(5): 429-433.

[16] American Society of Civil Engineers. Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water [S]. 2006.

[17] Abusam A, Keesman K J, Meinema K, et al. Oxygen transfer rate estimation in oxidation ditches from clean water measurements [J]. Water Research, 2001, 35(8): 2058-2064.

[18] Young Kyu Kima, Deog Gwan Ra. Water surface contacting cover system: The basic study for improving the oxygen transfer coefficient and the BOD removal capacity [J]. Water Research, 2005, 39(8): 1553-1559.

[19] Chaudhari R V, Hofmann H. Coalescence of gas bubbles in liquids [J]. Reviews in Chemical Engineering, 1994, 10(2): 131-190.

[20] Gillot S, Heduit A. Effect of air flow rate on oxygen transfer in an oxidation ditch equipped with fine bubble diffusers and slow speed mixers [J]. Water Research, 2000, 34(5): 1756-1762.

第一作者: 尹训飞(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事低碳水环境技术研究工作. yinxunfei2009@163.com

通信作者: 齐鲁(1982-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为低碳水环境技术. qilu@ruc.edu.cn