

气提式污水泵站供气系统的设计和计算方法探讨

宁海燕^{1,2}, 罗本福¹, 张明杰³, 陈强¹, 王辉艳¹

(1. 西华大学 土木建筑与环境学院, 四川 成都 610039; 2. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610100; 3. 中恒工程设计院有限公司, 四川 成都 610100)

摘要: 通过搭建气提式污水泵站试验平台,对气提污水泵在不同通气量下的特性参数进行测试。分析进气管在不同通气速度和扬水管在不同淹没比时的进气压力变化规律,获得了进气管的经济通气速度和通气压力计算方法。不同淹没比扬水管的通气量与扬水量的变化规律表明,应根据淹没水深变化调节气提污水泵的通气量。对气提污水泵常用的通气量计算公式进行分析探讨,并根据试验数据进一步对其计算值进行验证,结果表明 Nicklin 公式的计算值与实测值吻合度较高。建议采用 Nicklin 公式进行通气量计算,并根据最低淹没比选取合理的效率值。

关键词: 气提式污水泵站; 供气系统; 通气压力; 通气速度; 通气量

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)21-0086-06

Discussion on Design and Calculation Method of Air Intake System of Air-lifting Wastewater Pumping Station

NING Hai-yan^{1,2}, LUO Ben-fu¹, ZHANG Ming-jie³, CHEN Qiang¹, WANG Hui-yan¹

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610100, China; 3. Eternal Estate Engineering Design Co. Ltd., Chengdu 610100, China)

Abstract: Characteristic parameters of an air-lifting wastewater pump were tested at different air intake volumes by constructing a test platform of an air-lifting wastewater pumping station. The variation pattern of air intake pressure at different intake speeds in the air pipe and different submerged ratios of the lifting pipe was analyzed. Then, the range of economic air intake speed and the calculation formula of air intake pressure of the air pipe were obtained. According to the variations of the air intake volume and water volume of different submerged lifting pipes, the air intake volume of the air-lifting wastewater pump should be adjusted according to the variation of the submerged depth. The calculation formulas of the air volume of the air-lifting wastewater pump were analyzed, and they were further verified according to the test results. The results showed that the calculated values of the Nicklin formula were close to the measured values. It was recommended to use the Nicklin formula for air intake volume calculation and to select a reasonable efficiency value based on the minimum submerged ratio.

Key words: air-lifting wastewater pumping station; air intake system; air intake pressure; air intake speed; air intake volume

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279172); 西华大学气提式污水泵站试验研究项目(16306227); 西华大学大健康促进中心开放课题(jkg2018-019)

通信作者: 罗本福 E-mail: 112337631@qq.com

排水工程中,为提高下游排水管线的标高,减小管道埋深,通常采用局部设置污水提升泵站[1]。污水泵站在污水管网系统中发挥着重要的作用,但传统的污水泵站却存在诸多问题:如占地面积大、设备选型困难、运行效率低、水泵故障率高、维护和管理困难等,以致于工程设计中尽量避免设置污水泵站。

空气提升泵(以下简称“气提泵”)可以通过在部分淹没于液体中的提升管底部引入压缩气体,并利用管内外液体的密度差,使液体产生垂直运动,是实现液体提升的一种装置[2]。该种气提泵由简单的供气系统和提升管道组成,设备少、占地小、无水下转动机械,能够很好地解决传统机械泵易堵塞、易腐蚀、寿命短等问题;气提泵的结构简单、检修和维护方便,降低了日常运行管理费用和难度;气提泵既能提升清水和污水,又能用于排沙,具有一泵多用的功能,适应性较强,尤其适用于管理难度大的中小规模乡镇污水管网系统。目前,对于气提泵的理论研究日渐成熟,但是气提技术在市政工程中的应用却是十分有限的,尤其在污水管网提升中的应用更为少见。

因此,笔者根据污水管网提升的工程条件,搭建了气提式污水泵站试验平台,并对其开展了全面系统的试验研究,目的在于探索和分析气提泵在污水提升中的工作特性规律,探索一套适合于气提污水泵站的设计和计算方法,挖掘和发挥空气提升的工程应用潜力,将气提技术推广应用。另外,根据试验结果和工程实际所需,对供气系统的设计和计算方法进行了分析和验证,旨在为工程应用和设计提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验模拟污水管网提升的实际工程条件,搭建大管径气提式污水泵站试验装置,如图1所示。该试验装置主要包括供气、提升、储水和测试4个系统。供气系统由HC-501S回转式风机、风包、PVC进气管和布气头部组成;提升系统主要由扬水管、下降管和潜水泵组成,扬水管采用亚克力透明圆管;储水系统用于存储和平衡水量,主要由储水筒、平衡水箱以及贮水罐组成;测试系统包括气压表、涡街流量计、电磁流量计,分别用于测试通气压力、通气量和扬水量。

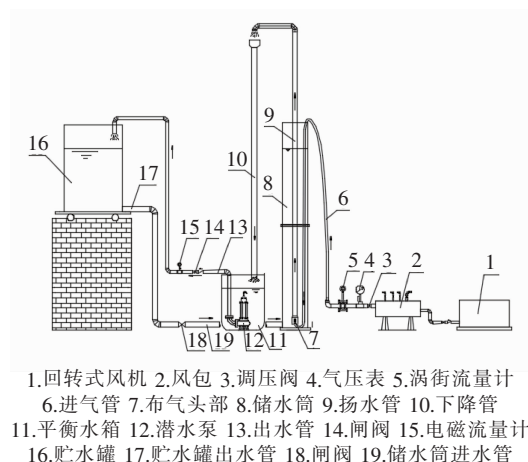


图1 气提污水泵站试验装置示意

Fig. 1 Experimental device of air-lifting wastewater pump

1.2 试验方法

本试验以生活污水作为提升介质。试验过程中,将扬水管下端插入具有一定深度的污水储水筒内,通过调节扬水管在水下的深度来改变淹没比。回转式风机输出有压空气,经进气管进入布气头部,并于扬水管内形成气水混合液,在管内外压差的作用下,混合液形成上向流由顶部流出,落入下降管进行气水分离,分离后的污水进入平衡水箱,再经由潜水泵提升至贮水罐,潜水泵出水管上设置闸阀,以调节出流量,使平衡水箱水位恒定,试验中采用电磁流量计测定流量,并作为气提扬水量。最后,污水由贮水罐出水管补给储水筒,从而使污水循环使用。

本试验中,扬水管管径为DN80和DN100,扬水管长度为4~6 m,淹没比($m = \text{淹没深度} / \text{管长}$)为0.35~0.8,通气量为20~120 m³/h。改变通气量大小,测试通气压力和扬水量的变化。并根据不同的工况条件,分析供气系统的通气速度、通气压力和通气量对气提性能的影响。

2 结果与讨论

2.1 通气速度

在多工况的气提试验中,进气管均采用管径为DN50、管长为10 m的PVC软管。该试验在进气管起端处测试压缩空气的通气压力和通气量。试验选取的扬水管管径为DN80、管长为5.5 m、淹没比为0.40~0.60,对通气压力和通气量进行分析,并将通气量转换为通气速度,绘制通气速度-通气压力的关系曲线,如图2所示。

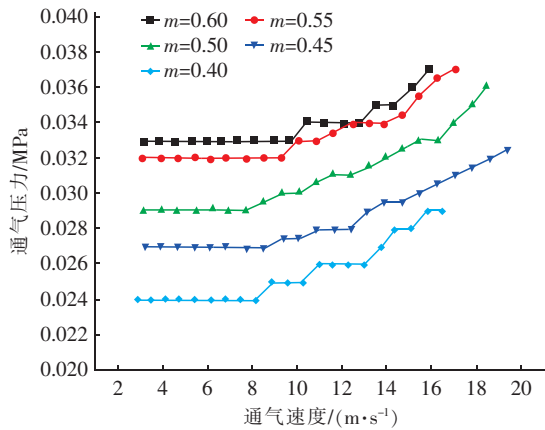


图2 通气速度与通气压力的关系

Fig.2 Relationship between air intake speed and air intake pressure

根据流体力学理论,当外界条件不变时,气压损失主要与气流速度有关。当通气量恒定时,通气速度不变,气压损失近似不变;当通气量逐渐增大时,通气速度逐渐增大,气压损失逐渐增加,即通气压力随着通气量的增大而上升。结合图2可知,在扬水管管径、管长和淹没比一定的条件下,通气量越小,通气速度越低,气压损失越小。当通气速度为3~8 m/s时,通气压力曲线比较平稳;当通气速度达到8.5~10 m/s之后,随着通气速度的增加,通气压力缓慢上升。该试验条件下,通气速度从10 m/s增加至15 m/s时,通气压力增加了0.003 MPa。当通气速度>15 m/s后,通气压力曲线增幅明显变陡,随着通气速度的增大,通气压力快速上升,说明进一步增大进气速度,不能带来通气量的等量增值,反而增大了进气管路上的气压损失,造成能量浪费。反之,若通气速度低于10 m/s,尽管气压损失很小,但通气速度较低,通气量有限,不够经济。综上分析,气提污水泵进气管的经济风速建议为10~15 m/s。

2.2 通气压力

由图2还可以看出,通气压力和扬水管淹没比密切相关。随着扬水管淹没比的增大,淹没深度逐渐增加,通气压力逐渐增大。根据流体力学理论,淹没深度不同,布气头处的静水压力不同。当通气压力扣除进气管路气压损失的剩余压力大于布气头处的静水压力时,压缩空气才能克服水压布入扬水管内,从而形成稳定的气水混合液,并上升至所需的提升高度。反之,当通气压力低于淹没水深对应的静水压力时,扬水管将无法通入气体,或通气量不足仅形成少量气水混合液而无法到达提升高度。故气提

污水泵启动时,通气压力应大于布气头处的静水压力与进气管路气压损失之和,式(1)为启动气提污水泵时通气压力的计算公式。

$$P_1 = 0.1(h_0 + \sum h) \quad (1)$$

式中: P_1 为启动气提污水泵的通气压力,atm(1 atm = 101 325 Pa); h_0 为静水位至扬水管布气头之间的高差,m; $\sum h$ 为通气管路的压力损失(0.5~2 m),进气管路较长时适当取大,m。

由于进水管路存在水损,气提污水泵运行前的静水位会高于运行稳定后的动水位,其水位差的大小与污水进水管长度和扬水管的结构形式相关。当污水流量稳定时,动静水位差比较恒定,该试验条件下,DN80和DN100扬水管各工况下的动静水位差在20~40 mm。因此,气提污水泵工作时的通气压力比启动时的通气压力需求有所降低,工作通气压力应大于扬水管底部布气头处动水位的压力,可采用式(2)计算气提污水泵的工作压力。

$$P_2 = 0.1(h_1 + \sum h) \quad (2)$$

式中: P_2 为气提污水泵的工作通气压力,atm; h_1 为动水位至扬水管布气头之间的高差,m。

在实际工程中,扬水管淹没比会随着集水井水位而变化,当淹没比达到最大,即集水井达到最高水位时,所需的通气压力最大;当淹没比达到最小,即集水井达到最低水位时,所需通气压力最小。按最不利条件考虑,选配风机的额定风压应大于集水井最高水位的静水压力和进气管路的风压损失之和。风机额定的风压可按式(3)计算。

$$P_f \geq kP_1 \quad (3)$$

式中: P_f 为风机的额定风压,atm; k 为考虑风压损失的安全系数,1.05~1.1; P_1 为按照最大静水深度计算的启动通气压力,atm。

2.3 通气量

2.3.1 通气量的影响

为研究通气量对气提污水泵性能的影响,在扬水管管径和管长一定、淹没比不同的条件下,向扬水管中通入不同的通气量,测定相应扬水量的变化,结果如图3所示。可以看出,通气量对扬水量有显著的影响。在不同淹没比条件下,随着通气量的增加,扬水量先快速增大到峰值,然后缓慢下落。但管径和淹没比不同时,扬水量达到峰值的通气量不同。淹没比越大扬水量峰值越靠前,即淹没比越大,达到扬水量峰值所需的通气量越小。当扬水管管径为

DN80、通气量为 $30 \sim 60 \text{ m}^3/\text{h}$ 和管径为 DN100、通气量为 $80 \sim 100 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,随着淹没比的降低,扬水量逐次达到峰值。进一步增大通气量,各淹没比下的扬水量逐渐降低,证明了当通气量超过一定范围后,提水流量会下降或断流的理论^[1]。因而合理的通气量是获得最佳扬水量的关键要素。

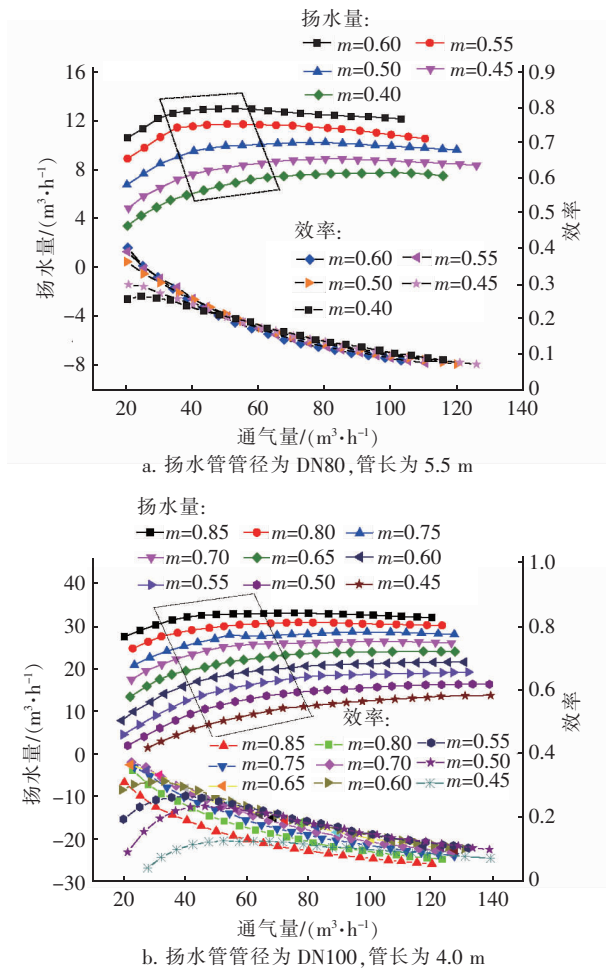


图3 通气量与扬水量和效率的关系

Fig.3 Relationship between air intake volume, water volume and efficiency

由于扬水量峰值对应的通气量随淹没比的不同而推移,故大淹没比($m > 0.7$)时,即集水井水位较高,可适当减小通气量;在低淹没比($m < 0.5$)时,即集水井水位较低,应适当增大通气量,以获得较大的扬水量。因此,在进行风机或空压机的选型时,其工况风量应根据集水井的最低设计水位(即最大提升高度)所需的通气量而确定。淹没水位变化时,可采用变频控制方式调节风机的供气量。

2.3.2 通气量的计算

《给水排水设计手册》(第5册)^[3]中给出的通

气量的计算见式(4)。

$$q = \frac{kQh_2}{(23\lg \frac{h_1 + 10}{10})\eta} \quad (4)$$

式中: q 为压缩空气量, m^3/h ; k 为安全系数,一般取 1.2; η 为效率系数,一般取 0.35 ~ 0.45; h_1 为扬水管淹没深度, m ; h_2 为扬水管提升高度, m 。

《泵与泵站》(第6版)^[1]推荐的通气量计算方法见式(5)。

$$q = \frac{kQh_2}{\alpha \lg \frac{h_2(n-1) + 10}{10}} \quad (5)$$

式中: k 为安全系数,一般取 1.1 ~ 1.2; α 为与淹没系数 n 有关的系数,见表1。

表1 淹没系数 n 与 α 的关系

Tab.1 Relationship between submerged factor n and α

n	4.00	3.35	2.85	2.50	2.20	2.00	1.80	1.70	1.55
α	14.3	13.9	13.6	13.1	12.4	11.5	10.0	9.0	8.0

Nicklin 公式见式(6)^[4]。

$$q = \frac{k\rho g Q h_2}{p_0 \eta \ln \frac{p_2 + p_0}{p_0}} \quad (6)$$

式中: k 为安全系数,一般取 1.1 ~ 1.2; ρ 为被抽升的液体密度, kg/m^3 ; p_2 为压缩空气的工作压力, Pa ; p_0 为大气压力, Pa ; η 为效率系数,结合能效分析建议取值范围为 0.20 ~ 0.30。

以上通气量计算公式均由效率计算公式的变换所得。分析式(4)和式(5),二者的差别在于分母部分不同,如将二者转化为统一形式,则有 $\eta = \alpha/23$, 将淹没系数 n 转换为淹没比,得到淹没比和效率的对应关系如表2所示。可以看出,将式(5)转化形式后,淹没比为 0.75 ~ 0.35,效率系数的取值范围为 0.62 ~ 0.35。

表2 淹没比和效率的关系

Tab.2 Relationship between submerged ratio and efficiency

m	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.44	0.41	0.35
n	4.00	3.35	2.85	2.50	2.20	2.00	1.80	1.70	1.55
α	14.3	13.9	13.6	13.1	12.4	11.5	10.0	9.0	8.0
η	0.62	0.60	0.59	0.57	0.54	0.50	0.43	0.39	0.35

为进一步验证上述公式的准确性和合理性,选择 DN80 和 DN100 扬水管提升污水的工况参数,代入式(4) ~ (6),分别计算理论通气量,并将理论值与实测值进行对比,结果见表3。

表3 实测通气量与理论通气量的对比结果

Tab.3 Comparison results of measured air intake volume and theoretical air intake volume

项 目	提升高度 h_2/m	淹没深度 h_1/m	扬水管长 H/m	实测扬水量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	实测通气量 $q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	理论通气量 $q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$		
						式(4)	式(5)	式(6)
DN80	2.85	2.85	5.70	10.51	77.54	40.99	39.55	71.64
	2.57	3.14	5.70	11.94	71.54	38.56	41.34	67.41
	2.28	3.42	5.70	13.28	40.10	35.33	43.13	61.76
	2.75	2.75	5.50	10.21	75.55	39.67	38.32	69.35
	2.48	3.03	5.50	11.71	50.52	37.63	40.41	65.78
	2.20	3.30	5.50	12.36	52.95	32.73	40.05	57.22
DN100	2.40	3.60	6.00	24.51	114.75	65.68	79.91	114.80
	2.70	3.30	6.00	22.08	120.33	71.74	76.72	125.41
	3.00	3.00	6.00	19.18	121.94	75.27	72.52	131.57
	2.75	2.75	5.50	18.30	126.75	71.11	68.69	124.30
	2.48	3.03	5.50	21.20	121.49	68.16	73.19	119.14
	2.20	3.30	5.50	24.64	116.81	65.24	79.83	114.05

由表3可知,采用式(4)和式(5)计算的理论通气量较实测通气量小,且偏差较大,而式(6)的理论计算值与实测通气量较接近,计算偏差相对较小。这是由于式(4)和式(5)的效率系数取值偏大,致使计算出的通气量偏小。

结合图3中扬水量和效率的变化情况发现,由于气提污水泵的扬水量峰值和效率峰值对应的通气量不相同^[2],即当气提污水泵效率达到最大时,扬水量相对较小,而气提污水泵扬水量达到最大时效率已经下滑,小于最大效率值。故气提污水泵既要实现扬水量最大,又要达到效率最优,是无法同时实现的。实际应用中,应结合工程所需对二者进行平衡。在排水工程中,往往需要保证污水提升流量的稳定性,同时也要满足能耗的合理性。由图3可知,

虚线框内的曲线范围对应的扬水量较大,而且增幅较小的相对平稳段对应范围内的最低效率比最高效率略有降低,此范围对应的通气量应作为合理的通气量,其对应的效率应为合理的效率取值范围。在淹没比为0.5~0.7时,虚线框内对应的效率范围为20%~30%。那么,式(4)和式(5)的效率取值均明显偏大,其中式(5)的效率取值均高于实测效率值,故相同条件下,其计算通气量明显偏小。若设计通气量较小,扬水量处于快速上升区域,此范围内扬水量较小且不稳定,不利于工程应用。

因此,设计通气量的计算推荐采用 Nicklin 公式,同时应根据淹没比的大小,选取合理的效率值。根据实测数据的能效分析,不同淹没比的合理效率取值见表4。

表4 淹没比和效率的关系

Tab.4 Relationship between submerged ratio and efficiency

m	>0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	≤0.35
η	0.06	0.12	0.14	0.15	0.25	0.30	0.28	0.25	0.22	0.20	0.15	0.12	0.10

考虑效率的变化,建议最佳设计淹没比选取为0.5~0.7。综上,风机设计工况风量推荐采用式(7)计算。

$$Q_f \geq \frac{kpgQh_2}{60p_0\eta \ln \frac{p_2 + p_0}{p_0}} \quad (7)$$

式中: Q_f 为风机的设计工况风量, m^3/min ; h_2 为气提污水泵最大提升高度, m ; η 为最低设计淹没比对应的效率值。

需要特别说明的是,风机铭牌标注的风量均为

标准状态下的设计出风量,国家规定的风机标准状态是:1个标准大气压,温度为20℃,相对湿度为50%,空气密度为1.2 kg/m³。因此风机工作条件不满足标准工况时,需将设计工况风量换算成标况风量后再进行选型。

3 结论

① 气提污水泵进气管管径的确定应按经济风速确定,经济风速建议为10~15 m/s。

② 气提污水泵的启动压力应大于扬水管布气头处的静水位压力,工作压力应大于扬水管布气头

处的动水位压力。选配风机时,风机的额定风压应大于集水井最高水位的静水位压力与进气管路的风压损失之和。

③ 合理的通气量应满足最小淹没深度(最大提升高度)的通气量需要,同时应兼顾淹没深度的变化,使扬水量处于平稳段,效率处于合理范围内。

④ 风机设计工况风量的计算建议采用 Nicklin 公式,并应根据最低设计淹没比选取合理的效率值。

参考文献:

- [1] 许仕荣,张朝升,韩德宏,等. 泵与泵站[M]. 6版. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
Xu Shirong, Zhang Chaosheng, Han Dehong, *et al.* Pumps and Pumping Station [M]. 6th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016 (in Chinese).
- [2] Tighzert H, Brahimi M, Kechroud N, *et al.* Effect of submergence ratio on the liquid phase velocity, efficiency and void fraction in an air-lift pump[J]. J Petrol Sci Eng, 2013, 110: 155 – 161.

- [3] Nicklin D J. Two-phase bubble flow[J]. Chem Eng Sci, 1962, 17(9): 693 – 702.

- [4] Nicklin D J. The air lift pump theory and optimization [J]. Trans Inst Chem Eng, 1963, 41(2): 29 – 39.



作者简介:宁海燕(1977 –),女,四川成都人,博士研究生,讲师,主要研究方向为建筑给水排水与消防工程、城市污水处理技术等。

E-mail: 44601792@qq.com

收稿日期: 2019 – 03 – 12

(上接第 85 页)

- [17] Tang X, Wu Q Y, Zhao X, *et al.* A fingerprint analysis method for characterization of dissolved organic matter in secondary effluents of municipal wastewater treatment plant [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2014, 21(24): 14211 – 14218.
- [18] Chang E E, Chiang P C, Ko Y W, *et al.* Characteristics of organic precursors and their relationship with disinfection by-products [J]. Chemosphere, 2001, 44(5): 1231 – 1236.
- [19] Li B, Qu J H, Liu H J, *et al.* Formation and distribution of disinfection by-products during chlorine disinfection in the presence of bromide ion [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(17): 2717 – 2723.
- [20] Chowdhury S, Champagne P, James McLellan P. Models for predicting disinfection byproduct (DBP) formation in drinking waters: A chronological review [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(14): 4189 – 4206.
- [21] Hong H C, Qian L Y, Xiong Y J, *et al.* Use multiple regression models to evaluate the formation of

halonitromethane via chlorination/chloramination of water collected from Tai Lake and Qiantang River, China [J]. Chemosphere, 2015, 119: 540 – 546.



作者简介:白洋(1991 –),男,山西清徐人,硕士,助理工程师,研究方向为污水再生回用。

E-mail: k5940618@163.com

收稿日期: 2019 – 03 – 12