

微曝气垂直流湿地中 4 种基质的充氧性能研究

潘继征^{1,2}, 李文朝¹, 柯凡^{1,2}, 王磊^{1,2}, 李雪娟³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 云南大学生命科学学院, 昆明 650091)

摘要:通过模型曝气实验研究了公分石、火山石、500 级陶粒、高强级陶粒 4 种基质和空白水柱分别在 0.19、0.38、0.76 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 3 种曝气强度下的充氧性能. 结果表明, 在相同条件下, 曝气强度越大, 氧转移速率常数 K_{La} 越大, 填充了基质的模型的氧转移速率常数比空白提高了 5 ~ 7.8 倍; 在 0.19 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 曝气强度下, 500 级陶粒和高强级陶粒的氧利用率最高, 分别为 14.39% 和 14.21%, 火山石和公分石的氧利用率分别为 13.11% 和 11.68%; 随着曝气强度的提高, 公分石的氧利用率明显高于其它基质, 在 0.38 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 曝气强度下达到最大值 14.04%, 比该状况下空白模型的氧利用率高出 3 倍, 火山石的氧利用率持续下降, 在 0.76 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 曝气强度下, 氧利用率为 7.67%, 500 级陶粒和高强级陶粒的氧利用率较为稳定, 维持在 10% 左右.

关键词:滇池; 微曝气垂直流湿地; 氧转移速率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)02-0402-05

Oxygen Transfer Efficiency of Four Kinds Substrates Applied in Artificial Aeration Vertical-flow Wetland

PAN Ji-zheng^{1,2}, LI Wen-chao¹, KE Fan^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, LI Xue-juan³

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Life Science of Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: In subsurface flow constructed wetlands, artificial aeration plays an important role in enhancing the ability of pollutant removal. Oxygenation capacity of four substrates, limestone, vesuvianite, 500 grade ceramisite and high-strength ceramisite, are tested under three kinds of gas volume [0.19, 0.38, 0.76 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] in artificial aeration vertical-flow wetland. When the gas volume is 0.19 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, the results demonstrate that the oxygen utilization of 500 grade ceramisite and high-strength ceramisite are highest as 14.39% and 14.21%, and the oxygen utilization of limestone and vesuvianite are 11.68% and 13.11% respectively. With the increase of aeration intensity, oxygen transfer efficiency parameter K_{La} rises accordingly. However, the oxygen utilization of vesuvianite and two other kinds of ceramisite decreases with the increase of aeration intensity. The oxygen utilization of vesuvianite, 500 grad ceramisite and high-strength ceramisite are lower as 7.67%, 10.46% and 10.77% respectively when the aeration intensity is 0.76 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. On the contrary, the oxygen utilization of limestone get its maximum value of 14.04% as the aeration intensity is 0.38 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

Key words: Dianchi Lake; artificial aeration vertical-flow wetland; oxygen transfer efficiency

国内外已有一些学者采用人工增氧 (artificial aeration) 的方法来提高湿地的污水处理能力. Ouellet-Plamondon 等^[1]在种植了菖蒲的水平流湿地模型进水端人工曝气, 取得了较高的 COD 和总氮的去除率. Noorvee 等^[2]对湿地的进水进行预曝气处理并研究其对水平潜流湿地的影响作用, Nivala 等^[3]用曝气水平潜流湿地处理垃圾填埋场渗滤液, 发现在曝气下取得了很高的氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 与 BOD_5 去除率; Lahav 等^[4]利用自创的被动增氧技术在垂直流湿地床模型中进行试验, 取得了 300 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 的氮去除负荷. 鄢璐等^[5]通过对复合潜流湿地前端进行强化供氧, 显著提高了有机质和总氮的去除率.

溶解氧是好氧生物处理系统的重要因素, 曝气

系统是好氧生物膜法工艺能耗最高的工艺环节, 其能耗一般占到总动力消耗的 60% ~ 70%^[6], 同时曝气设备对混合相还具备混合搅拌的功能, 可改善污染物在水处理系统中的传质条件, 提高处理效率. 将曝气生物滤池的理论应用到垂直流湿地中, 提出“微曝气垂直流湿地”的概念, 在滇池入湖河流河口水质净化技术及工程示范中得到了实践应用. 由于滇池地处云贵高原, 其大气压力约为平原地区的 0.83 倍, 而有关高原地区基质的充氧性能方面的文献较少, 通过基质的充氧性能研究, 掌握几种基质在不同

收稿日期: 2008-03-11; 修订日期: 2008-05-16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2008CB418005); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2005AA60101004)

作者简介: 潘继征 (1975 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为湖泊环境生态工程, E-mail: jzhpan@niglas.ac.cn

曝气条件下的氧传递效率,对湿地系统基质的优选和工艺运行的优化具有重要的指导意义。

1 材料与方 法

实验系统设置于滇池北岸,其结构如图 1 所示,为 5 套平行放置的垂直流湿地模型,直径为 200 mm,高 1 800 mm.底部封闭,并设置进水孔和进气

孔,进气孔内接曝气砂头.其中 4 套模型在 200 mm 高度处设置有格栅状不锈钢承托架,承托架上方填充基质,基质层高度为 1 300 mm,在 1 600 mm 高度处的柱管壁上设置溢流出水口;其余的 1 套模型作为空白,制作方法相同但不填充基质.填充的 4 种基质选用的都是云南本地出产的、性价比较高、适合在人工湿地工程化中应用的材料,物理参数如表 1 所示.

表 1 4 种基质的物理性质

Table 1 Characteristics of four kinds of substrates

项目	基质名称	主要成分/%	粒径/mm	容重/g·mL ⁻¹	孔隙率/%
1	公分石	SiO ₂ :0.5~1.5, Fe ₂ O ₃ :0.1~2, Al ₂ O ₃ :0.2~2.5, CaO:45~55	13~16	2.68	32.2
2	火山石	SiO ₂ :45~60, Fe ₂ O ₃ :5~15, Al ₂ O ₃ :15~20, CaO:5~10	13~15	1.79	42.2
3	500 级陶粒	SiO ₂ :62.12, Fe ₂ O ₃ :7.84	16~20	0.99	35.0
4	高强度级陶粒	Al ₂ O ₃ :16.32, CaO:3.26	14~16	1.58	36.9

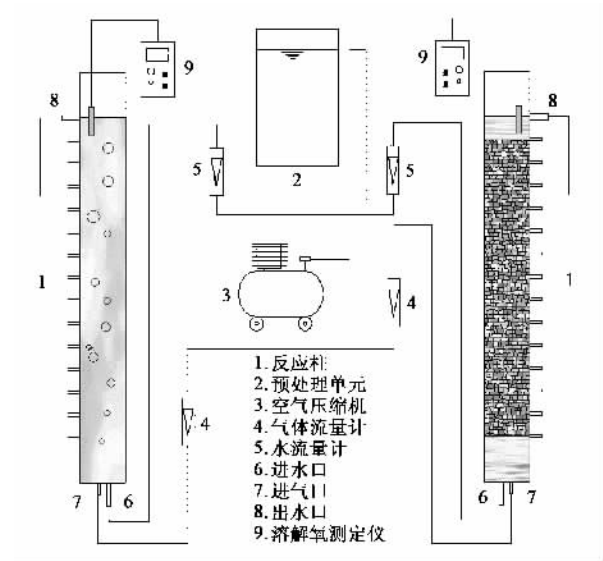


图 1 氧利用率实验装置

气源由一台空压机提供,以进气管连接底部进气孔.在进气管路上分别设置调节阀和流量计,以调控曝气量和曝气强度.

进气管进入模型底部后连接一个曝气头,曝气头采用氧化铝烧结曝气砂头.所使用设备如表 2 所示.

分别对 5 套模型进行静态曝气实验,曝气量分别采用 100、200、400 mL·min⁻¹.实验数据采用氧总转移系数(K_{La})、氧气转移率(dc/dt)、充氧能力(R_0)、氧利用率(E_A)4 项指标进行充氧性能评价^[7].

氧总转移系数实验的具体操作实验步骤如下:

① 向水箱中注入清水;② 向水箱中投加还原剂 Na₂SO₃ 和催化剂 CoCl₂ 进行脱氧.Na₂SO₃ 投加量按 1 mg·L⁻¹ 溶解氧加 10 mg·L⁻¹ 计算.CoCl₂ 投加量为 2 mg·L⁻¹.大约 3 min 后溶解氧测定为 0,表明反

表 2 仪器及设备表

Table 2 Devices and equipments

名称	型号	规格	生产厂家
气体流量计	LZB 型	40~400 mL·min ⁻¹	上海天湖仪表厂
空压机	2.5HP	1 m ³ ·h ⁻¹	福建省泉州市力达机械有限公司
曝气头	氧化铝	L 23 mm, ϕ 25 mm	—
DO 仪	JPB-607	溶解氧:(0~20) mg·L ⁻¹ ;温度:0~40℃	上海精密科学仪器有限公司

应器内溶解氧为 0;③ 将水箱中经过除氧处理的水由入水口注满模型,注满后持续注水等待其上层水中的溶解氧降低为 0;④ 启动空气压缩机,调节转子流量计将进气量控制在选定值上.为了纠正每次测量的零点计时误差,每次测量统一在溶解氧测定示

数升至 0.1 mg·L⁻¹ 时作为充氧过程的计时零点;⑤ 实时监测模型上层水中的溶解氧,记录从 0.5 mg·L⁻¹ 开始溶解氧每上升 0.5 mg·L⁻¹ 所需的时间,直至反应器内溶解氧接近饱和.溶解氧用 JPB-607 溶氧仪测定,每次使用前都用碘量法^[8] 进行校准.

2 结果与分析

2.1 计算依据

Lewis 和 Whitman 于 1923 年建立的“双膜理论”常用来解释气体转移的机制,气泡中的氧分子扩散穿过气膜到达界面,然后又以分子扩散穿过液膜进入液相主体被溶解.由扩散发生的转移慢于由混合发生的转移,故转移的速度控制于此停滞的膜^[9].当液体未被气体饱和时,气体分子从气相转移至液相.这时对于微溶的氧气,阻力主要来自液膜.

在分散的气液两相体系中,空气(氧气)转移的基本关系式如下:

$$W = k_{La}^*(c_s - c) \tag{1}$$

式中, W 为单位体积液体中氧的转移速率(以 O_2 计), $mg \cdot (L \cdot h)^{-1}$; k_{La}^* 为清水中氧的体积转移系数(对应于某一特定点), $L \cdot h^{-1}$; c_s 为饱和溶解氧浓度(对应于某一温度时), $mg \cdot L^{-1}$; c 为溶解氧浓度(对应于某一温度时), $mg \cdot L^{-1}$.

式(1)可以写成:

$$\frac{dc}{dt} = k_{La}(c_s - c) \tag{2}$$

式中, k_{La} 为溶液中氧的体积转移系数, h^{-1} . 在模型直径不大且基质柱内气流搅拌充分的条件下, 截面上的浓度分布基本均匀, 将式(2)在截面内进行积分得^[10]:

$$k_{La} = \frac{1}{t} \ln \frac{c_s - c_0}{c_s - c} \tag{3}$$

式中, c_0 为液相中初始氧浓度, $mg \cdot L^{-1}$.

由于水溶解氧的过程为液膜控制^[11], 故 $K_{La} = k_{La}$, K_{La} 为氧的液相体积总传质系数. 所以通过模型上层水中溶解氧的动态变化曲线, 可利用式(3)计算出该截面位置在一定操作条件下的氧液相体积总传质系数 K_{La} .

2.2 基质对充氧性能的影响

表 3 是不同基质的氧转移速率计算表. 从中可知, 填充了基质的标准氧转移速率常数比空白提高了 5.0~7.8 倍, 并且在不同的基质中氧转移速率有较为明显的差别. 图 2~图 4 分别是曝气强度为 0.19、0.38、0.76 $m^3 \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 情况下由溶解氧仪测得的模型中上层水溶解氧随时间的变化曲线, 可以看出, 在 0.19 $m^3 \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 的曝气强度下, 填充 4 种基质的模型中溶解氧变化曲线接近, 空白模型的溶解氧变化曲线则较为平缓; 在 0.38 $m^3 \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 和 0.76 $m^3 \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 曝气强度下, 溶解氧变化曲线有

了一定的分离, 其中填充公分石基质的模型中氧转移速率明显高于其他模型. 在 0.76 $m^3 \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 的曝气强度下, 填充 500 级陶粒基质和高强级陶粒基质的模型基本一致.

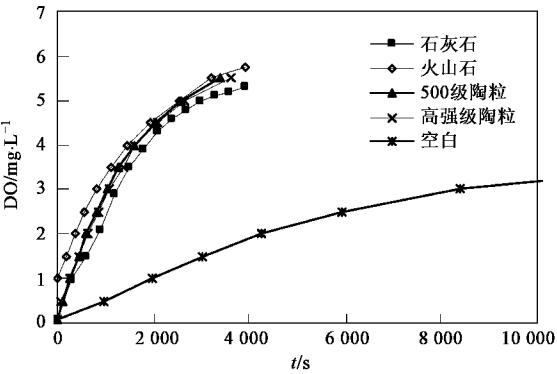


图 2 曝气强度为 0.19 $m^3 \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 时的 DO-t 曲线
Fig. 2 Changing with time of DO in aeration intensity of 0.19 $m^3 \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$

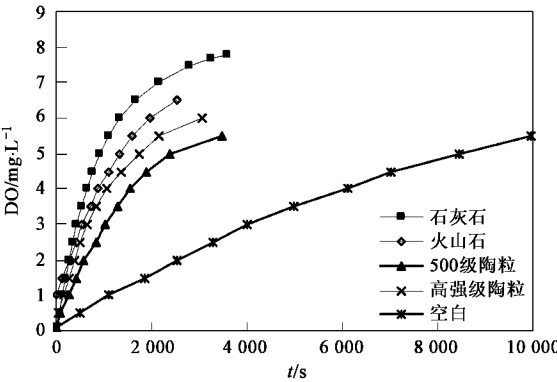


图 3 曝气强度为 0.38 $m^3 \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 时的 DO-t 曲线
Fig. 3 Changing with time of DO in aeration intensity of 0.38 $m^3 \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$

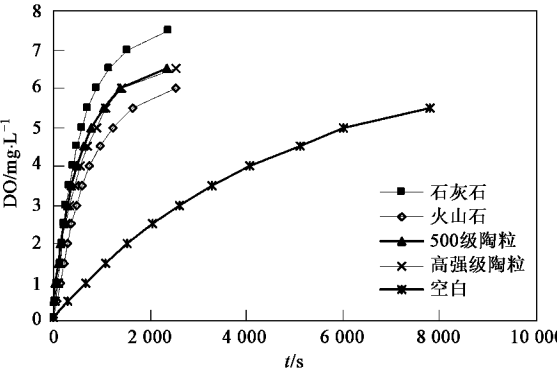


图 4 曝气强度为 0.76 $m^3 \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 时的 DO-t 曲线
Fig. 4 Changing with time of DO in aeration intensity of 0.76 $m^3 \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$

表 3 不同曝气强度下的氧转移速率常数¹⁾

Table 3 Oxygen transfer efficiency parameters of various aeration intensity

基质类型	曝气量 /mL·min ⁻¹	曝气强度 /m ³ ·(m ² ·h) ⁻¹	水温/℃	饱和溶解氧 c _s	氧转移速率常数 K _{La} /L·h ⁻¹	相关系数 R ²	标准氧转移速率 常数 K _{La20} /L·h ⁻¹
空白	100	0.19	25.4	6.80	0.257 5	0.989 1	0.226 5
	200	0.38	21.2	7.36	0.473 9	0.996 2	0.460 6
	400	0.76	25.4	6.80	0.768 4	0.999 2	0.676 0
公分石	100	0.19	22.8	7.15	1.378 9	0.972	1.290 3
	200	0.38	13.8	8.59	2.678 4	0.965 9	3.102 7
	400	0.76	14.8	8.40	4.689 3	0.972 5	5.304 8
火山石	100	0.19	25.2	6.82	1.637 7	0.993 9	1.447 7
	200	0.38	21.0	7.39	2.749 2	0.997	2.684 8
	400	0.76	20.9	7.40	3.462 8	0.991 6	3.389 7
500 级陶粒	100	0.19	24.5	6.91	1.768 3	0.991 6	1.589 3
	200	0.38	21.2	7.36	2.356 5	0.997 3	2.290 4
	400	0.76	19.8	7.57	4.601 5	0.984 6	4.623 4
高强级陶粒	100	0.19	26.5	6.67	1.831 4	0.991 3	1.569 8
	200	0.38	25.8	6.75	2.739 9	0.990 8	2.387 8
	400	0.76	25.1	6.84	5.373	0.997 3	4.760 9

1) K_{La20}为温度 20℃、气压 0.84 × 10⁵ Pa 下的标准值

由图 5 和表 4 可知,填充了基质的模型比未填充基质的模型氧利用率有明显提升,500 级陶粒和高强级陶粒的氧利用率数据在各个曝气量下都非常接近,在 0.38 m³·(m²·h)⁻¹曝气强度下公分石基质的模型中氧利用率高于填充其他基质的模型,比该状况下空白模型的氧利用率高出 3 倍.

基质的存在提高了模型的氧转移率 dc/dt 和氧利用率 E_A .根据公式(2),氧转移速率 dc/dt 主要和氧转移速率常数 K_{La} 值与饱和溶解氧浓度 c_s 值有关,在一定的温度条件下, c_s 是一个固定的值, dc/dt 由 K_{La} 值决定, K_{La} 值主要跟气液混合的效果有关^[12],

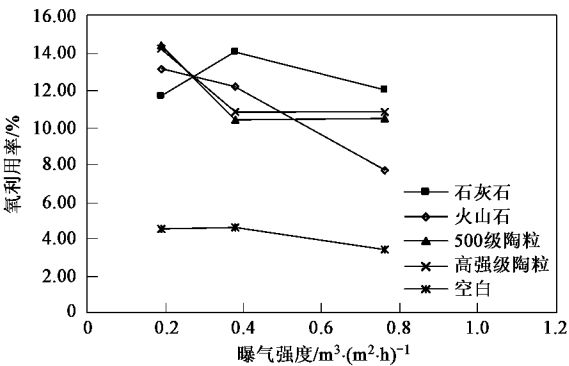


图 5 不同曝气强度下的氧利用率

Fig.5 Oxygen availability ratio of various aeration intensity

表 4 各种基质的充氧性能

Table 4 Oxygen transfer performance of different substrates at different aeration intensities

基质类型	曝气强度 /m ³ ·(m ² ·h) ⁻¹	K _{La20} /L·h ⁻¹	dc/dt /kg·(m ³ ·h) ⁻¹	R ₀ /kg·h ⁻¹	E _A /%
公分石	0.19	1.290 3	0.009 7	0.000 208	11.68
	0.38	3.102 7	0.023 4	0.000 500	14.04
	0.76	5.304 8	0.040 0	0.000 855	12.01
火山石	0.19	1.447 7	0.010 9	0.000 233	13.11
	0.38	2.684 8	0.020 2	0.000 433	12.15
	0.76	3.389 7	0.025 5	0.000 546	7.67
500 级陶粒	0.19	1.589 3	0.012 0	0.000 256	14.39
	0.38	2.290 4	0.017 3	0.000 369	10.37
	0.76	4.623 4	0.034 8	0.000 745	10.46
高强级陶粒	0.19	1.569 8	0.011 8	0.000 253	14.21
	0.38	2.387 8	0.018 0	0.000 385	10.81
	0.76	4.760 9	0.035 9	0.000 767	10.77
空白	0.19	0.226 5	0.001 7	0.000 080	4.52
	0.38	0.460 6	0.003 5	0.000 163	4.59
	0.76	0.6760	0.005 1	0.000 240	3.37

即气、液接触面积,气、液界面的更新速度,液相主体的紊流程度,液膜厚度等.在填充了基质的模型中气液混合效果有显著提升:①基质的存在使气泡沿着基质之间的孔隙蛇行上升,延长了气泡与液相之间的接触时间,增加了气泡和液相介质之间的传质,同时也加速了气液截面的更新;②气泡在沿孔隙上升的过程中被基质切割成细碎的小气泡,气泡的总比表面积增加,增大了气、液的接触面积;③气泡在基质的接触过程中,由于受到基质的挤压而变形,并且使气泡沿着基质表面行进,液膜的厚度即被压缩,传质的速率得以提高;④曝气改变了模型中液相的流态,增加了紊动程度.

基于以上因素,在填充基质的模型中,氧转移速率 dc/dt 得到了提升,其氧利用率 E_A 也大大高于未填充基质的空白模型.

2.3 不同曝气强度下的充氧性能

实验中共采用的 100、200、400 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 3 种曝气量,分别对应 0.19、0.38、0.76 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 3 种曝气强度.由表 3 可知,在同一反应器中,相同的温度、压力下,曝气量越大,即曝气强度越大,氧的传质越快,氧转移速率常数 K_{La} 值越大.

各种基质的模型中氧利用率 E_A 呈现出不同的变化规律,如图 5 所示,在曝气强度为 0.19 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 时,填充 500 级陶粒和高强级陶粒的模型都有较高的氧利用率,分别为 14.39% 和 14.21%,火山石基质的模型居其次为 13.11%,公分石基质的模型最低为 11.68%;曝气强度增大的过程中,火山石、500 级陶粒和高强级陶粒的模型的氧利用率 E_A 都有不同程度的下降;2 种填充陶粒基质的模型在曝气强度提高之后氧利用率 E_A 一直维持在 10% 左右,而填充火山石基质的模型氧利用率 E_A 则不断下降,在曝气强度为 0.76 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 时降到了 7.67%.填充公分石基质的模型氧利用率 E_A 一直高于 11%,在曝气强度为 0.38 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 时的氧利用率 E_A 最高,为 14.04%,随着曝气强度再次提高后稍微降低.

在不同的基质中,曝气强度的提高对氧利用率的影响表现有一定差别.2 种陶粒基质在低曝气量时所表现出来的高氧利用率跟其较高的比表面积有关;公分石基质中氧利用率在各个曝气强度下都维持较高可能跟其不规则的外形有关系,外形的不规则则延长了气泡滞留的时间,增加了气泡接触液相的时间而提高了氧利用率;火山石基质中氧利用率在

曝气量 $> 0.38 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 后出现大幅下降则与孔隙率较大有关.

3 结论

(1) 填充了基质的标准氧转移速率常数比空白提高了 5~7.8 倍,在不同的基质中氧转移速率有较为明显的差别.在同一反应器中,相同的温度、压力下,曝气强度越大,氧转移速率常数 K_{La} 越大.

(2) 填充了基质比未填充基质的氧利用率有明显提升.500 级陶粒和高强级陶粒的氧利用率数据非常接近,在曝气强度为 0.38 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 时公分石基质的模型中氧利用率高于填充其他基质的模型,比该状况下空白的氧利用率高出 3 倍.

(3) 曝气强度增大的过程中,火山石、500 级陶粒和高强级陶粒的氧利用率 E_A 都有不同程度的下降.填充公分石基质的模型氧利用率 E_A 一直高于 11%,在曝气强度为 0.38 $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 时的氧利用率 E_A 最高,为 14.04%,随着曝气强度再次提高后稍微降低.

(4) 选用公分石作为微曝气垂直流湿地的基质从氧转移速率上来看较为实用,从氧利用率和材料成本上来看也较为经济.

参考文献:

- [1] Ouellet-Plamondon C, Chazarenc F, Comeau Y, *et al.* Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate[J]. *Ecological Engineering*, 2006, **27**: 258-264.
- [2] Noorvee A, Põldvere E, Mander Ü. The effect of pre-aeration on the purification processes in the long-term performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **380**: 229-236.
- [3] Nivala J, Hoos M B, Cross C, *et al.* Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **380**: 19-27.
- [4] Lahav O, Eyalartzi, Tarre S, *et al.* Ammonium removal using a novel unsaturated flow biological filter with passive aeration[J]. *Water Research*, 2001, **35**: 397-404.
- [5] 鄢璐,王世和,钟秋爽,等.强化供氧条件下潜流型人工湿地运行特性[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 736-741.
- [6] 王鹤立,王绍文,吕炳南.均匀受限曝气机理及清水充氧试验研究[J]. *中国给水排水*, 2001, **17**(1): 15-18.
- [7] 龙腾锐,高旭.泵型叶轮表面曝气机性能评价新方法[J]. *水处理技术*, 2001, **27**(5): 277-280.
- [8] 国家环境保护局.水和废水监测分析方法[M].(第三版).北京:中国环境科学出版社,1989. 88-284.
- [9] 王冠平,许建华,肖羽堂.生物接触氧化池两种不同曝气方式的充氧性能的比较研究[J]. *净水技术*, 1999, **17**(4): 11-14.
- [10] 邹华生,陈焕钦.新组合基质塔中亏氧清水与餐厅污水的氧传递[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2003, **31**(31): 19-23.
- [11] 邹华生,陈焕钦.焦炭与新型组合基质塔中餐厅污水的氧传递[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2001, **29**(3): 75-78.
- [12] 张自杰,林荣悦,金儒霖.排水工程[M].(第四版).北京:中国建筑工业出版社,2000. 25-50.