

文章编号:1000-582X(2011)11-148-07

## 序批式深床人工湿地处理效能分析

何强,龙熙,周健,覃光旭

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆400045)

**摘要:**针对连续流人工湿地脱氮效率低、占地面积大的问题,提出序批式深床人工湿地DSCW(deep sequence constructed wetlands),考察了湿地深度、填料粒径及运行工况对其处理生活污水效能的影响。研究表明,当深度由0.5 m增加至2 m时,深度对处理效能影响不显著;序批式运行工况对处理效能影响显著,在温度为20~25 ℃,运行工况为进水8 min—反应12 h—出水8 min—闲置12 h的条件下,床深为2 m的DSCW系统对生活污水COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P去除率分别为83.8%、54.1%、48.1%、63.9%,COD、TN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P分别对应的去除面积负荷为128、17.6、1.49 g/(m<sup>2</sup>·d),较传统人工湿地分别提高2.4倍、2倍和1.71倍,每处理1 m<sup>3</sup>的污水占地面积为1.87 m<sup>2</sup>,较传统湿地减少3~5倍。卵石基质粒径为5~10 mm与粒径为20~30 mm的DSCW系统相比COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P去除率分别提高3.8%、7.9%、3.8%和7.0%,填料粒径对处理效能有一定的影响。

**关键词:**人工湿地;序批式;深度;填料粒径

**中图分类号:**TH113

**文献标志码:**A

## Research on treatment efficiency of deep sequence constructed wetlands

HE Qiang, LONG Xi, ZHOU Jian, QIN Guang-xv

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** According to the problems that traditional constructed wetlands have low nitrogen removal performance and large areas, deep sequence constructed wetlands(DSCW) is proposed and the influences of depth of wetland, filler particle size and operational states of DSCW on treatment efficiency are investigated. The experimental results show that when the depth of wetland is increased from 0.5 m to 2 m, it has no significant influence on its treatment efficiency. The running condition has influence on its treatment efficiency. When the water temperature is 20~25 ℃ and operating condition of DSCW is inlet water 8 min—reaction 12 h—outlet water 8 min—idle 12 h, the removal rate of COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P is 83.8%, 54.1%, 48.1% and 63.9% respectively by DSCW with the depth of 2 m. The area load for COD, TN, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P is 128, 17.6, 1.49 g/(m<sup>2</sup>·d) respectively, raised 2.4 times, 2 times and 1.71 times respectively compared with traditional constructed wetlands. Land occupation for processing 1 m<sup>3</sup> wastewater is 1.87 m<sup>2</sup>, decreasing 3~5 times commendably. Compared to DSCW system of particle size of gravel of 20~30 mm, the removal rate of COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P of DSCW system of 5~10 mm is increased by 3.8%, 7.9%, 3.8% and 7% respectively. The filler particle size exhibits some influences on DSCW efficiency.

**Key words:** constructed wetlands; sequencing batch; depth; filler particle size

收稿日期:2011-06-26

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07315-005)

作者简介:何强(1965-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事市政工程、水污染防治工程、水资源管理方面的研究,  
(E-mail)hq0980@126.com

人工湿地污水处理技术于 20 世纪 70 年代起源于德国<sup>[1]</sup>,利用基质-微生物-植物复合生态系统的过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物降解等物理、化学和生物协同作用净化污水<sup>[2]</sup>,具有投资省、能耗低、维护管理方便等优点,在国内外城镇、工业和农村废水处理中得到广泛的应用<sup>[3-5]</sup>,特别是小城镇和农村地区具有广阔的应用前景。目前采用的人工湿地多为连续流,由于自然复氧能力的限制,湿地床体采用较浅的构造<sup>[6]</sup>,深度通常为 0.5~1 m,运行负荷较低为 0.2~0.4 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d)<sup>[7]</sup>,其占地面积一般为处理 1 m<sup>3</sup> 污水 6~10 m<sup>2</sup><sup>[8,9]</sup>,工程应用中设施占用了大量良田,成为人工湿地推广应用的瓶颈,提高人工湿地处理效能,减小占地面积成为当务之急;此外,连续流人工湿地复氧能力低还导致湿地脱氮效能低、易堵塞等问题,解决连续流人工湿地自然供氧能力低,提高人工湿地净化效能成为研究目前热点。

对于人工湿地强化复氧技术,有关研究发现人工湿地采用间歇进水可增强系统的自然复氧能力,研究表明:采用连续进水反应 12 h—排水反应 12 h 的间歇运行方式,可使人工湿地氨氮的去除率提高至 99%<sup>[10]</sup>;对此本课题组研究提出了浅床序批式人工湿地,通过采用序批式运行,并设置排空闲置期进一步强化复氧,对生活污水采用瞬时进水—反应 12 h—瞬时排水的序批式运行方式,连续运行 6 个

周期后排空闲置 2~3 d,与连续流人工湿地相比,氨氮和总氮的去除率分别提高了 15.2% 和 8.4%<sup>[11]</sup>;有研究对人工湿地采用连续运行 1~2 d 后,污水排空闲置 2~8 d 的运行模式使硝化效果显著提高<sup>[12-14]</sup>。此外,改善人工湿地的基质填料粒径级配能提高其复氧能力,影响其处理效能<sup>[15-19]</sup>。

本研究以提高人工湿地处理效能,减小湿地占地面积为目标,拟在浅床人工湿地研究基础上,将床体深度由 1 m 增加为 2 m,采用间歇进水—反应—排水—排空闲置的序批式运行模式,构建深床型序批式人工湿地 DSCW,研究重点考察序批式人工湿地深度、填料粒径及运行工况对城镇生活污水处理效能的影响,为进一步提高人工湿地的效能提供新途径。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 试验装置

试验装置见图 1。1# 和 2# 反应器有效容积 784 L,长×宽×高=75 cm×55 cm×200 cm,超高 10 cm。反应器内充填碎卵石填料,1# 反应器填料粒径为 20~30 mm,2# 反应器填料粒径为 5~10 mm,填充体积与各反应器有效容积相同。按一定密度种植空心菜。反应器上部进水,处理后出水自反应器底部流出。在反应器外侧的不同高度设置多个取样口,供深度影响等试验取样使用。

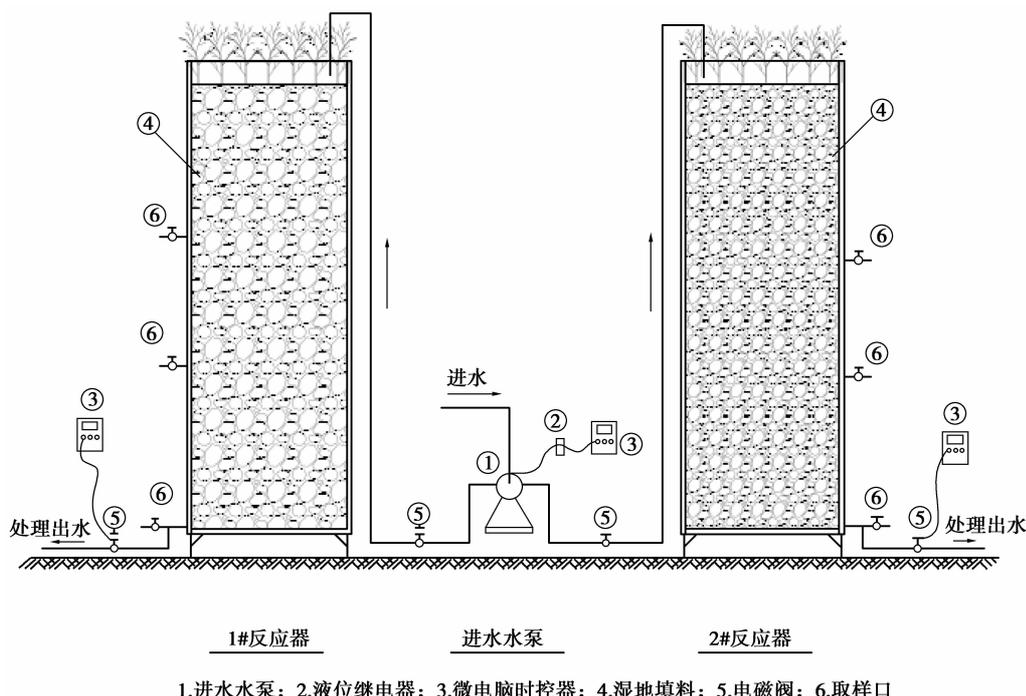


图 1 试验装置图

## 1.2 试验水质

试验污水为校区生活污水,试验水质见表 1。

表 1 试验水质一览表

试验	指标	COD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	pH
		/(mg·L <sup>-1</sup> )	/(mg·L <sup>-1</sup> )	/(mg·L <sup>-1</sup> )	/(mg·L <sup>-1</sup> )	
深度及填料粒径影响试验	范围	175~386	48~72	56~83	2.8~5.9	7.0~8.5
	均值	274	61	67	4.5	7.8
运行工况影响试验	范围	192~345	33~71	49~81	2.6~6.5	6.6~8.5
	均值	276	57	66	4.0	7.6

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 湿地深度对 DSCW 系统处理效能的影响

试验温度为 20~25℃,填料粒径为 5~10 mm,反应器运行工况为进水 8 min—反应 12 h—出水 8 min—闲置 12 h,反应器运行负荷见表 2。分别对反应器上、中、下 3 个出水口取样测试,反应器出水口从上至下距填料层顶端的距离分别为 0.55、1.10、2.0 m。试验历时 3 个月,每日测试 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN 及 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 等指标。

### 1.3.2 填料粒径对 DSCW 系统处理效能影响

采用平行试验,考察粒径大小对反应器处理效能的影响。试验温度为 20~25℃,床深 2 m,反应

器运行工况为进水 8 min—反应 12 h—出水 8 min—闲置 12 h,运行负荷见表 2。1#反应器填料粒径为 20~30 mm,2#反应器填料粒径为 5~10 mm。试验历时 3 个月,每日测试出水 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 及 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 等指标。

### 1.3.3 运行工况对 DSCW 系统处理效能影响

采用 2#反应器进行阶段试验,考察序批式运行工况中反应时间对 DSCW 系统处理效能的影响。试验温度为 20~30℃,床深 2 m,反应器序批式运行模式为进水—反应—排水—闲置,试验运行工况及负荷控制见表 3,试验历时 5 个月,每日测定出水 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 及 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 等指标。

表 2 反应器运行负荷

反应器编号	运行参数							
	容积负荷/(g·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> )				面积负荷/(g·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )			
	COD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	COD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P
深度影响试验 2#反应器	76.9	17.1	18.8	1.30	146.7	32.5	35.7	2.40
填料粒径影响试验 1#反应器	84.2	18.7	20.5	0.95	160.0	35.5	39.0	1.80
2#反应器	77.2	17.1	18.8	0.87	146.7	32.5	35.7	1.65

表 3 反应器运行工况及负荷

工况	进水 /min	反应 /h	排水 /min	闲置 /h	容积负荷/(g·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> )				面积负荷/(g·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )			
					COD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	COD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P
					1	8	4	8	12	169	35.0	40
2	8	12	8	12	85	17.5	20	1.2	160	33.3	38	2.3
3	8	24	8	12	57	11.7	13	0.8	107	22.2	25	1.5
4	8	36	8	12	42	8.7	10	0.6	80	16.5	19	1.1

## 2 结果与讨论

### 2.1 湿地深度对 DSCW 系统处理效能的影响

试验结果见图 2-6。

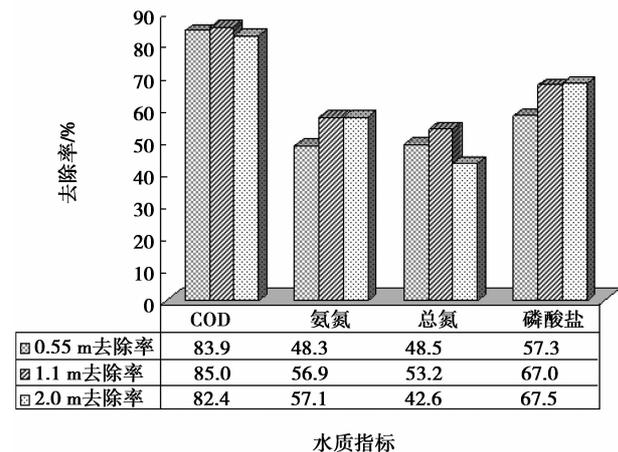


图 2 DSCW 系统不同深度污染物去除率对比

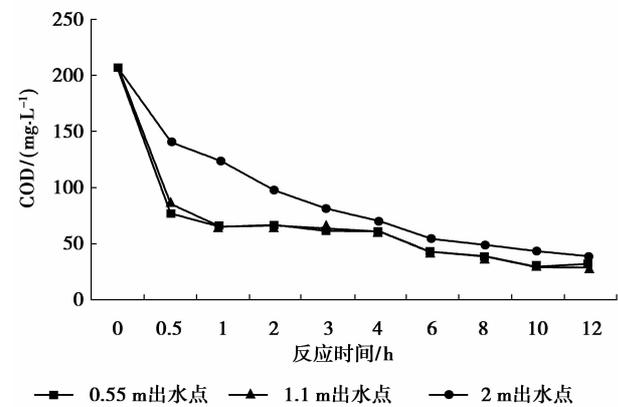


图 3 DSCW 系统反应期不同深度 COD 逐时变化曲线

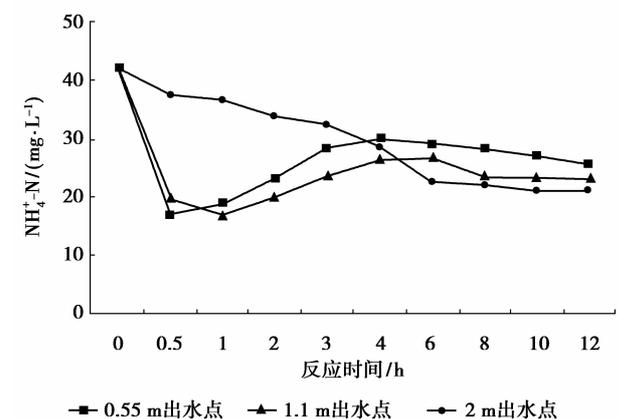


图 4 DSCW 系统反应期不同深度 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 逐时变化曲线

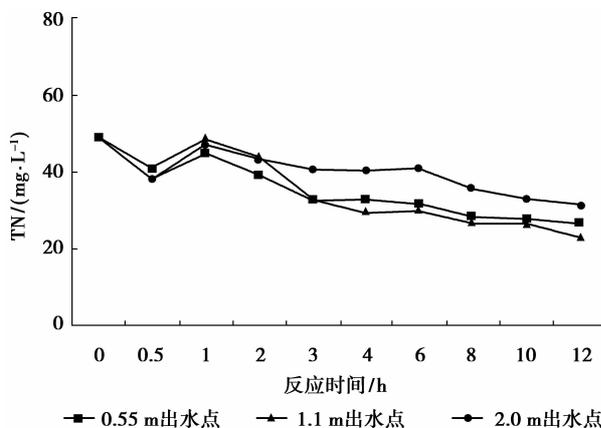


图 5 DSCW 系统反应期不同深度 TN 逐时变化曲线

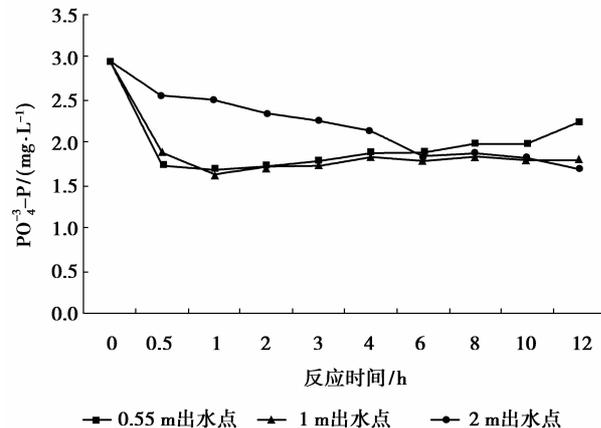


图 6 DSCW 系统反应期不同深度 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 逐时变化曲线

水 COD 浓度为 175~386 mg/L,反应器 COD 出水为 25~43 mg/L,平均出水 COD 为 34 mg/L,平均去除率 83.8%,COD 出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 类标准;当进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 分别为 48~72、56~83 和 2.8~5.9 mg/L 时,出水平均浓度分别为 26.3、34.0 和 1.7 mg/L,反应器平均去除率分别为 54.1%、48.1%和 63.9%。由图 2-6 可知,当 DSCW 系统深度分别为 0.55、1.1 和 2 m 时,COD 去除率分别为 83.9%、85.0 和 82.4%;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率分别为 48.3%、56.9% 和 57.1%;TN 去除率分别为 48.5%、53.2% 和 42.6%;PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率分别为 57.3%、67.0% 和 67.5%。以系统整体处理效能看,随着 SCW 系统填料深度由 0.55 m 增至 2.0 m,反应器对污水中 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 及 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 保持较好的去除效能,其中,对于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的去除,随着深度增大,处理效能提高。分析认为,序批式人工湿地因其存在排空闲置时间,床体内 DO

反应器运行稳定后,温度为 20~25 °C 时,当进

充分。在此期间,湿地系统可对部分吸附在填料和微生物表面的有机物进行分解,床体吸附处理效能得到修复,使 DSCW 床体在下一反应周期中,对污水中悬浮或胶体态有机物仍保持稳定的吸附和截留能力,当污水再次充满 DSCW 床体的较短时间内,大部分有机物能够很好的去除;另一方面,由于床体中 DO 充分恢复,为微生物创造了良好的硝化环境,大量  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  能在较短时间内通过填料吸附及硝化作用而去除;同时,吸附于填料及微生物表面的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  也可在排空闲置期间通过硝化作用被进一步去除。

由图 4 和图 6 可知,湿地系统的 2 m 深层出水浓度在周期内降低速率较 0.5 m 浅层降低速率缓慢,浅层在前 0.5 h 对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  降解迅速,降解速率分别为  $50 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$  和  $2.6 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$ ,反应 4~12 h 期间去除率分别为 54.1% 和 63.9% 左右,而 2 m 深层  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  出水浓度则是在整个周期内逐渐降低,降解速率分别为  $1.67 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$  和  $0.11 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$ ,较为均衡。分析认为,浅层湿地系统对氨氮的去除在开始阶段以初始吸附分解为主,且闲置复氧后床体内 DO 接近饱和,硝化菌及聚磷菌的活性得以充分恢复,因此在再次进水的较短时间内系统具有较高的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  去除率,随着反应时间延长床体中 DO 下降,微生物活性降低;深层湿地系统因床体深度较大,复氧效果不及浅层湿地。随着反应时间的延长,上层 DO 逐渐向下层传质,由此深层湿地始终保持了稳定的氮磷去除速率,最终与浅层出水浓度接近。试验结果表明,床体深度为 2 m 的 DSCW 系统去除 COD、TN、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的面积负荷分别为 128、17.6、1.49  $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,与传统人工湿地负荷<sup>[20]</sup>相比,分别提高 2.4 倍、2 倍和 1.71 倍,处理  $1 \text{ m}^3$  污水的占地面积为  $1.87 \text{ m}^2$ ,较传统湿地占地面积减少 3~5 倍。

## 2.2 填料粒径对 DSCW 系统处理效能影响研究

试验结果如图 7 所示。由图 7 可知,温度为  $20\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,进水 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  分别为  $175\sim 386$ 、 $47.9\sim 71.8$ 、 $55.3\sim 82.6$  和  $2.8\sim 3.6 \text{ mg}/\text{L}$  时,1# 反应器对 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的去除率分别为 80.9%、49.6%、48.2% 和 56.5%,2# 反应器分别为 84.7%、57.5%、52.0% 和 63.5%,2# 反应器小粒径填料 5~10 mm 比 1# 反应器大粒径填料 20~30 mm 在相同运行工况下去除率分别提高 3.8%、7.9%、3.8% 和 7.0%。分析认

为,随着填料粒径的增加颗粒的比表面积减小,单位填料对有机物及氮磷的吸附能力降低,此外,比表面积减小使其单位面积附着生物量降低,从而影响有机物及氮磷的生物降解和吸附转化。

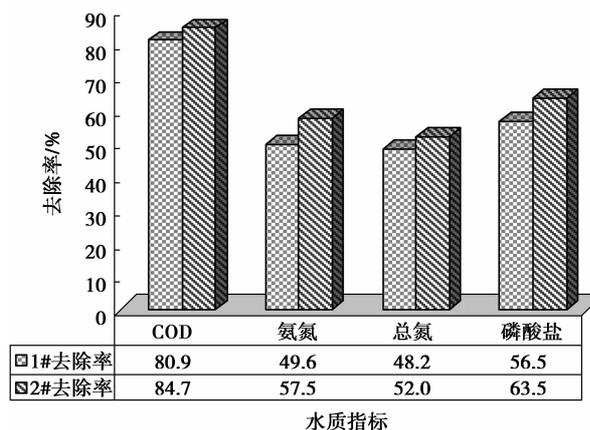


图 7 填料粒径对 DSCW 系统处理效能的影响

## 2.3 运行工况对 DSCW 系统处理效能影响研究

试验结果如图 8-11 所示。

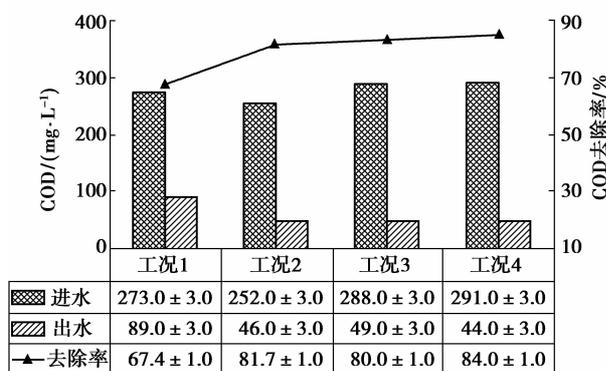


图 8 运行工况对 COD 去除的影响

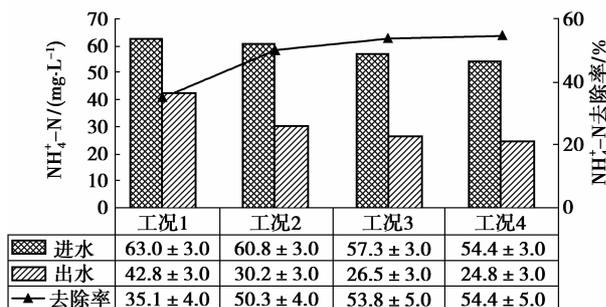


图 9 运行工况对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除的影响

由图 8-11 可知,4 种运行工况下系统 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 TN 的去除率均随反应时间由 4 h 增加

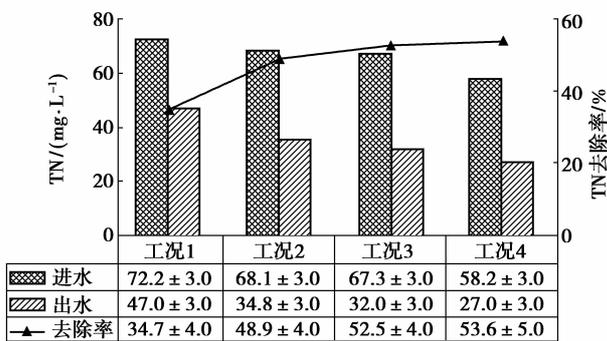


图 10 运行工况对 TN 去除的影响

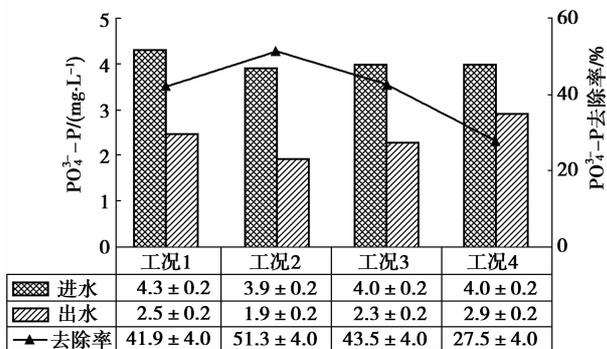


图 11 运行工况对 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除的影响

至 12 h 而显著提高,当反应时间从 12 h 增加至 36 h 后,去除率虽有所升高但增加幅度较小。对于 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的去除,当反应时间由 4 h 增加至 12 h 时有较大幅度的升高,随着反应时间继续增加,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的去除率逐步下降。分析认为,在对有机物及氮的去除时,由于序批式人工湿地系统为自然复氧,降解速率较低,反应时间过短会使系统对污染物降解不充分,适当增加反应时间可使得污染物去除率提高。但反应时间过长,则会由于系统中 DO 含量逐渐降低,导致微生物对有机物及氮氮的降解速度减小,随着反应时间增加,系统对 COD 及 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率增幅不大;对于反应时间增加使 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率下降的原因,则是由于反应时间增加,系统 DO 含量降低后,导致系统中出现厌氧环境,聚磷菌产生释磷造成的。试验结果表明:DSCW 系统适宜的运行工况为进水 8 min—反应 12 h—出水 8 min—闲置 12 h。

### 3 结 语

1)序批式人工湿地系统深度增加至 2 m 对系统处理效能无影响。在温度为 20~25 °C 时,DSCW 处理生活污水对 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的去除

率分别为 83.8%、54.1%、48.1%、63.9%,对应 DSCW 系统去除 COD、TN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的面积负荷分别为 128、17.6 和 1.49 g/(m<sup>2</sup>·d),较传统人工湿地分别提高 2.4 倍、2 倍和 1.71 倍,处理 1 m<sup>3</sup> 污水的占地面积为 1.87m<sup>2</sup>,较传统占地面积减少 3~5 倍。

2)填料粒径对处理效能有一定的影响。卵石基质粒径为 5~10 mm 的 DSCW 系统较粒径为 20~30 mm 的 DSCW 系统 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率分别提高 3.8%、7.9%、3.8%和 7.0%。

3)DSCW 系统较佳的序批式运行工况为进水 8 min—反应 12 h—出水 8 min—闲置 12 h。

### 参考文献:

- [1] LUEDERRITZ V, ECKERT E, et al. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2001, 18(2): 157-171.
- [2] 刘光东,侯立柱,王文玉,等. 人工湿地废水处理的机理探讨[J]. 能源与环境, 2009, 28(2): 12-14.  
LIU GUANG-DONG, HOU LI-ZHU, WANG WEN-YU, et al. Research on constructed wetland liquid water disposal theory [J]. Energy and Environment, 2009, 28(2): 12-14.
- [3] U S EPA. Guiding principles for constructed treatment wetlands: providing for water quality and wildlife habit [M]. Washington DC: U S EPA, Office of Wetlands, Oceans and Watershed, 2000.
- [4] 吴亚英. 人工湿地在新西兰的应用[J]. 江苏环境科技, 2000, 13(3): 32-33.  
WU YA-YING. The application of artificial wet-land in Zealand [J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2000, 13(3): 32-33.
- [5] DOUGLAS J S. The effects of season and hydrologic and chemical loading on nitrogen retention in constructed wetlands: a comparison of low- and high-nutrient riverine systems [J]. Ecological Engineering, 2000, 14(1/2): 77-91.
- [6] 林文周,刘海波,左文武,等. 人工湿地在城镇生活污水治理中的应用[J]. 环境保护与循环经济, 2008, 28(4): 23-26.  
LIN WEN-ZHOU, LIU HAI-BO, ZUO WEN-WU, et al. Application of constructed wetlands in urban sewage treatment [J]. Environmental Protection and circular economy, 2008, 28(4): 23-26.
- [7] 汪俊三,覃环. 高水力负荷人工湿地处理富营养化湖

- 水[J]. 中国给水排水, 2005, 21(1): 1-4.
- WANG JUN-SAN, QIN HUAN. Constructed wetland at high hydraulic loading for eutrophic lack water treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2005, 21(1): 1-4.
- [8] 迟延智, 陈风伦. 人工湿地处理污水的实践[J]. 中国给水排水, 2003, 19(4): 82-83.
- CHI YAN-ZHI, CHEN FENG-LUN. Practice of wastewater treatment by construction wetlands [J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(4): 82-83.
- [9] 李向阳, 胡辉, 罗宪庆. 人工湿地处理污水的占地指标比较及运用[J]. 平顶山工学院学报, 2007, 16(1): 23-26.
- LI XIANG-YANG, HU HUI, LUO XIAN-QING. Comparison and application of land requisition index using artificial wetland for sewage treatment [J]. *Journal of Pingdingshan Institute of Technology*, 2007, 16(1): 23-26.
- [10] 彭举威, 崔玉波. 间歇流人工湿地处理啤酒废水的特性[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2004, 21(3): 4-6.
- PENG JU-WEI, CUI YU-BO. Brewery wastewater treatment using batch flow constructed wetlands [J]. *Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute*, 2004, 21(3): 4-6.
- [11] 周健, 潘凡, 龙腾锐, 等. 序批式人工湿地的处理效能研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(1): 22-25.
- ZHOU JIAN, PAN FAN, LONG TENG-RUI, et al. Study on treatment efficiency of sequencing batch constructed wetland [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(1): 22-25.
- [12] GREEN M. Investigation of alternative method for nitrification in constructed wetlands [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 63-70.
- [13] 杜馨. 同步硝化反硝化(SND)影响因素的试验研究[J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2007, 6(1): 70-74.
- DU XIN. Study on the affecting factors of simultaneous nitrification and denitrification (SND) [J]. *Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition*, 2007, 6(1): 70-74.
- [14] YE F, LI Y. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(7): 1043-1050.
- [15] ARMSTRONG W, COUSINS D. Oxygen distribution in wetland plant root and permeability barriers to gas-exchange with the rhizosphere: a microelectrode and modeling study with phragmites australis [J]. *Annals of Botany*, 2000, 86(3): 687-703.
- [16] 白晓龙, 张宝军, 冯启言, 等. 三种填料对生活污水中氨氮的去除效果[J]. 能源环境保护, 2007, 21(1): 40-42.
- BAI XIAO-LONG, ZHANG BAO-JUN, FENG QI-YAN, et al. Ammonia nitrogen removal efficiency by three kinds of fillers for the domestic wastewater [J]. *Energy Environmental Protection*, 2007, 21(1): 40-42.
- [17] GELLER G. Horizontal subsurface flow systems in German speaking countries: Summary of long term scientific and practical experience; recommendations [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 157-166.
- [18] ZHU T. Phosphate sorption and chemical characteristics of lightweight aggregates (LWA)-potential filter media in treatment wetlands [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 103-108.
- [19] SAKADEVAN K, BAVOR H J. Phosphorus adsorption characteristics of soils, slags and zeolite loe wetland systems [J]. *Water Resource*, 1998, 32(2): 393-399.
- [20] 姜文超, 姚欣, 周健, 等. 三级人工湿地渗滤床处理生活污水中试研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(13): 20-22.
- JIANG WEN-CHAO, YAO XIN, ZHOU JIAN, et al. Three-stage constructed wetland system for domestic sewage treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(13): 20-22.