

生物-生态优化组合工艺处理城市污水试验

陈秀荣^{1,2}, 周 琪¹, 赵书成³

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 华东理工大学 资源与环境工程学院, 上海 200237;

3. 葛洲坝集团第六工程公司, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 针对我国南方城市污水碳源含量低、营养盐含量高的特点, 以生物-生态优化组合工艺对其进行高效的脱氮除磷, 试验规模为 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. 试验中, 根据全年进水特征和单元工艺特性合理分配两段污染物负荷, 调节单元工况参数, 优化组合两段工艺, 达到生物处理段灵活、高效性和生态处理段低耗、稳定性的最佳结合. 研究表明, 优化工况组合中, 化学耗氧量 COD 去除率 90%、总氮去除率 60%~80%、总磷去除率 99%, 出水 COD、总磷等指标满足国家地表水环境 IV 类标准.

关键词: 优化组合处理技术; 脱氮除磷; 人工湿地; 厌氧/缺氧/好氧工艺

中图分类号: X 505

文献标识码: A

文章编号: 0253-374X(2006)08-1061-05

Optimal Combinative Technology of Biological and Ecological Treatment of Municipal Wastewater

CHEN Xiurong^{1,2}, ZHOU Qi¹, ZHAO Shucheng³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Resource & Environmental Engineering, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China;

3. Gezhouba Group's No. 6 Engineering Company Ltd., Yichang 443000, China)

Abstract: In order to achieve effective removal of N/P of the municipal wastewater in south China's cities where the wastewater is of low concentration of COD, high concentration of nutritious salts, an optimal combinative process of biological and ecological treatment is presented. The designed capacity to treat wastewater is $100 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. According to the features of the municipal wastewater and unit technology, various kinds of substrate load are distributed between the two treatment stages. Therefore, the advantages of flexibility and high efficiency of the biological treatment are optimally combined with those of low cost consumption and stability of the ecological treatment. The results of this study indicate that the removal of COD, total nitrogen, total phosphorus is respectively 90%, 60%~80% and 90%. The main effluent quality indexes can reach grade IV of the environmental quality standards for surface water in China.

Key words: optimal combinative treatment technology; removal of nitrogen and phosphorus; constructed wetland; anaerobic/anoxic/aerobic technology

收稿日期: 2005-01-19

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2002AA601023)

作者简介: 陈秀荣(1975-), 女, 山东嘉祥人, 工学博士. E-mail: chenxiurong@vip.sina.com

武汉市冬冷夏热, 冬季日平均气温 10~ 15 ℃, 夏季日平均气温 30~ 35 ℃. 城市污水水质不仅全年波动大, 且有机碳源含量低、营养盐含量高. 针对这种复杂的气候和水质条件, 决定采用生物与生态的优化组合处理模式.

1 试验设计

1.1 原水水质

试验原水取自武汉市经济技术开发区汉庆街泵站集水池, 时间始于 2004 年初, 全年的原水水质变化如表 1.

从表 1 可知, 夏季原水底物浓度较低, 有机碳源极为不足($\rho(\text{C}) : \rho(\text{N}) : \rho(\text{P}) = 25 : 7 : 1$, ρ 表示质量浓度, 下同); 冬季底物浓度高, 有机碳源有所升高($\rho(\text{C}) : \rho(\text{N}) : \rho(\text{P}) = 40 : 7 : 1$); 春秋两季原水水质接近, 介于冬夏之间($\rho(\text{C}) : \rho(\text{N}) : \rho(\text{P}) = (30 \sim 40) : 7 : 1$).

表 1 全年进水水质总结
Tab. 1 Water quality indexes variation in a year

季节	项目	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{SS})$	$\rho(\text{NH}_4 - \text{N})$	$\rho(\text{NO}_3 - \text{N})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$
春季	范围	12. 9~ 248. 5	12~ 119	1. 8~ 41. 9	0~ 4. 1	4. 3~ 61. 8	0. 5~ 29. 2
	均值	150	45	25	0. 65	30	5. 0
夏季	范围	4. 7~ 148. 4	20~ 50	1. 1~ 30. 3	0~ 1. 5	2. 9~ 39. 4	0. 5~ 3. 8
	均值	70	25	13	0. 55	18	2. 8
秋季	范围	84. 8~ 205. 7	30~ 80	19. 6~ 43. 9	0. 1~ 1. 8	25. 0~ 49. 1	1. 7~ 4. 7
	均值	160	40	27	0. 70	30	4. 0
冬季	范围	54. 0~ 250. 1	20~ 143	15. 0~ 45. 0	0. 1~ 1. 1	30. 2~ 60	4. 5~ 6. 7
	均值	210	50	25	0. 50	40	5. 5

注: ρ —质量浓度, COD—化学耗氧, SS—悬浮固体, $\text{NH}_4 - \text{N}$ —氨氮, $\text{NO}_3 - \text{N}$ —硝酸盐氮, TN—总氮, TP—总磷.

1.2 试验流程

试验流程如图 1 所示. 组合工艺由生物处理段和生态处理段串联组成. 其中, 生物段按照改良 AAO(厌氧—缺氧—好氧) 方式运行, 即在 AAO 前端设置预缺氧池, 污泥回流到预缺氧池后通过反硝化过程降低硝态氮含量, 从而避免厌氧池内硝态氮对厌氧释磷过程的干扰. 原水从厌氧池进入生物处理段, 好氧池末端混合液回流至缺氧池, 完成反硝化脱氮过程. 后续好氧池可继续进行底物的好氧转化. 图 1 中, 生物段出水 1 用于市政杂用、工业冷却、建筑用水等; 生态段由人工湿地和植物稳定塘串联组成. 生物段出水 1 进入生态段后, 可完成底物的多途径去除: 植物吸收/ 吸附、悬浮菌群和生物膜对底物的生化转化、填料床及根系层对底物的吸附/ 共沉淀等. 生态出水 2、出水 3 可满足城市河道生态/ 基流维护、湖泊河流水体补充、富营养化水体修复等.

2 试验结果及分析

试验分为春夏秋冬四个时段, 每个时段以组合工艺的出水水质为限制指标, 着重发掘组合工艺的最大潜力, 开发生物—生态处理的最优工况组合.

2.1 春季生物—生态处理工艺的组合

春季, 原水水温为 13~ 25 ℃. 此阶段以生物段短时、延时厌氧/ 缺氧/ 好氧工艺, 分别与生态处理段组合湿地、潜流湿地进行组合研究. 试验结果见表 2.

由表 2 数据可知, 在生物二级出水氨氮质量浓度小于 $1. 0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 两种湿地与水力停留时间 $t_{\text{hr}} = 6 \text{ h}$ 的短时厌氧、缺氧、好氧串联后, 脱氮效果较好; 且组合湿地的除氮效能高于潜流湿地. 这是因为当二级出水氮主要为硝酸盐氮时, 湿地内主要除氮过程为反硝化. 而 $t_{\text{hr}} = 6 \text{ h}$ 的生物段出水中 $\rho(\text{COD})$ 较高, 可为湿地内反硝化提供更多碳源, 强化反硝化过程.

由于春季为植物生长初期, 根系不发达, 根系层微生态结构不完善, 因此潜流湿地根系层反硝化作用较弱. 由于组合湿地表面流段浮萍布满水面, 一方面阻止大气向水体复氧, 另一方面以光合作用向表层水体充氧, 因此流段为上层好氧、下层缺氧的环境; 同时, 浮萍底层附着的大量生物膜提供了完善的

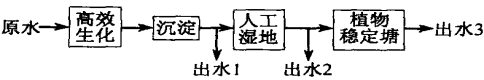


图 1 试验工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of the experiment

注: 人工湿地包括潜流湿地表面流和潜流组合湿地. 前者填料床为除磷填料; 后者出水段 3. 0 m 填充除磷填料, 进水段 12. 0 m 为表面流结构. 磷的去除主要依赖除磷填料的物化作用.

微生态结构^[1]. 因此, 组合湿地的反硝化效率较高, 超过了根系尚不发达的潜流湿地.

表 2 春季各生物-生态工况组合方式的出水指标

Tab. 2 Experimental results of various combinative treatment technology in spring		mg·L ⁻¹			
生物段 工况	指标	原水	二级	组合 湿地	潜流 湿地
$t_{hr}=6\text{ h}$, 内回流比 1.5, 污泥回流比 0.5	$\rho(\text{COD})$	168.40	34.01	16.26	25.78
	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	25.32	0.75	0.25	0.19
	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	0.35	15.05	7.19	11.13
	$\rho(\text{TN})$	26.73	16.27	7.82	12.03
	$\rho(\text{TP})$	3.88	2.45	0.13	0.08
$t_{hr}=9\text{ h}$, 内回流比 2.0, 污泥回流比 0.8	$\rho(\text{COD})$	130.98	18.80	14.22	15.07
	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	26.45	0.66	0.19	0.17
	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	0.71	16.42	12.85	14.44
	$\rho(\text{TN})$	28.60	17.99	13.00	15.83
	$\rho(\text{TP})$	3.19	1.75	0.06	0.04

表 2 中, 总磷在生物段去除率为 40%, 在人工湿地则大于 90%. 由于原水 COD 在厌/缺氧段水解后, 转化为大量的易降解有机底物, 而反硝化与生物除磷对易降解性有机底物的竞争, 使得生物除磷效率较低^[2]. 人工湿地可通过植物吸收、微生态同化、填料层吸附等方式除磷^[3]. 由于中试人工湿地填料层富含硅酸根、钙和铁等矿物质, 填料表面不仅可吸附磷, 大量的矿物质还可与磷酸根共沉淀^[4]. 已有研究证实, 人工湿地主要的除磷过程为填料层、根系层及其上微生态结构对磷的吸附、截留及共沉淀^[5]. 该物化过程受其他因素干扰较小, 因此两种人工湿地对总磷的去除效果都很理想.

将各段出水 $\rho(\text{COD})$, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$, $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 指标绘于图 2. 由图可知, 生物段主要完成对 COD, NH_4^+-N 的去除, 生态系统主要完成除碳和反硝化. 该组合工艺的最终出水中, $\rho(\text{COD}) \leq 11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TN}) \leq 3.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TP}) \leq 0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

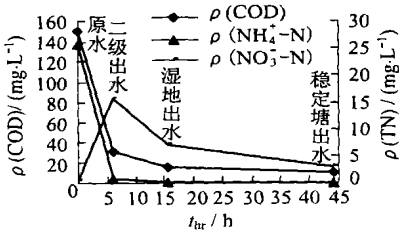


图 2 组合工艺沿程污染底物出水指标
Fig. 2 Effluent of various treatment phases

2.2 夏季生物-生态处理工艺的组合

夏季, 原水水温为 25~28℃, 微生物活性高, 植

物生长茂盛. 由于中试原水为合流污水, 因此降雨后底物浓度会大幅度降低, 需 1 周左右才能恢复到降雨前的水质状况. 针对这种情况, 分别进行了晴天和雨天的组合工艺研究.

2.2.1 夏季晴天组合工艺处理效果

由于夏季晴天原水底物浓度明显低于春季, 因此生物段的 t_{hr} 设为 6 h 和 4.5 h, 并分别与高水力负荷(晴天 $0.54\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 雨天 $0.68\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)的人工湿地进行组合研究. 结果如表 3 所示.

由表 3 数据可以看出, 生物段 $t_{hr}=6\text{ h}$ 时, 效能理想; 而当 $t_{hr}=4.5\text{ h}$ 时, 硝化效率降至 48%, 其出水总氮中, 氨氮占 65%, 硝酸盐氮占 35%. 湿地中直接反硝化效率较低, 影响到总的脱氮效率. 故人工湿地除氮效率低于与 t_{hr} 为 6 h 的生物段组合的效率.

表 3 夏季晴天各生物-生态工况组合方式的出水指标

Tab. 3 Experimental results of various combinative treatment technology in sunny summer days		mg·L ⁻¹			
生物段 工况	指标	原水	二级	组合 湿地	潜流 湿地
$t_{hr}=6\text{ h}$, 内回流比 1.5, 污泥回流比 0.8	$\rho(\text{COD})$	82.92	15.04	13.40	12.00
	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	20.16	0.51	0.50	0.39
	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	0.56	13.98	10.84	7.76
	$\rho(\text{TN})$	21.40	14.65	12.03	8.82
	$\rho(\text{TP})$	2.09	1.17	0.07	0.02
$t_{hr}=4.5\text{ h}$, 内回流比 1.0, 污泥回流比 0.5	$\rho(\text{COD})$	93.10	16.20	15.11	13.70
	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	22.34	10.71	8.36	6.33
	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	0.26	6.27	5.25	4.63
	$\rho(\text{TN})$	23.04	17.90	14.16	11.67
	$\rho(\text{TP})$	3.21	1.24	0.05	0.03

在 $t_{hr}=6\text{ h}$ 的厌氧、缺氧、好氧出水中, 90% 的总氮为硝酸盐氮. 由于夏季植物茂盛, 根系发达, 根系层生物膜量超过组合湿地表面流段水面浮萍上附着的生物膜量, 因此, 潜流湿地根系层对硝酸盐氮的反硝化作用较强, 超过了组合湿地, 脱氮效能更强.

综上所述, 夏季晴天的最佳生物、生态工况组合为: $t_{hr}=6\text{ h}$ 的厌氧、缺氧、好氧+潜流湿地(水力负荷为 $0.544\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) + 植物稳定塘.

2.2.2 夏季雨天组合工艺处理效果

在降雨后原水底物浓度较低的时段, 将人工湿地水力负荷增至 $0.68\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 并分别与生物处理段 t_{hr} 为 6 h 和 4.5 h 的工况进行组合研究. 试验结果如表 4 所示.

由表 4 可知, 降雨后, 原水底物浓度降至晴天的 60%. 因此, 即使生物段 t_{hr} 减至 4.5 h, 由于除碳异养菌活性减弱, 硝化自养菌竞争力增强, 生物段的硝

化效率仍然较高^[6], 其除污效率与 $t_{hr}=6\text{ h}$ 的情况差距不大.

表 4 夏季雨天各生物-生态工况组合方式的出水指标

Tab. 4 Experimental results of various combinative treatment technology in raining summer days

生物段 工况	指标	原水	二级	组合 湿地	潜流 湿地
$t_{hr}=6\text{ h}$ 内回流比 1.5, 污泥回流比 0.8	$\rho(\text{COD})$	42.24	12.81	10.22	9.70
	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	13.36	0.10	0.05	0.05
	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	0.42	8.77	7.15	5.41
	$\rho(\text{TN})$	14.59	9.58	7.62	5.88
$t_{hr}=4.5\text{ h}$, 内回流比 1.0, 污泥回流比 0.5	$\rho(\text{TP})$	2.20	1.06	0.06	0.04
	$\rho(\text{COD})$	41.26	13.15	10.15	9.48
	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	13.61	0.15	0.08	0.10
	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	0.40	8.95	6.87	5.25
	$\rho(\text{TN})$	14.12	10.17	7.10	5.51
	$\rho(\text{TP})$	2.10	1.05	0.10	0.02

此时, 潜流湿地的反硝化优势使其脱氮效能优于组合湿地, 而且雨天二级出水底物浓度较低时, 湿地水力负荷升高到 $0.68\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 对其效能影响仍不大. 因此, 夏季雨天最佳的生物、生态组合工艺为: $t_{hr}=4.5\text{ h}$ 的厌氧、缺氧、好氧+ 潜流湿地(水力负荷 $0.68\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) + 植物稳定塘.

将夏季组合工艺的各段出水指标分别绘于图 3a, b 中. 由图可知, 生物段的主要任务是异养除碳、自养硝化/ 异养反硝化和生物除磷, 而生态段则主要完成异养除碳、反硝化和物化除磷. 最终出水中, $\rho(\text{COD})\leq 10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TN})\leq 3.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TP})\leq 0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

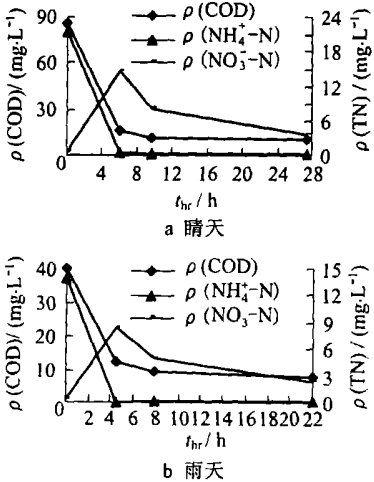


图 3 组合工艺沿程底物指标

Fig. 3 Effluent of varius treatment phases

2.3 秋季生物-生态处理工艺的组合

在秋季 80% 的时段里, 原水水温大于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 对微生物活性影响不大. 因此, 秋季生物段 $t_{hr}=6\text{ h}$, 与水力负荷降低为 $0.34\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的人工湿地进行组合研究, 结果如表 5 所示.

表 5 秋季各生物-生态工况组合方式的出水指标

Tab. 5 Experimental results of various combinative treatment technology in autumn

生物段工况	指标	原水	二级	组合 湿地	潜流 湿地	植物稳 定塘
$t_{hr}=6\text{ h}$, 内回流比 1.5, 污泥回流比 0.5	$\rho(\text{COD})$	179.20	25.79	19.40	17.36	21.13
	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	38.15	0.55	0.30	0.25	3.54
	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	0.82	14.05	12.84	7.71	9.87
	$\rho(\text{TN})$	44.30	15.23	13.64	8.06	14.93
	$\rho(\text{TP})$	4.47	1.78	0.27	0.14	0.44

由表 5 数据可以看出, 虽然秋季湿地植物已经成熟, 且深秋时地上植物基本死亡, 但根系结构仍然发达. 在水温为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下, 根系微生态结构活性很高. 因此, 水力负荷调整为 $0.34\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的低负荷时, 其根系层的效能仍然理想. 故潜流湿地效能优于组合湿地.

在表 5 中, 植物稳定塘出水指标出现回升. 这是由于秋季植物枯萎并倒伏于水中, 腐败后释放出 COD, 有机氮、氨氮等物质, 因此秋季以后的组合工艺为除去植物稳定塘. 在生物反应器+ 潜流湿地的两段组合工艺中, 前者主要完成 COD 和氨氮的去除、硝化/ 反硝化脱氮以及生物除磷; 后者主要完成直接硝化/ 反硝化除氮, 对 COD 和磷等进行物理截留、吸附等. 最终出水中, $\rho(\text{COD})\leq 17.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TN})\leq 8.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TP})\leq 0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.4 冬季生物-生态处理工艺的组合

冬季, 原水水温为 $14\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 可抑制自养硝化菌^[2]. 因此, 将生物反应器的 t_{hr} 延长为 9 h . 由于冬季植物枯死, 人工湿地效能主要依赖填料层的物化作用, 以及根系或填料层上生物膜的生化作用. 将人工湿地水力负荷保持为 $0.34\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. 试验结果列于表 6 中. 由表 6 可以看出, 通过适当延长好氧段硝化时间, 可抵消水温降低对硝化造成的抑制; 原水有机底物含量较高, 反硝化碳源充足, 因此生物脱氮效率较高; 湿地植物死亡, 组合湿地除污效能大大降低, 潜流湿地的各项生化、物化效能较强.

该组合工艺中, 生物段主要完成自养硝化、异养除碳/ 反硝化及部分生物除磷, 生态段主要完成直接异养反硝化、除碳等生化处理及物化截留、吸附除碳、除磷等物化处理. 组合工艺最终出水中,

$\rho(\text{COD}) \leq 18.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{TN}) \leq 8.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,
 $\rho(\text{TP}) \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

表 6 冬季各生物-生态工况组合方式的出水指标

Tab. 6 Experimental results of various combinative
treatment technology in winter $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

生物段 工况	指标	原水	二级	组合 湿地	潜流 湿地
	$\rho(\text{COD})$	195.9	28.10	30.50	18.20
$t_{\text{hr}} = 9 \text{ h}$, 内回流比 2.0, 污泥回流比 0.8	$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$	39.43	0.85	0.40	0.40
	$\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$	0.88	14.10	14.63	7.65
	$\rho(\text{TN})$	42.33	15.48	18.23	8.13
	$\rho(\text{TP})$	4.56	2.88	0.31	0.19

3 结论

- (1) 春季水量、水质稳定, 植物生长快, 微生态趋于成熟. 采用 $t_{\text{hr}} = 6 \text{ h}$ 的厌氧、缺氧、好氧工艺+ 组合湿地(表面流+ 潜流)+ 植物稳定塘的组合工艺.
- (2) 夏季水量大, 污染底物浓度低, 植物及微生态结构旺盛, 晴雨天水质差距大. 晴天采用 $t_{\text{hr}} = 6 \text{ h}$ 的厌氧、缺氧、好氧工艺+ 潜流湿地+ 植物稳定塘组合工艺, 雨天采用 $t_{\text{hr}} = 4.5 \text{ h}$ 的厌氧、缺氧、好氧工艺+ 潜流湿地+ 植物稳定塘组合工艺.
- (3) 秋季水量、水质稳定, 植物老化, 易释放污染底物. 采用 $t_{\text{hr}} = 6 \text{ h}$ 的厌氧、缺氧、好氧工艺+ 潜流湿地的组合工艺.
- (4) 冬季污水水量小, 底物浓度高, 植物枯萎, 微生态活性减弱. 采用 $t_{\text{hr}} = 9 \text{ h}$ 的厌氧、缺氧、好氧

工艺+ 潜流湿地的组合工艺.
(5) 优化工况组合中, $\rho(\text{COD})$ 去除率 90%,
 $\rho(\text{TN})$ 去除率 60% ~ 80%, $\rho(\text{TP})$ 去除率 90% .

参考文献:

[1] Körner S, Vermaan J E. The relative importance of lemna gibba L., bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed- covered domestic wastewater[J]. Wat Res, 1998, 32 (12): 3651.

[2] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

ZHENG Xingcan, LI Yaxin. The wastewater treatment technology of nitrogen & phosphorus removal[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.

[3] Pant H K, Reddy K R, Emon E L. Phosphorus retention capacity of root bed media of sub-surface flow constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 2001, 17: 345.

[4] Dierberg F E, de Busk T A, Jackson S D, et al. Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural runoff: Response to hydraulic and nutrient loading[J]. Water Research, 2002(361): 409.

[5] Gray S, Kinross J, Read P M, et al. The nutrient assimilative capacity of maerl as a substrate in constructed wetland systems for waster treatment[J]. Wat Res, 2000, 34(8): 2183.

[6] Laanbroek H J, Gerards S. Competition for limiting amounts of oxygen between nitrosomonas europaea and nitrobacteria winegradskyi grown in mixed continuous cultures[J]. Arch Microbiology, 1993(159): 453.

(编辑: 陶文文)

• 下期文章摘要预报 •

车辆稳态转向特性中车身侧倾角影响因素研究

于国飞, 艾维全, 王 承, 吴光强

在多体系统动力学仿真分析/ 车辆模块(ADAMS/ CAR)基础上, 二次开发了车辆动力学仿真专用模块, 为预测和分析车辆的稳态回转特性提供了一个平台. 仿真分析了影响国产某小客车车身侧倾角的相关因素, 计算出各因素在合理取值范围内变化对车辆侧倾角的影响及其影响的灵敏度, 其中以质心高度对车身侧倾度的影响最大, 达到每毫米 $0.21(^{\circ}) \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^{-1}$. 提出了改善车辆侧倾性能的几种有效措施. 与实车测试结果相比较, 利用有限元模态分析方法建立的车辆前、后桥多体动力学模型更有利于提高仿真试验精度, 对车辆稳态转向特性影响的预测分析具有更高的准确性.