

“混凝沉淀—人工湿地”处理绿色建筑中水正交试验

柴宏祥, 胡学斌, 彭述娟

(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:采用“混凝沉淀—人工湿地”工艺处理绿色建筑优质杂排水, 混凝沉淀预处理的正交试验结果表明, 出水 BOD_5 与容积负荷(N_v)、温度(T)、PAC 加药量(ρ)之间符合一次线性回归正交方程: $BOD_5 = 2.05 N_v - 0.41T - 0.82\rho + 38.9$ 。人工湿地后处理的正交试验结果表明, 出水 BOD_5 与人工湿地面积负荷(N_A)、温度(T)符合一次线性回归正交方程: $BOD_5 = N_A - 0.32T + 12.2$ 。以试验结果的 2 项回归正交方程为基础, 结合绿色建筑不同季节的中水用水量需求, 构建了组合工艺的工程投资经济最优化模型, 可用于组合工艺处理绿色建筑优质杂排水回用于市政杂用中水的处理规模确定, 预测中水处理效果, 指导该工艺的稳定高效运行。

关键词:绿色建筑; 混凝沉淀; 人工湿地; 中水; 最优经济模型

中图分类号: TU823.6 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)04-0101-07

Orthogonal Experiments on Reclaimed Water Treatment by Coagulation Sedimentation and Constructed Wetland in Green Building

CHAI Hong-xiang, HU Xue-bin, PENG Shu-juan

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

Abstract: Orthogonal experiments were carried out for high grade gray water treated by combinational technique of coagulation sedimentation and constructed wetland. With the orthogonal experiment of coagulation sedimentation pre-treatment, it is shown that the regression equations relating to effluent BOD_5 , cubage loads(N_v), temperature(T) and PAC addition dosage(ρ) is $BOD_5 = 2.05N_v - 0.41T - 0.82\rho + 38.9$. For the orthogonal experiment of constructed wetland post-treatment, it is shown that the regression equations relating to effluent BOD_5 , cubage loads(N_A), and temperature(T) is $BOD_5 = 1.190 N_A - 0.32T + 12.2$. Based on the two orthogonal regression equations, combined with reclaimed water quantity requirements in different seasons in buildings, an investment optimization model of combinational technique was established. According to the model, the reasonable scale of the reclaimed water treatment systems can be determined and treatment efficacy can be well predicted.

Key words: green building; coagulation-sedimentation; constructed wetlands; reclaimed water; economic optimization model.

收稿日期: 2009-12-26

基金项目: 国家科技部国际合作项目(2008DFA91770); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2010ZX07317-011)

作者简介: 柴宏祥(1980-), 男, 博士, 主要从事水污染控制与治理、绿色建筑节水与水资源利用研究, (E-mail) chaihx@126.com。

采用中水处理与回用技术是提高绿色建筑节水率和非传统水源利用率的有效途径。对于宾馆、酒店类水质水量波动大的建筑优质杂排水,选用混凝沉淀+人工湿地组合工艺处理,具有抗击水质水量波动变化负荷能力强的优点^[1]。该组合工艺处理后的中水主要用于绿化、道路浇洒、冲厕等市政杂用,出水水质要求达到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》标准(GB/T 18920—2002)(以下简称《杂用水回用标准》)。

采用混凝沉淀作为废水生物处理、生态处理、物化处理等组合工艺的前处理,已经广泛应用于工业废水、城市供排水处理和微污染源净化处理与回用^[2-6]。人工湿地由于在高水力负荷、低污染负荷运行方式下显现的高效性,作为废水处理与回用的后续生态净化工艺,再生水已经广泛回用于市政杂用水、工业用水、农业用水和城市河道湖泊等景观水体等^[7-11]。

然而,采用“混凝沉淀+人工湿地”组合工艺开展废水处理与回用却鲜有报道^[12]。文中将充分利用混凝沉淀工艺在城镇污水、工业废水、微污染源和城镇供水处理的高效性和成熟性^[13-14],并结合人工湿地生态后续处理的高效性和出水水质优等优点^[15-16],以及这 2 种工艺处理水质水量变化大的废水时运行管理灵活的优势^[1],以绿色建筑优质杂排水为研究对象,以中水处理达到《杂用水回用标准》为目标,选择“混凝沉淀+侧向潜流人工湿地”组合工艺,分别开展两段工艺的影响因素综合试验,得出两段工艺的回归正交方程,构建组合工艺处理设施的最优经济模型,提出组合工艺的优化组合参数,为该组合工艺的工程化推广规模优化和稳定高效运行提供理论依据和技术支撑。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

1.1.1 混凝沉淀预处理装置 混凝沉淀试验装置由加药单元、快速混合单元、机械絮凝单元和沉淀单元组成。快速混合单元为一格,有效水深 0.25 m,容积 0.010 m³,内设一台搅拌机,絮凝部分总体积约为 0.18 m³,分为 3 段,每段容积分别为 0.06 m³,为机械搅拌絮凝,絮凝池中设不同搅拌速率的搅拌机。沉淀池采用平流式沉淀池,沉淀池的有效面积为 1 m²,出水采用溢流堰的形式,在沉淀池下方是污泥沉淀。

1.1.2 侧向潜流人工湿地试验装置

1) 构造与尺寸

侧向潜流人工湿地试验装置内设置平行交错的导流墙,将湿地床内空间分隔成 S 形的水流廊道,沿廊道水流方向底坡为 1‰^[17]。由于试验场地限制,人工湿地平面布置成直角梯形,其平面布置和具体尺寸如图 1 和图 2 所示。

人工湿地试验装置按 3 级设计,每一级侧向湿地床 S 形的水流廊道宽为 0.4 m,有效面积 2.5 m²,高 1.0 m,容积 2.5 m³,复氧槽长 2.2 m,宽 0.4 m。试验时可以根据设计的负荷,分别选择 1 级、1、2 级组合或 1、2、3 级组合工况进行对比试验。

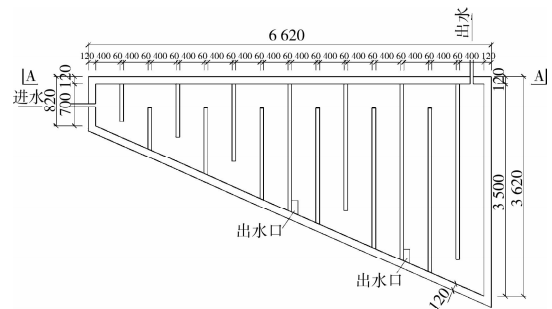


图 1 侧向潜流人工湿地试验装置平面图

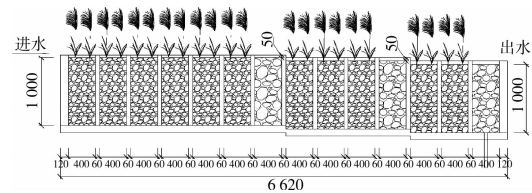


图 2 侧向潜流人工湿地试验装置剖面图

2) 填料

试验采用的人工湿地填料采用小试对比研究后的重庆大学的专利产品酶促填料。该填料比表面积大,孔隙率高并有一定机械强度,有利于微生物的附着和生长繁殖,以及微生物代谢过程中所需氧气和营养物质的传质过程。

3) 植物选种

根据小试对比研究结果,试验选用芦苇、美人蕉、菖蒲、风车草 4 种植物组合搭配种植。其中芦苇、美人蕉的种植密度为 35 株·m⁻²,菖蒲的种植密度为 40 株·m⁻²,风车草的种植密度为 20 株·m⁻²。

1.2 试验水质

试验用水采用重庆大学学生宿舍的生活污水及雨季收集雨水的混合水,用以模拟绿色建筑灰水。校区生活污水水质受到学生活动规律的影响,进水水质变化较大,当生活污水进水浓度明显偏高时,采用增加雨水量比例的方法,使试验水质保持相对稳定。中水处理试验水质如表 1 所示。

表1 试验用水水质

COD/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	总氮/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	总磷/(mg·L ⁻¹)	pH
90~150	46~78	21~35	17~27	0.8~2.2	7.0±0.5

2 混凝沉淀预处理中水正交试验

2.1 试验方法

根据对温度(T)、混凝段进水 BOD₅ 容积负荷(N_v)、PAC 加药量(ρ)、pH 等单因素影响预试验结果,试验采用 3 因素 2 水平的正交试验,考察温度、负荷、加药量对混凝沉淀工艺处理中水效能的综合影响。

2.1.1 正交试验因素及水平的确定 根据单因素预试验结果,选取负荷、温度、加药量作为正交试验的因素,确定正交试验的因素水平,负荷的上水平为 8.6 kg BOD₅·m⁻³·d⁻¹,下水平为 4.3 kg BOD₅·m⁻³·d⁻¹;温度的上水平为 35℃,下水平为 5℃,PAC 加药量上水平为 8 mg·L⁻¹,下水平为 2 mg·L⁻¹。正交试验的因子为: Z_1 表示负荷, N_v /kg BOD₅·m⁻³·d⁻¹, Z_2 表示温度, T /℃, Z_3 表示 PAC 加药量, ρ /mg·L⁻¹。

在回归正交表中,采用+1、-1 表示因素的水平,对因素水平进行编码,各试验因素用 Z_j 表示,因素取值线性变换为 $X_j = \frac{Z_{ij} - Z_{0j}}{\Delta_j}$,从而得出因素水平编码如表 2 所示。

在试验中,

$$X_1 = (Z_1 - 4.2)/1.9 = (N_v - 6.3)/1.9 \quad (1)$$

$$X_2 = (Z_2 - 20)/15 = (t - 20)/15 \quad (2)$$

$$X_3 = (Z_3 - 9)/6 = (\rho - 10)/5 \quad (3)$$

表2 混凝正交试验因素水平表

研究因子	Z_1 负荷/(kgBOD ₅ ·m ⁻³ ·d ⁻¹)	Z_2 温度/℃	Z_3 加药量/(mg·L ⁻¹)
零水平 Z_{0j}	6.3	20	10
变化区间 Δ_j	1.9	15	5
上水平+1	8.4	35	15
下水平-1	4.2	5	5

2.1.2 正交试验表头设计及试验安排 正交试验表表头设计选取 3 因素、2 水平 1 次回归正交设计表 $L_8(2^7)$ 。该试验考虑到各因素之间可能有交互作用,因而采用重复试验,在相同的条件下重复进行 3 次试验,取 2 次试验结果进行正交回归计算。试验安排及试验结果如表 3 所示。

2.2 试验结果及分析

负荷、温度和加药量对混凝沉淀预处理装置综合影响的正交试验结果如表 3 所示。

表3 混凝正交试验结果表

试验次数	试验编号	N_v / (kgBOD ₅ ·m ⁻³ ·d ⁻¹)	温度/℃	加药量/(mg·L ⁻¹)	进水 BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	出水 BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)
1	1#	8.4	35	15	58	33
	2#	8.4	36	5	61	35
	3#	8.4	5	15	68	39
	4#	8.4	4	5	58	53
	5#	4.2	35	15	59	20
	6#	4.2	35	5	67	32
	7#	4.2	6	15	62	36
	8#	4.2	5	5	68	46
2	1#	8.4	35	15	62	32
	2#	8.4	36	5	58	34
	3#	8.4	5	15	70	38
	4#	8.4	5	5	62	50
	5#	4.2	35	15	61	21
	6#	4.2	35	5	61	29
	7#	4.2	6	15	62	34
	8#	4.2	5	5	67	44

续表 3

试验次数	试验编号	$N_v /$ ($\text{kgBOD}_5 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	温度/ °C	加药量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	进水 $\text{BOD}_5 /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水 $\text{BOD}_5 /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
3	1#	8.4	35	15	62	32
	2#	8.4	36	5	59	35
	3#	8.4	5	15	74	42
	4#	8.4	5	5	60	52
	5#	4.2	35	15	64	23
	6#	4.2	35	5	62	28
	7#	4.2	6	15	60	34
	8#	4.2	5	5	69	42

根据表 3 试验结果,得出温度、负荷、加药量对混凝沉淀工艺处理中水效能的综合影响的一次回归正交试验结果如表 4 所示。由表 4 可知, F 检验临界值 $F_{0.01}(1,8) = 11.3$,对于温度, $F_{0.01}(1,8) = 11.8 > 11.3$,故温度 T 的影响高度显著;负荷和加药量的 $F_{0.01}(1,8)$ 分别为 4.8 和 5.1,也较显著。而 3 因素之间的交互作用的影响不显著,可忽略不计。由此得出一元线性回归方程:

$$\text{BOD}_5 = 35.4 + 3.9X_1 - 6.2 X_2 - 4.1X_3 \quad (4)$$

将式(1) - (3) 代人式(4),得到 N_v 、 T 、 ρ 与出水

BOD_5 的一元线性回归方程:

$$\text{BOD}_5 = 2.05 N_v - 0.41T - 0.82\rho + 38.9 \quad (5)$$

当进水负荷 N_v 、温度 T 和 PAC 加药量一定时,可通过式(5)预测中水混凝沉淀预处理的出水 BOD_5 ;同理,当要求混凝沉淀预处理出水 BOD_5 达到某一浓度时,可以通过式(5)计算絮凝池的负荷,从而设计絮凝池的尺寸;在混凝沉淀池运行阶段,也可以根据分别对应不同的水质、水量和温度变化,通过式(5)计算出 PAC 加药量。

表 4 混凝正交试验计算及方差分析表

因子的编码	X_0	X_1 (负荷)	X_2 (温度)	X_3 (加药量)	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	试验结果		合计 $Y_i = Y_{11} + Y_{12}$	差 = $ Y_{11} - Y_{12} $
									Y_1	Y_2		
试验 1	1	1	1	1	1	1	1	1	33	32	65	1
试验 2	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	35	36	71	-1
试验 3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	39	38	77	1
试验 4	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	50	52	102	-2
试验 5	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	20	21	41	-1
试验 6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	29	28	57	1
试验 7	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	34	34	68	0
试验 8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	44	42	86	2
$B_j = \sum XY$	567	63	-99	65	13	3	21	17	$S_{\text{误}} = 0.5 \times \sum (Y_{i1} - Y_{i2})^2 = 6.5$			
$b_j = B_j / (8 \times 2)$	35.4	3.9	-6.2	-4.1	0.8	0.2	1.3	1.1	$f_{\text{误}} = N \times (M - 1) = 8 \times (2 - 1) = 8$			
$Q_j = b_j B_j$		248.1	612.6	264.1	10.6	0.6	27.6	18.1	$F_{0.01}(1,8) = 11.3$			
$F = Q_j / (S_{\text{误}} / f_{\text{误}})$		4.8	11.8	5.1	0.2	0.0	0.1	0.0				
显著性 ($\alpha = 0.01$)		显著	高度显著	显著	不显著 (忽略)	不显著 (忽略)	不显著 (忽略)	不显著 (忽略)	$\text{BOD}_5 = 35.4 + 3.9X_1 - 6.2X_2 - 4.1X_3$			

3 人工湿地后处理中水正交试验

3.1 试验方法

中水经过混凝沉淀工艺预处理后,进水随负荷、

温度和 PAC 加药量变化时,出水 BOD_5 一般在 $20 \sim 45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化,此时出水还未达到《杂用水回用标准》,需将混凝沉淀预处理出水排入后续人工湿地进行后处理。根据影响人工湿地的单因素影响

试验结果,采用正交试验,重点考察人工湿地的进水面积负荷和温度对出水 BOD₅ 的综合影响。

3.1.1 正交试验因素及水平的确定 选取人工湿地进水面积负荷(以下简称“负荷 N_A ”)、温度(T)作为正交试验的因素,根据单因素预试验结果,确定正交试验的因素水平,负荷的上水平为 $8.6 \text{ kg BOD}_5 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,下水平为 $4.3 \text{ kg BOD}_5 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;温度的上水平为 35°C ,下水平为 5°C 。正交试验的因子为: Z_1 表示负荷 N_A , $\text{kgBOD}_5 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, Z_2 表示温度, $^\circ\text{C}$ 。

在回归正交表中,采用 +1、-1 表示因素的水平,对因素水平进行编码,各试验因素用 Z_j 表示,因素取值线性变换为 $X_j = \frac{Z_{ij} - Z_{0j}}{\Delta_j}$,从而得出因素水平编码如见表 5 所示。

在该试验中,

$$X_1 = (Z_1 - 0.0056)/0.0021 = (N_A - 0.0056)/0.0021 \quad (6)$$

$$X_2 = (Z_2 - 20)/15 = (t - 20)/15 \quad (7)$$

表 5 人工湿地正交试验因素水平表

研究因子	$Z_1(N_A/\text{kgBOD}_5 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	$Z_2(T/^\circ\text{C})$
零水平 Z_{0j}	0.0056	20
变化区间 Δ_j	0.0021	15
上水平 +1	0.0077	35
下水平 -1	0.0035	5

3.1.2 正交试验表头设计及试验安排 正交试验表表头设计选取 2 因素、2 水平 1 次回归正交设计表 $L_4(2^3)$ 。考虑到各因素之间可能有交互作用,采用重复试验,在相同的条件下重复进行 3 次试验,取 2 次试验结果进行正交回归计算。试验安排及试验结果如表 6 所示。

3.2 试验结果及分析

表 6 为负荷和温度对人工湿地的综合影响试验结果。对比《杂用水回用标准》,在正交试验结果中,pH、浊度、TSS、氨氮、阴离子表面活性剂等各项指标均能稳定达标,出水受限制指标是 BOD₅。由试验结果知,当负荷为下水平 $0.0035 \text{ kgBOD}_5 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,温度为上水平 35°C 时,出水 BOD₅ = $5 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水达标;当负荷为上水平 $0.0077 \text{ kgBOD}_5 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,温度为下水平 5°C 时,出水 BOD₅ = $20 \sim 24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 BOD₅ 未能达标;当负荷和温度同时处于上水平或同时处于下水平时, $\text{BOD}_5 \leq 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水可用于道路清扫、消防、绿化和建筑施工用水等;当负荷和温度处于一定条件时,出水可同时回用于室内冲厕和车辆冲洗等。

负荷和温度对人工湿地处理中水的 1 次回归正交试验结果如表 7 所示。由表 7 可知, F 检验临界值 $F_{0.01}(1,4) = 4.54$,对于温度, $F_{0.01}(1,4) = 15.0 > 11.3$,影响高度显著;负荷的 $F_{0.01}(1,4) = 4.2$,也较显著。而两因素之间的交互作用的影响 $F_{0.01}(1,4) = 0.4$,影响不显著,忽略不计。由此得一元线性回归方程:

$$\text{BOD}_5 = 12.5 + 2.5X_1 - 4.75X_2 \quad (8)$$

将式(6)、(7)代入式(8),得到 N_A 、 T 与出水 BOD₅ 的一元线性回归方程:

$$\text{BOD}_5 = 1190N_A - 0.32T + 12.2 \quad (9)$$

当人工湿地进水面积负荷 N_A 和温度 T 确定时,可通过式(9)预测人工湿地的出水 BOD₅;也可通过式(9),根据中水出水水质的要求和温度,设计人工湿地的尺寸;在人工湿地工程应用时,可以通过式(9),计算一定温度条件下,在确定中水用途即明确出水水质要求时,人工湿地所能承受的负荷,即可计算出中水产量。

表 6 人工湿地正交试验结果表

试验次数	试验编号	负荷 $N_A/(\text{kgBOD}_5 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	$T/^\circ\text{C}$	进水 BOD ₅ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水 BOD ₅ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水氨氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	阴离子表面活性剂/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TDS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	浊度/(NTU)	pH
1	1#	0.0077	35	36	9	7	0.4	672	3	6.8
	2#	0.0077	5	42	21	8	0.6	567	3	6.6
	3#	0.0035	35	39	6	5	0.2	562	5	7.1
	4#	0.0035	5	38	13	8	0.3	489	4	7.3
2	1#	0.0077	35	35	10	8	0.3	514	2	6.5
	2#	0.0077	5	40	24	9	0.4	498	3	6.7
	3#	0.0035	35	39	6	6	0.3	487	5	6.8
	4#	0.0035	5	39	15	8	0.3	768	6	7.2

续表 6

试验次数	试验编号	负荷 $N_A/(kgBOD_5 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$	$T/^\circ C$	进水 $BOD_5/(mg \cdot L^{-1})$	出水 $BOD_5/(mg \cdot L^{-1})$	出水氨氮/ $(mg \cdot L^{-1})$	阴离子表面活性剂/ $(mg \cdot L^{-1})$	TDS/ $(mg \cdot L^{-1})$	浊度/ (NTU)	pH
	1#	0.007 7	35	34	10	8	0.4	648	2	7.1
3	2#	0.007 7	5	43	20	8	0.2	537	4	7.0
	3#	0.003 5	35	38	5	6	0.2	542	3	6.7
	4#	0.003 5	5	38	14	7	0.3	706	4	7.3

表 7 人工湿地正交试验计算及方差分析表

因子的编码	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	试验结果		合计 $Y_i = Y_{i1} + Y_{i2}$	差 = $ Y_{i1} - Y_{i2} $
					Y_{i1}	Y_{i2}		
试验 1	1	1	1	1	9	10	19	1
试验 2	1	1	-1	-1	21	20	41	1
试验 3	1	-1	1	-1	6	6	12	0
试验 4	1	-1	-1	1	13	15	28	2
$B_j = \sum XY$	100	20	-38	-6	$S_{\text{误}} = 0.5 \times \sum (Y_{i1} - Y_{i2})^2 = 3$			
$b_j = B_j / (4 \times 2)$	12.5	2.5	-4.75	-0.75	$f_{\text{误}} = N \times (M - 1) = 4 \times (2 - 1) = 4$			
$Q_j = b_j B_j$		50	180.5	4.5	$F_{0.1}(1, 4) = 4.54$			
$F = Q_j / (S_{\text{误}} / f_{\text{误}})$		4.2	15.0	0.4	$BOD_5 = 12.5 + 2.5X_1 - 4.75X_2$			
显著性 ($\alpha = 0.01$)		显著	高度显著	不显著(忽略)	$BOD_5 = 12.5 + 2.5X_1 - 4.75X_2$			

4 组合工艺中水处理规模最优经济模型构建

由以上混凝沉淀预处理和人工湿地后处理中水试验结果可知,影响该组合工艺出水达到《杂用水标准》的限制性控制指标为 BOD_5 ,通过这 2 种工艺的回归正交试验,分别得出了出水 BOD_5 与负荷、温度、加药量之间的一次回归方程如式(5)和(9)所示。

在绿色建筑节水与水资源利用中,中水处理受一年四季不同温度的影响,其出水水质也在变化波动。由式(5)、(9)得知,在相同进水负荷条件下,温度越低,出水 BOD_5 越高。在绿色建筑节水与水资源利用项目中,一旦设计施工建设后,混凝沉淀池的池容和人工湿地的面积均是固定的。为了充分利用组合工艺的效能,可以结合不同季节时中水总水量的需求,实现冬季产水少、夏季产水多,使得工程项目投资设计时该组合工艺投资额最低。

在式(5)中,不妨令 PAC 加药量为试验的中水平,即 $\rho = 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,用 PAC 加药量作为控制混凝沉淀工艺的运行参数,则式(5)可转化为:

$$BOD_5 = 2.05 N_v - 0.41T + 30.7 \quad (10)$$

为计算组合工艺的投资,将 $N_v = \frac{10^{-3}QC_0}{V}$ 代入式(10),可得:

$$BOD_{5\text{混凝出水}} = 2.05 \frac{10^{-3}QC_0}{V} - 0.41T + 30.7 \quad (11)$$

将 $N_A = \frac{10^{-3}Q \times BOD_{5\text{混凝出水}}}{A}$ 代入式(9)得:

$$BOD_5 = 1190 \frac{10^{-3}Q \times BOD_{5\text{混凝出水}}}{A} - 0.32t + 12.2 \quad (12)$$

式(11)代入式(12)中,可得:

$$BOD_5 = 2.44 \frac{10^{-3}Q^2 \times C_0}{AV} - 0.49 \frac{QT}{A} + 36.5 \frac{Q \times T}{A} - 0.32T + 12.2 \quad (13)$$

为使投资最低,可得出混凝沉淀和人工湿地组合工艺工程投资最优化模型:

$$\begin{aligned} \min f(V, A) &= P_{\text{混凝池}} V + P_{\text{人工湿地}} A \\ \text{s.t.} &\begin{cases} 2.44 \frac{10^{-3}Q^2 C_0}{AV} - 0.49 \frac{QT}{A} + 26.5 \frac{QT}{A} - 0.32T + 12.2 \leq BOD_5 \\ V \geq 0 \\ A \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

式中: $P_{\text{混凝沉淀池}}$ 为混凝池单位容积的投资,元 $\cdot \text{m}^{-3}$, 定量; V 为混凝池的容积, m^3 , 变量; $P_{\text{人工湿地}}$ 为人工湿地单位面积的投资,元 $\cdot \text{m}^{-2}$, 定量; A 为人工湿地的面积容积, m^2 , 变量; Q 为中水处理量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 定量; C_0 为中水进水 BOD_5 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 定量; T 为温度, $^\circ\text{C}$, 定量; $BOD_{5\text{限值}}$ 为中水出水 BOD_5 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 定量,根据中水出水用途选择,用于冲厕和车辆冲洗时 $BOD_{5\text{限值}} = 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 用于道路冲洗、消防、建筑施工时 $BOD_{5\text{限值}} = 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 用于城市绿化时 $BOD_{5\text{限值}} = 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同时满足多种用水功能时,取低值。

根据混凝沉淀和人工湿地组合工艺工程投资最优化模型,可以计算在不同季节(T)和水量平衡计算得出的中水流量(Q)条件下,分别求解不同条件

下的混凝沉淀与人工湿地组合工艺的设计和运行参数,以及两者的工程投资。在工程设计应用时,取其各种条件投资较高情况的最优化模型计算结果,使得不同条件下中水出水均能稳定达标。

5 结论

1)采用“混凝沉淀—人工湿地”组合工艺处理绿色建筑优质杂排水,对 BOD₅、浊度、TSS、氨氮、阴离子表面活性剂都有明显的去除效果,影响该组合工艺的限制性指标是 BOD₅。根据两段工艺不同的温度、负荷以及加药量的工况组合,中水处理可以分别达到《杂用水回用标准》的不同回用用途。

2)分别通过混凝沉淀和人工湿地的综合影响效能试验,得出两段工艺的一次回归正交方程,以此为基础构建的不同季节和不同负荷条件下该组合工艺的工程投资经济最优化模型,可以合理确定中水处理规模,为处理水质水量波动大的绿色建筑优质杂排水中水处理的优化设计、稳定高效运行以及中水处理的产水量和出水水质预测提供理论依据和技术支撑。

参考文献:

- [1] 何强,柴宏祥,张丽. 绿色建筑中水处理工艺及设施探讨[J]. 给水排水, 2007, 33(7): 90-92.
HE QIANG, CHAI HONG-XIANG, ZHANG LI. A discussion on modification of reclaimed-water pretreatment of green building [J]. Water & Wastewater, 2007, 33(7): 90-92.
- [2] MUHAMMAD A, GHULAM S, IRSHAD H, et al. Paper and board mill effluent treatment with the combined biological-coagulation-filtration pilot scale reactor[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(15): 7383-7387.
- [3] KWANG-HO C, SANG-JUNE C, EUI-DEOG H, et al. Effect of coagulant types on textile wastewater reclamation in a combined coagulation/ultrafiltration system[J]. Desalination, 2007, 202(1/2/3): 262-270.
- [4] ROLAND V, BRIGITTE M, ANDER H, et al. Prothrombotic changes with acute psychological stress: Combined effect of hemoconcentration and genuine coagulation activation [J]. Thrombosis Research, 2009, 123(4): 622-630.
- [5] SAMRANIL A, LARTIGES B, VILLIERAS F, et al. Chemical coagulation of combined sewer overflow: Heavy metal removal and treatment optimization[J]. Water Research, 2008, 42(4/5): 951-960.
- [6] AHMAD A, PUASA S. Reactive dyes decolourization from an aqueous solution by combined coagulation/micellar-enhanced ultrafiltration process[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 132(1/2/3): 257-265.
- [7] ROUSSEAU D, LESAGE E, STORY A, et al. Constructed wetlands for water reclamation [J]. Desalination, 2008(1/2/3), 218: 181-189.
- [8] LAURA E KAANGY, BRENDA M JOHNSON, JAMES W CASTLE, et al. Design and performance of a pilot-scale constructed wetland treatment system for natural gas storage produced water [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(6): 1877-1885.
- [9] CHRISTOS S, AKRATOS, JOHN N, et al. An artificial neural network model and design equations for BOD and COD removal prediction in horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 143(1/2/3): 96-110.
- [10] VYMAZAL J. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(1): 1-17.
- [11] JAUME P, JOSE V, JUAN J, et al. Subsurface-flow constructed wetlands in Spain for the sanitation of small communities: A comparative study [J]. Ecological Engineering, 2007, 30(4): 312-319.
- [12] 张勤,周兴伟,周健. 强化生物絮凝/三级人工湿地处理高浓度生活污水[J]. 中国给水排水, 2009, 25(1): 1-4.
ZHANG QING, ZHOU XING-WEI, ZHOU JIAN. Bioflocculation/three-stage constructed wetland for enhanced treatment of high-concentration domestic sewage[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(1): 1-4.
- [13] MARCO G, MARIALUISA M, CLAUDIO D, et al. Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater [J]. Desalination, 2007, 221(1/2/3): 113-127.
- [14] XING ZI-PENG, SUN DE-ZHI. Treatment of antibiotic fermentation wastewater by combined polyferric sulfate coagulation[J]. Fenton and sedimentation process, 2009, 168(2/3): 1264-1268.
- [15] 李晓东,孙铁珩,李海波,等. 人工湿地除磷研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1226-1232
LI XIAO-DONG, SUN TIE-HENG, LI HAI-BO, et al. Current researches and prospects of phosphorus removal in constructed wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3): 1226-1232.
- [16] CHRISTOS S AKRATOS, JOHN N PAPASPYROS, VASSILIOS A TSIHRINTZIS. Total nitrogen and ammonia removal prediction in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Use of artificial neural networks and development of a design equation [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(2): 586-596.
- [17] 翟俊,何强,肖海文,等. 折流湿地滤池+侧向潜流湿地床污水处理系统装置及方法: 中国, 200510057047. 2 [P]. 2005-04-28.

(编辑 王秀玲)