

运行参数对径流人工湿地有机物去除的影响

肖海文, 陈 妮, 柳登发, 翟 俊

(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: 通过正交试验考察了表观水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)、水深和运行前间隔天数对模拟径流处理人工湿地内有机物去除的影响, 结果表明 3 个运行控制参数对径流处理人工湿地有机物去除效果影响程度大小依次为 HRT、水深、运行前间隔天数, 其中 HRT 为关键影响因素, 对有机物去除效果的影响程度远大于其他 2 个参数; 有机物去除效果随 HRT 的增加而增加, 但当 HRT 大于 36 h, HRT 对 COD_{Cr} 去除效果的影响降低; HRT 越短, 运行前间隔天数对 COD_{Cr} 去除效率的影响越大; 0.2 m 和 0.4 m 水深的 COD_{Cr} 去除率差异并不明显, 但 0.6 m 水深时 COD_{Cr} 去除率显著降低, 水深增加导致氧传质能力的减弱和水力效率的下降是有机物去除效率降低的主要原因。停止进水期间, 人工湿地水相 COD_{Cr} 平均质量浓度随停进水天数的增加而持续下降, 但 UV_{254} 与 COD_{Cr} 质量浓度的比值上升趋势明显, 表明系统内根系分泌、微生物代谢产生的内源有机物占水相有机物组分增加。

关键词: 人工湿地; 径流; 有机物

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

Effect of Running Parameters on Organic Pollutants Removal in Constructed Wetland Treating Stormwater Runoff

XIAO Haiwen, CHEN Ni, LIU Dengfa, ZHAI Jun

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

Abstract: The effect of nominal hydraulic retention time, water depth and antecedent resting period on organic matter removal performance of constructed wetland treating runoff under stochastic intermittent constant inflow was investigated through orthogonal experiments. Results indicate that effect rank of the 3 running parameters on COD_{Cr} removal rate is: hydraulic retention time (HRT) > water depth > antecedent resting days, and HRT has more significant effect on COD_{Cr}

removal than the other two parameters. COD_{Cr} removal rate increases with the increasing of HRT, however, the effect of HRT on COD_{Cr} removal rate becomes unobvious when HRT is longer than 36h. The shorter the HRT is, the greater the effect of antecedent resting period on COD_{Cr} removal rate is. The difference in COD_{Cr} removal rate is not obvious for constructed wetland with water depth of 0.2 m and 0.4 m, however COD_{Cr} removal rate decreases significantly when water depth rises to 0.6 m which might result from the decreasing ability of oxygen transfer and hydraulic efficiency in wetland bed. Average concentration of COD_{Cr} of water column in wetland bed decreases with the increasing of antecedent resting days, but $\text{UV}_{254}/\text{COD}_{\text{Cr}}$ increases significantly, which indicates that inner-system organic production increases from macrophyte roots exudation and metabolic activity of microorganism.

Key words: constructed wetland; runoff; organic pollutant

随着点源污染控制水平的提高, 面源污染对我国水环境的威胁日益突出。人工湿地作为一种新兴的污水生态处理技术, 在农业径流及城市径流污染控制中的应用日益受到关注, 现已成为面源污染控制的重要对策之一^[1-4]。然而, 虽然自 20 世纪初第 1 个人工湿地建成运行至今人工湿地技术研究取得了重大进展^[5], 但这些研究绝大多数都建立在连续流进水、水质水量相对恒定的常规稳态运行基础之上, 这与径流处理随机间歇进水、水质水量波动的运行条件有本质的差别。而在实际运行中, 由于特殊的运行条件, 径流处理人工湿地往往表现出与常规污水处理人工湿地明显相异的污染物去除规律^[6-7]。目前, 针对径流处理人工湿地实际运行条件对处理效果影响的研究十分鲜见, 而径流处理人工湿地在随机间歇运行条件下的除污规律和特点尚不明确, 使得人工湿地在面源污染控制领域的进一步应用受到

限制。

本文以水平潜流人工湿地为例,模拟设有前置调蓄设施的径流处理人工湿地的运行条件,通过影响因素正交试验,考察随机间歇进水、进水量负荷恒定的运行条件下表观水力停留时间(hydraulic retention time, HRT, 即湿地孔隙容积与流量的比值)、水深及运行前间隔天数(antecedent resting days, ARD) 3 个主要运行控制参数对人工湿地内有机物去除的影响,以期对雨水径流处理人工湿地

的进一步研究及运行管理提供一定的理论依据和技术参数。

1 材料与方法

1.1 试验装置

采用的水平潜流人工湿地装置位于重庆大学实验室温室大棚内,如图 1 所示。图中 D_N 和 i 分别代表管径和人工湿地坡度。

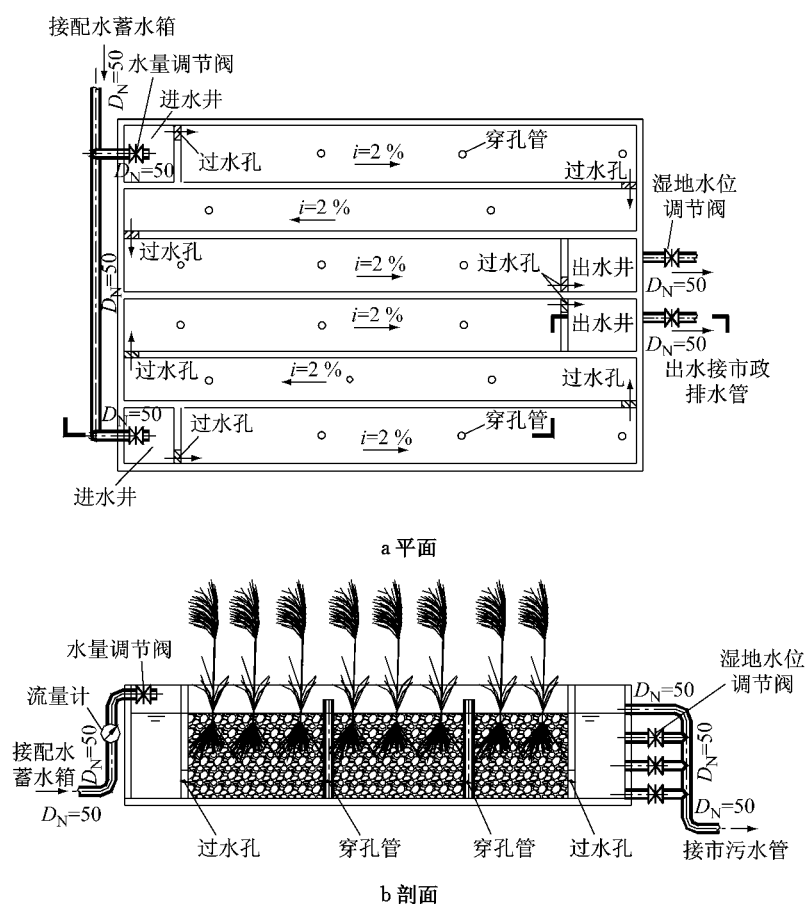


图 1 试验人工湿地装置平面剖面

Fig. 1 Plan and profile of the experimental constructed wetland

试验人工湿地分为并列对称布置的 2 组,每组 15.3 m^2 。主体湿地床为廊道折流式,每组共 3 个沟槽式廊道,廊道总长 21.0 m ,宽 0.8 m ,坡度 2% 。湿地床内填料采用本地石灰岩(以方解石为主要成分的碳酸盐岩)砾石,粒径为 $10 \sim 15 \text{ mm}$,填充高度 0.6 m 。2 组湿地床内的植物均为本地风车草(*Cyperus alternifolius*)和菖蒲(*Iris pseudoacorus*),栽种方式为混种,平均种植密度分别为 $20 \sim 25 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $40 \sim 45 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 。进水井通过阀门控制进水量,出水井通过水位调节阀可将湿地水位控制在 $0.2, 0.4$ 和 0.6 m 。

1.2 试验方法

试验模拟径流处理人工湿地的随机间歇进水的运行条件,进水由校园生活污水、自来水及葡萄糖等配制而成,水质(COD_{Cr} 、氨氮、总磷等指标)模拟实测城市住宅区径流^[8]。

试验分为正交试验和单因素工况试验。正交试验采用三因素六水平 $L_{18}(6^1 \times 3^2)$ 的正交表(表 1)设计试验工况,考察 HRT, ARD 和湿地床水深 3 个运行参数对有机物去除效果的影响程度和影响机制。每组工况试验进行 2 次,分别在并列的 2 组湿地中同时进行,进水运行时间为 $7 \sim 10 \text{ d}$, ARD 按工况安

排为1,3或8 d. 试验期间平均水温为26.3℃,最低水温为23.5℃,从而保证各组工况试验在基本相同的气温条件下进行.

表1 正交试验水平和因素

Tab.1 Parameters of experimental factors in orthogonal experiment plan

水平编号	HRT/h	人工湿地水深/mm	ARD/d
1	48	600	1
2	36	400	3
3	30	200	8
4	24		
5	20		
6	16		

1.3 采样及水质分析方法

在各工况运行过程中,每日10:00和15:00在2组湿地的进、出水井各采集水样1次作为进、出水水

样进行测试. 考察湿地沿程有机物情况时,采样点为进、出水井和各穿孔管(图1),共9个取样点. 穿孔管内用软管和洗耳球虹吸采样. 水样用45 μm滤膜抽滤后测COD_{Cr}质量浓度,测试方法见文献[9]. DO(dissolved oxygen)质量浓度用HACH sension1溶解氧仪在穿孔管内现场测定;254 nm紫外吸光度(UV₂₅₄,单位cm⁻¹)采用45 μm滤膜将水样抽滤后用紫外分光光度计测定. 文中有机物的芳构化程度^[10],即UV₂₅₄与COD_{Cr}质量浓度的比值为A, L·mg⁻¹·cm⁻¹.

2 结果

正交试验结果见表2. 由表2可见,在不同运行参数的工况下有机物去除率大小差异显著.

表2 正交试验运行参数、COD_{Cr}平均进、出水质量浓度与去除率

Tab.2 COD_{Cr} concentration and removal rate under different running conditions

工况序号	HRT/d	流量/ (m ³ ·d ⁻¹)	水深/mm	ARD/d	COD _{Cr} 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)		COD _{Cr} 质量浓度标准差/ (mg·L ⁻¹)		去除率/%
					进水	出水	进水	出水	
1	48[1]	0.029	200[3]	3[2]	113.6	25.5	43.8	6.5	77.6
2	36[2]	0.118	600[1]	3[2]	118.4	31.4	41.5	8.8	73.5
3	16[6]	0.265	600[1]	3[2]	99.8	69.8	35.2	15.9	30.0
4	48[1]	0.088	600[1]	8[3]	129.2	24.4	57.8	7.9	81.1
5	20[5]	0.071	200[3]	3[2]	101.4	31.7	44.5	14.4	68.8
6	20[5]	0.212	600[1]	8[3]	114.3	66.3	28.9	15.2	42.0
7	30[3]	0.047	200[3]	8[3]	136.3	28.3	42.1	11.8	79.2
8	24[4]	0.176	600[1]	1[1]	128.5	47.1	20.5	13.9	63.3
9	20[5]	0.141	400[2]	1[1]	105.1	39.7	31.6	18.2)	62.2
10	16[6]	0.088	200[3]	1[1]	110.2	56.0	78.5	23.1	49.2
11	30[3]	0.094	400[2]	3[2]	176.3	41.7	45.8	19.0	76.4
12	30[3]	0.141	600[1]	1[1]	122.3	31.2	41.1	11.5	74.5
13	36[2]	0.078	400[2]	8[3]	135.3	23.3	33.9	9.3	82.8
14	16[6]	0.176	400[2]	8[3]	101.8	46.3	54.2	18.4	54.5
15	48[1]	0.059	400[2]	1[1]	160.0	26.7	39.6	6.7	83.3
16	24[4]	0.118	400[2]	3[2]	113.7	32.1	48.3	14.1	71.8
17	24[4]	0.059	200[3]	8[3]	110.2	27.8	20.2	15.8	74.8
18	36[2]	0.039	200[3]	1[1]	160.3	27.3	29.0	9.7	83.0

注:[]内为正交试验中该考察因素的水平编号(表1);表中进、出水COD_{Cr}相关值为同一工况下2个人工湿地数据的均值.

3 分析与讨论

3.1 运行参数的影响程度比较

以COD_{Cr}去除率为评价指标,根据正交试验极差分析法^[11]对HRT、水深和ARD对有机物去除的影响程度进行统计分析,结果见表3,表中 $\bar{K}_1 \sim \bar{K}_6$ 为水平1~6的平均得分,ΔK为极差.

由表3可知,3个运行参数对COD_{Cr}去除率影响

表3 运行参数对有机物去除影响程度极差分析

Tab.3 Maximum difference analysis of running parameters affecting removal performance of COD_{Cr}

参数	\bar{K}_1	\bar{K}_2	\bar{K}_3	\bar{K}_4	\bar{K}_5	\bar{K}_6	ΔK	影响程度评价
HRT	80.7	79.0	76.7	70.0	57.7	44.6	36.1	关键
水深	60.8	71.5	72.1					重要
ARD	68.7	66.3	69.3					次要

的重要程度由大到小依次为HRT、水深、ARD,其中HRT为关键影响因素,对去除效果的影响程度远大

于水深和 ARD.

3.2 运行参数对有机物去除效果的影响

3.2.1 表观水力停留时间

由图 2 可知,有机物去除效果随着 HRT 增加而增加.当 HRT 小于 36 h 时,COD_{Cr} 去除率随 HRT 的变化剧烈,表明在这一水力负荷范围内有机物去除效果并不稳定,去除率受 HRT 影响变化明显.当 HRT 大于 36 h 后,随着 HRT 的增长,COD_{Cr} 去除率的增加已趋于平缓,表明此时有机物去除随水力负荷的变化已逐渐平稳,因此可认为本试验条件下最佳 HRT 为 36 h.

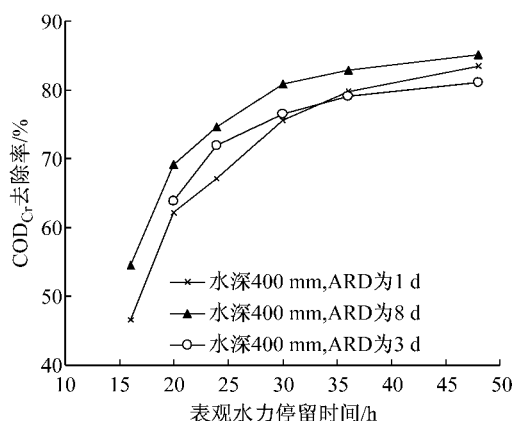


图 2 表观水力停留时间对 COD_{Cr} 去除率的影响

Fig.2 Effect of HTR on COD_{Cr} removal rate

3.2.2 水深

由图 3 可看出,在 HRT 和运行间隔天数相等的情况下,随着水深的增加,COD_{Cr} 去除率基本呈下降趋势,但 0.2 m 和 0.4 m 水深的 COD_{Cr} 去除率差异并不明显.0.6 m 水深时,COD_{Cr} 去除率变化相对于 0.2 m 和 0.4 m 来讲降低趋势非常显著,而且 HRT 越短 COD_{Cr} 去除率下降的幅度越大.

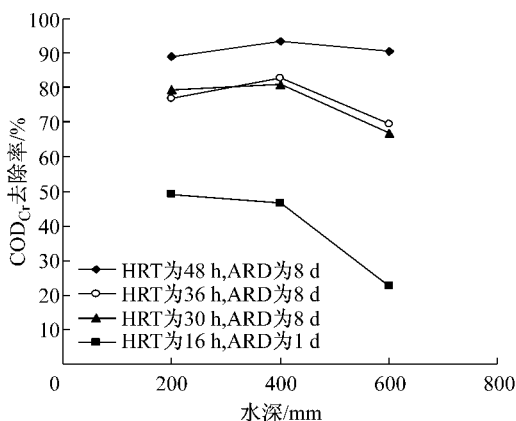


图 3 水深对 COD_{Cr} 去除率的影响

Fig.3 Effect of water depth on COD_{Cr} removal rate

一般来说,不同水深条件下湿地内水力学状态差别明显. Holland 等^[12]研究表明,在水力负荷相同条件下,水深较大的人工湿地系统内部存在更多的短流和死区,系统水力效率明显劣于其水深较浅的工况,从而导致污染物在湿地内接触反应时间的缩短.另外,试验发现在水深 0.6 m 运行,当 HRT 小于 30 h 时,流速增大导致水头损失增加,使湿地床前 8 m 段出现了表面漫流现象.表面漫流减少了污染物与基质的接触,不论是填料的物理截滤作用还是微生物的降解作用均大大降低,成为水深增加 COD_{Cr} 去除率下降的重要原因.

人工湿地内有机物的去除还与系统内氧的传质情况密切相关.图 4 为不同水深时在沿程穿孔管内测得的湿地水相内溶解氧沿垂直高度的分布情况.由图 4 可知在不同水深下湿地床内溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 的质量浓度均随着垂直高度的增加而增加,不同水层之间存在明显的质量浓度梯度.湿地床内水深的增加导致了气水两相传质的难度的增加,使床体内水深越大溶解氧越低.由图 4 可知,在 HRT 为 36 h 的情况下,水深 0.2, 0.4 和 0.6 m 工况下人工湿地床体内 DO 平均为 1.60, 1.30 和 0.75 mg · L⁻¹,可见由于水深增加而导致氧气传质能力的降低应该是有机物去除效率降低的另一个重要原因.

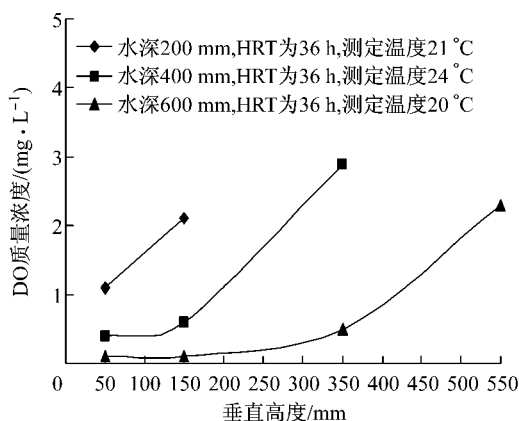


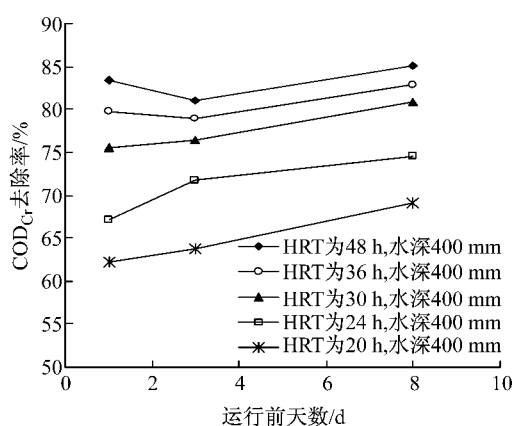
图 4 湿地床水相内溶解氧质量浓度沿垂直高度的分布

Fig.4 Vertical distribution of dissolved oxygen in wetland bed

3.2.3 运行前间隔天数

由图 5 可知,当 HRT 较长时,ARD 对 COD_{Cr} 去除率的影响并不明显;随着 HRT 的减小,COD_{Cr} 去除率随着 ARD 的增加而增加的趋势变得明显,说明 HRT 越短,ARD 对处理效果影响越大.

在人工湿地用于处理雨水径流的实际工程中 ARD 是由 2 次降雨间隔时间和调蓄池容积共同决

图5 运行前间隔天数对 COD_{Cr}去除率的影响Fig.5 Effect of ARD on COD_{Cr} removal rate

定的运行参数. 在停止进水期间虽然无外来有机污染物输入, 但滞留于人工湿地系统内的有机物仍然继续进行着一系列的转移和转化过程. 沉淀、截留在基质表面的有机物在微生物的作用下继续降解, 同时植物、微生物通过死亡、分解或代谢分泌活动又能向水中释放有机物质, 湿地内部有机物浓度即为这 2

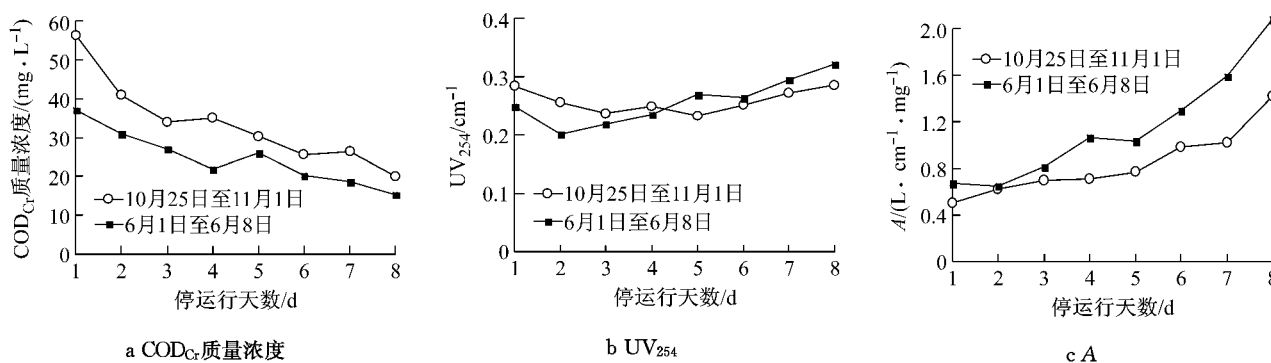


图6 停运行期间湿地水相内有机物参数的变化

Fig.6 Variation of organic parameters during resting period

由图6可看出, 在停止进水期间, 人工湿地水相内有机物在量和组成上均发生了改变.

在停止运行期间, 湿地床水相中 COD_{Cr} 质量浓度持续下降(图6a), 下降趋势随停运行天数的增加由快逐渐减慢, 表明停止进水后, 滞留在湿地系统中的有机物仍然继续在各种物理、化学和生化过程的协同作用下从水中去除, 其去除速率大于系统内植物根系分泌、植物及微生物新陈代谢产生有机物的速率. 在停止进水期间, 虽然有机物水平总体呈下降趋势, 然而 UV₂₅₄ 水平却处于小幅增长的状态(图6b). 10月25日至11月1日以及6月1日至6月8日闲置期 UV₂₅₄ 值增幅分别为4%和21%. 高紫外吸收通常意味着水中含共轭双键的大分子(分子量500~3000)不饱和醛、酮以及芳香族有机物的增加^[12],

种过程综合作用结果^[13-14], 而这一结果必将通过人工湿地接下来的运行体现在后续出水水质上. 另外, ARD的重要影响还表现在对湿地持有水分的减少上. 如果2次降雨间隔时间过长, 调蓄池容积又过小, 人工湿地长时间处于干旱状态, 蒸发、蒸腾作用导致水分流失将危及植物的生长以及整个人工湿地的生态功能, 这是径流处理人工湿地设计必须考虑的问题.

3.3 停止进水期间水相中有机物的转移和转化

湿地内通过植物及微生物死亡分解或代谢分泌活动向水中释放有机物质, 这部分有机质主要由含 sp² 共轭双键的酚类、不饱和醛或酮、腐殖酸、木质素等组成^[13-15], 因此, 可用 UV₂₅₄ 作为这部分有机物在水中含量的间接表征. 为了考察径流处理人工湿地在停止进水期间系统内有机物的转移转化规律, 测定了2个8d的停进水期湿地系统内部 COD_{Cr} 质量浓度和 UV₂₅₄ 的变化, 如图6所示. 图中有机物相关指标为2个湿地中沿程9个取样点取样测定的平均值, 取样深度为水深0.2m.

这部分有机物虽处于溶解态, 但可生化性较差. 因此由图6a, 6b可推断停止进水后3d COD_{Cr} 质量浓度下降速率较大, 这段时间主要以易生化有机物在微生物作用下的降解作用为主, 此后随着根系分泌、植物及微生物新陈代谢或残体的分解作用, 水中不易生化降解有机物增加, 导致总有机物降解速率降低, 表现在 COD_{Cr} 质量浓度下降速率逐渐减缓. 湿地内根系分泌、植物及微生物新陈代谢作用导致了系统内不饱和醛、酮、芳香族有机物的累积, 累积速率随温度的增加和植物生长作用的加强而增加. 由图6a还可知, 在温度较高、植物生长旺盛的夏季(6月) UV₂₅₄ 与 COD_{Cr} 质量浓度比值的增长高于温度低、植物长势弱的秋季(10月).

A值可从侧面反应水中具共轭双键结构有机物

的组成比例,或称芳构化程度^[10]。由图 6b 和 6c 可看出,在停止进水期间,虽然湿地系统内 254 nm 紫外吸光度 UV_{254} 值增长幅度较小,但 A 值增长却十分明显,10 月 25 日至 11 月 1 日以及 6 月 1 日至 6 月 8 日的停进水期间 A 值增幅分别达 182% 和 221%,说明在停运行期间湿地水相内有机物组成发生了改变,停止运行时间越长,温度越高,有机物组成的芳构化程度就越大。值得注意的是,在 5~8 月试验中,目视观测到停运行期间湿地内所取水样的色度较进水时明显增高,其颜色与天然水体的黄绿色较接近。由于没有外来有色污染源输入,因此可认为色度的增加主要为系统内部根系分泌、植物及微生物代谢、分解释放入水中的分子量较大的成色有机物造成。

综上所述,在停止进水期间,湿地系统内总有机物呈现下降趋势,并且湿地内有机物的组成发生了改变。根系分泌、植物及微生物代谢、分解作用导致水中有机物芳构化程度增加。

4 结论

(1) 在恒定负荷、间歇运行条件下人工湿地 HRT、湿地床水深和 ARD 3 个主要运行控制参数对 COD_{Cr} 去除率影响程度由大到小依次为 HRT、水深、ARD,其中 HRT 为关键影响因素,对有机物去除的影响程度远大于水深和 ARD。

(2) 有机物去除效果随 HRT 的增加而增加,但当 HRT 大于 36 h 后,HRT 对 COD_{Cr} 去除效果的影响明显降低。

(3) 随着水深的增加, COD_{Cr} 去除率基本呈下降趋势,但 0.2 m 和 0.4 m 水深的 COD_{Cr} 去除率差异并不明显;0.6 m 水深时, COD_{Cr} 去除率相对于 0.2 m 和 0.4 m 来讲降低程度显著。

(4) HRT 越短,ARD 对 COD_{Cr} 去除效率的影响越大。

(5) 在停止进水期间人工湿地水相 COD_{Cr} 随停进水天数的增加而下降,但 UV_{254} 与 COD_{Cr} 质量分数的比值上升表明湿地水相内由根系分泌、植物及微生物代谢产生的内源有机物的组分增加。

参考文献:

[1] Elodie M, Sylvain P, Etienne F, et al. Removal of pesticide mixtures in a stormwater wetland collecting runoff from a vineyard catchment [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(11): 2317.

[2] Derrick Y F L, Kin C L. Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving stormwater [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(5): 735.

[3] Ko C H, Chang F C, Lee T M, et al. Impact of flood damage on pollutant removal efficiencies of a subtropical urban constructed wetland. [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(20): 4328.

[4] 舒朝会,马邕文,何丽君,等.城市降雨径流人工湿地处理的效能研究[J]. *环境工程学报*, 2011, 6(5): 1305.

SHU Zhaohui, MA Yongwen, HE Lijun, et al. Efficiency study of improved constructed wetland for urban runoff treatment [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 6(5): 1305.

[5] Kadlec R H, Wallace S D. *Treatment Wetlands* [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

[6] Kadlec R H. Nitrate dynamics in event-driven wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 503.

[7] LU Shaoyong, WU Fengchang, XIANG Changsheng, et al. Phosphorus removal from agricultural runoff by constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(3): 402.

[8] 肖海文,翟俊,邓荣森,等.处理生态住宅区雨水径流的人工湿地运行特性研究[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(11): 34.

XIAO Haiwen, ZHAI Jun, DENG Rongsen. Performance of constructed wetland for treatment of stormwater runoff in eco-residential area [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(11): 34.

[9] 国家环境保护总局,《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M]. 3 版. 北京:中国环境科学出版社, 1991.

State Environmental Protection Administration of China, "Monitoring and Analysis Method of Water and Waste Water" Editorial Board. *Monitoring and analysis method of water and waste water* [M]. 3rd ed. Beijing: China Environmental Science Press, 1991.

[10] 王占生,刘文君.微污染水源饮用水处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1999.

WANG Zhansheng, LIU Wenjun. *Micro-polluted source water treatment technology for drinking water* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999.

[11] 田胜元,萧曰嵘.试验设计与数据处理[M]. 4 版. 北京:中国建筑工业出版社, 2000.

TIAN Shengyuan, XIAO Yuerong. *Experiment design and data processing* [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.

[12] Holland J F, Martin J F, Timothy G, et al. Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristics [J]. *Ecological Engineering*, 2004, 23(3): 189.

[13] Pinney M L, Westerhoff P K, Baker L. Transformations in dissolved organic carbon through constructed wetlands [J]. *Water Research*, 2000, 34(6): 1897.

[14] Trisha L CM, William F H, Michael R B, et al. Organic nitrogen exports from urban stormwater wetlands in North Carolina [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(4): 589.

[15] Chin Y P, Aiken G O, Loughlin E. Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic substances [J]. *Environmental Science and Technology*, 1994, 28(11): 1853.