

我国人工湿地在城市污水处理厂尾水脱氮除磷中的研究与应用进展

管 策^{1,2}, 郁达伟^{1,2}, 郑 祥^{1*}, 魏源送²

(1.中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2.中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘 要:近年来人工湿地(Constructed Wetland)在城市污水处理厂尾水脱氮除磷中的研究与应用受到了广泛关注。通过文献调研,系统总结了我国不同区域污水处理厂二级生化出水的水质特征,重点讨论和分析了人工湿地类型及其运行操作对二级出水脱氮除磷效果的影响。作为一种深度处理二级出水的有效手段,人工湿地可大幅削减进入受纳水体的氮磷污染负荷,改善受纳水体的水质。强调根据二级出水特征与受纳水体的需求,因地制宜开展人工湿地的研究与应用。

关键词:人工湿地;二级处理出水;脱氮除磷

中图分类号:X799.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)12-2309-12

Removing Nitrogen and Phosphorus of Effluent from Wastewater Treatment Plants by Constructed Wetlands in China: An Overview

GUAN Ce^{1,2}, YU Da-wei^{1,2}, ZHENG Xiang^{1*}, WEI Yuan-song²

(1.School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2.Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Research and application of constructed wetlands (CW) for removing nitrogen and phosphorus of effluent from wastewater treatment plants (WWTPs) are recently paid more and more attention due to stringent regulations on water pollution control. With thoroughly literature review, this paper summarizes the water quality characteristics of effluent from WWTPs in different regions of China, especially focuses on the impact of CW types and its operational parameters on nutrients removal of effluent. As a kind of cost-effective technology for nutrients removal of effluent from WWTPs, CW would play a key role in improving water quality of receiving water bodies through greatly reducing pollutants load of nitrogen and phosphorus. CW should be selected and applied in practice for advanced treatment of the secondary sewage according to characteristics of WWTPs' effluent and water quality improvement of receiving water bodies.

Keywords: constructed wetlands; secondary sewage; removing nitrogen and phosphorus

改革开放以来,尽管我国污水处理取得了长足进步,但我国的水环境质量不容乐观,水污染防治形势严峻。根据《2010 年中国环境状况公报》,全国地表水污染依然较重,七大水系总体为轻度污染,湖泊(水库)富营养化问题突出。2010 年我国共处理城市污水 337.2 亿 m³,虽然污水二级生物处理可削减大部分污染物,但二级出水的排放量大,且氮、磷浓度仍然较高,这对自净能力有限或已受到污染的受纳水体来

说,并不能从根本上解决受纳水体的富营养化问题,只能延缓其发展趋势,同时考虑到国际公认的水体发生富营养化的临界值^[1](TN 0.2 mg·L⁻¹、TP 0.2 mg·L⁻¹),二级出水依旧是造成受纳水体富营养化的主要原因之一。为了改善受纳水体的水环境质量,二级出水亟待深度处理。作为典型的生态处理技术,人工湿地广泛应用于污染水体的水质净化与恢复、面源污染控制、雨水处理与利用、污水处理等领域,具有投资及维护费用低、出水水质好、二次污染小等优点^[2],是削减二级出水中氮磷污染物的有效工艺之一^[3]。它不仅可满足二级出水脱氮除磷的水质要求,而且可大幅削减进入受纳水体的污染负荷,在一定程度上保障受纳水体的水质需求,具有良好的环境、经济效益。

收稿日期:2012-06-04

基金项目:国家科技重大专项“水体污染控制与治理”(2009ZX07209-005)

作者简介:管 策(1987—),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事人工湿地方向的研究。E-mail:gcse@yeahoo.cn

* 通信作者:郑 祥 E-mail:zhengxiang7825@163.com

本文通过文献调研,系统总结我国不同区域和不同工艺的城市污水二级出水的水质特征,并对人工湿地深度处理二级出水的脱氮除磷效果及其运行操作参数进行总结和分析,以期为人工湿地在城市污水二级出水中的推广应用提供参考。

1 城市污水二级处理出水的水质特征

1.1 地域特征

比较我国和发达国家污水排放标准(表 1)发现,各国污水处理厂排放标准中氮、磷的限值均处于较高水平,这表明在一定程度上二级出水均存在深度处理的需求。表 2 列举了我国不同区域、城市的二级出水主要指标,水质呈现明显的地域特征。

(1)区域:氨氮浓度高于全国平均值($12.63\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的区域依次是华北($20.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、西北($17.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、华中($14.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);COD 浓度高于全国平均值($51.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的区域依次是华东($66.16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、华中($64.47\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、西北($55.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。TP 浓度高于全国平均值($1.94\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的区域依次是华中($3.61\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、华东($2.68\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、华北($2.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。华中地区二级出水的有机物、氮、磷均高于全国平均值,西北地区二级出水的 COD、氨氮和 TN 高于全国平均值,华北地区二级出水的氨氮、TN 和 TP 高于全国平均值。尽管东北地区二级出水中三类污染物的浓度处

于较低水平,但仍旧超过水体富营养化临界值,因此仍需深度处理以避免对地表水体产生污染。

(2)特大型城市:COD 浓度均低于全国平均值($51.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);仅北京二级出水的氨氮和 TP 浓度高于全国平均值;北京、上海二级出水的 TN 浓度高于全国平均值($21.54\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);北京市二级出水氮、磷浓度过高,上海在脱氮方面效果较差;相反,重庆二级出水的氨氮和 TN 浓度较低;广州二级出水的 TP 浓度较低($0.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

(3)省会城市:四个典型省会城市的分析结果表明,仅哈尔滨二级出水的 COD 浓度高于全国平均值;杭州和哈尔滨二级出水的氨氮浓度高于全国平均值;各市二级出水中 TN 浓度均低于全国平均值,且较为接近;仅西安二级出水中 TP 浓度超过全国平均值($1.94\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。四个城市中,哈尔滨在有机物和氮的去除方面表现较差,但其出水 TP 浓度最低($0.99\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

(4)地(县)市:选取四个地(县)级市进行对比分析,二级出水中各种污染物浓度均低于全国平均值,除宝鸡市二级出水 COD 浓度高于其省会城市外,其余均优于省会城市;宁波、大庆市二级出水中 TP 浓度高于相应省会城市;宝鸡市二级出水 TP 浓度最低,且低于西安市,表现出较好的除磷效果,但仍高于限值($0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),需要深度处理。

表 1 不同污水排放标准的碳、氮、磷污染物排放限值比较($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
Table 1 Limits of C,N,P pollutants for different sewage discharge standards($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

国家	标准	COD _{Cr}	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TP	TN
中国城镇污水处理厂污染物排放标准	一级 A	50	10	10	5(8)	0.5	15
	GB 18918—2002	一级 B	60	20	20	8(15)	1.0
中国景观娱乐用水水质标准	A	6	4		0.5	0.02	—
	GB 12941—1991	B	6	4	0.5	0.02	—
		C	10	80	0.5	0.05	—
中国地表水环境质量标准	I 类	15	3		0.15	0.02	0.2
	GB 3838—2002	Ⅱ类	15	3	0.5	0.1	0.5
		Ⅲ类	20	4	1.0	0.2	1.0
		Ⅳ类	30	6	1.5	0.3	1.5
		Ⅴ类	40	10	2.0	0.4	2.0
美国(基于技术的排放限值)	二级标准	—	30	30	—	—	—
	Riveroaks	—	2	2	—	0.4	1.2
欧盟(欧盟污水处理指令)		125	25	35(>10 000p.e.)	—	2(10 000~100 000p.e.)	15(10 000~100 000p.e.)
				60(2000~10 000p.e.)		1(>100 000p.e.)	10(>100 000p.e.)
日本(东京排水对策)	51~200 人	10	15	—	—	1	20
	>200 人	10	15	—	—	1	10

注:①括号外数值为水温>12℃时的控制指标,括号内数值为水温≤12℃时的控制指标;②p.e.(population equivalent)人口当量,60 g BOD₅·d⁻¹。

1.2 处理工艺

城市污水二级处理工艺不同,其出水的污染物浓度也不同(表 3),这表明城市污水二级处理工艺对其出水水质的影响较大。例如,A²/O 一体氧化沟和卡鲁赛尔氧化沟对有机物和氮的去除效果较好;SBR 工艺出水 TP 浓度较低;CAST 工艺对于各目标污染物的去除率均处于中间水平。

2 人工湿地类型及其运行参数对氮磷去除的影响

2.1 人工湿地类型及其应用状况

2.1.1 人工湿地类型

人工湿地按系统布水方式的不同或者水流方式差异一般分为表面流人工湿地(FWS)和潜流人工湿地(SFS),表面流人工湿地在北美地区得到了大量的工程应用,约占 2/3^[44],并可应用于某些特殊场合,如污染河道的原位修复等。

但表面流人工湿地易受自然气候条件影响,负荷

低、去污能力有限,而潜流人工湿地的处理效果受气温影响小,目前国内外的研究和应用较多^[45-46]。潜流人工湿地结构不同,则其水流方式也不同,进而影响湿地的脱氮除磷效果。例如:水平潜流和垂直潜流人工湿地内部的水力条件存在一定差异^[47],使垂直潜流人工湿地的 TN 去除效果优于水平潜流人工湿地^[48];复合垂直流人工湿地具有独特的下行流和上行流两个串联单元,形成了好氧-缺氧-厌氧-好氧的功能区,可通过硝化-反硝化途径有效去除 TN,日益得到重视。如表 4 所示,复合垂直流人工湿地表现出良好的氮、磷去除效果,可深度净化二级出水。

2.1.2 基质

湿地基质、植物和微生物是人工湿地的三大基本要素,对污染物的转化与去除具有重要作用。基质的沉淀和吸附作用是磷素最主要的去除途径,贡献率高达 70%~87%^[56-61]。基质既可通过吸附作用直接去除氨氮^[62-64],也可通过改变植物根际环境来影响氮素的转化和去除。

表 2 我国不同地区污水处理厂二级生化出水水质统计^[4-43](mg·L⁻¹)
Table 2 Literature data of effluent quality from WWTPs in different regions of China^[4-43](mg·L⁻¹)

地区/城市	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
区域(2004—2010 年)				
华北	51.05±20.64	20.00±9.79	25.63±13.40	2.51±1.59
华南	33.99±12.56	6.63±9.09	16.63±7.52	1.11±0.70
华中	64.47±36.43	14.67±6.94	23.28±0.32	3.61±0.37
华东	66.16±21.56	11.82±2.50	15.25±12.34	2.68±1.63
东北	46.94±4.01	10.16±6.25	20.09±8.51	1.25±0.07
西北	55.11±8.59	17.32±9.06	30.10±18.15	0.92±0.51
西南	29.30±9.13	4.31±5.55	13.48±4.98	2.42±1.12
全国	51.64±22.11	12.63±9.02	21.54±12.49	1.94±1.28
特大型城市				
北京(2005 年)	39.50±31.89	29.80±5.23	38.90±21.21	1.96±2.90
上海(2011 年)	33.14±9.10	11.42±12.44	22.16±11.26	1.79±0.87
广州(2008 年)	41.30±6.65	6.30±3.57	12.10±7.87	0.80±0.76
重庆(2007—2008 年)	24.75±9.54	1.10±1.50	15.91±3.63	1.13±0.16
省会城市				
杭州(2006—2007 年)	37.58±3.95	15.12±2.08	21.51±3.67	1.17±0.30
福州(2004 年)	27.40±1.68	1.90±0.75	16.90±0.94	1.58±0.13
西安(2009—2010 年)	27.50	7.00	19.00	2.10
哈尔滨(2008—2009 年)	55.00±3.00	14.54±2.69	20.78±2.07	0.99±0.50
地级市				
宁波(2009—2010 年)	27.50±6.30	—	8.30	1.40
厦门(2010 年)	<50	1.67	15.15	1
宝鸡(2006 年)	44.50±7.46	5.65±0.92	9.60±0.55	0.45±0.17
大庆(2006 年)	44.11±13.63	3.81±1.38	—	1.27±0.05

表 3 不同污水处理工艺的二级生化出水水质统计^[20,22,28,34-38]

Table 3 Effluent quality of different wastewater treatment processes^[20,22,28,34-38]

工艺	规模/m ³ ·d ⁻¹	COD/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	地点
A ² /O 一体氧化沟	60 000	24.75±9.54	1.10±1.50	15.91±3.63	1.13±0.16	重庆
A/O	400 000	37.58±3.95	15.12±2.08	21.51±3.67	1.17±0.30	杭州
A ² /O	325 000	55.00±3.00	14.54±2.69	20.78±2.07	0.99±0.50	西安
SBR	90 000	44.50±7.46	5.65±0.92	9.60±0.55	0.45±0.17	宝鸡
曝气生物滤池	80 000	44.10±13.63	3.81±1.38	—	1.27±0.05	大庆
卡鲁赛尔氧化沟	160 000	27.50±6.30	—	8.30	1.40	宁波
CAST	50 000	40.20	6.17	15.64	1.73	南京

表 4 复合垂直流人工湿地的脱氮除磷效果

Table 4 Performance of nitrogen and phosphorus removals in the integrated vertical-flow constructed wetlands

植物类型	基质	进水氮、磷浓度/ mg·L ⁻¹	湿地尺寸/m (长×宽×高)	处理规模	主要工艺参数	氮磷去除效果	参考文献
石菖蒲 (<i>Acorus gramineus</i> Soland) 空心菜(<i>Swamp Morningglory</i>) 空心莲子草 (<i>Alternanthera philoxeroides</i>) 慈姑(<i>Sagittaria sagittifolia</i>)	砾石	NH ₄ ⁺ -N: 6.44~15.2 TN: 10.24~35.24 TP: 0.51~2.73	3×1.3×1	—	间歇运行; HRT=3 d; HLR=0.32 m·d ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N: 50.06% TN: 40.32%~78.67% (优于 GB18918-2002 一级 A 标准) TP: 51.76%~85.85%	[21]
空心菜(<i>Swamp Morningglory</i>) 芦苇(<i>Phragmites australis</i>) 禾稗(<i>Echinochloa crusgalli</i>)	卵石、细砂、 豆石	NH ₄ ⁺ -N: 12 TP: 2	0.6×0.35×0.7	—	HLR=0.4 m·d ⁻¹ ; 间歇运行;	NH ₄ ⁺ -N: 82.15% TN: 60.32% TP: 30.15%	[49]
香根草(<i>Vetiveria zizanioides</i> L.) 薏苡(<i>Coix lacryma-jobi</i>)	粗砂、钢渣、 泥炭	TP: 0.73~3.33 NH ₄ ⁺ -N: 2.15~6.27	1×1×1.4	1.2 m ³ ·d ⁻¹	连续运行	TN: 92.41% NH ₄ ⁺ -N: 98.05% TP: 96.40%	[50-51]
芦苇(<i>Phragmites australis</i>) 空心菜(<i>Swamp Morningglory</i>) 油麦菜(<i>Lactuca sativa</i> L.)	卵石、细砂、 豆石	NH ₄ ⁺ -N: 12 TP: 4	0.6×0.35×0.7	—	HLR=0.4 m·d ⁻¹ ; 间歇运行;	TN: 70% NH ₄ ⁺ -N: 80%	[52]
香蒲(<i>Typhalatifolia</i>) 美人蕉(<i>Canna indica</i>)	无烟煤、生物陶粒、 沸石	TN: 44.2	0.3×1	60 L·d ⁻¹	HLR=0.85 m·d ⁻¹ ; 连续运行;	NO ₃ ⁻ -N: 72.3% TN: 68.2%	[53]
美人蕉(<i>Canna indica</i>)	石灰石、砾石、土壤	NH ₄ ⁺ -N: 11.74 TN: 20.81 TP: 7	2×1.8×1.0	—	HLR=0.121~ 0.725 m·d ⁻¹ ; 间歇运行;	TN: 70.54%; NH ₄ ⁺ -N: 73.50%; TP: 92.50%	[54]
香根草 (<i>Vetiveria zizanioides</i> L.)	碎石、煤渣	NH ₄ ⁺ -N: 9.2~33.4 TN: 14.6~41.2	2×1×0.75	—	HLR=0.6~0.8 m·d ⁻¹ HRT=7 d 连续运行	NH ₄ ⁺ -N: 67% TN: 80%	[55]

注: HRT 为水力停留时间; HLR 为水力负荷。下同。

基质可分为三大类^[65-67]: ①天然材料: 包括矿物、岩石、土壤和海洋沉积物, 如白云石、石灰石、硅酸钙盐矿、沸石、页岩等, 这些材料既可直接使用, 也可经过前处理(如碾磨、热处理等)以提高吸附性能; ②工业副产品: 主要来自钢铁、采矿和发电三大行业, 如高炉矿渣、电弧炉钢渣、炉渣等, 可有效提高废物的综合利用效率; ③人造产品: 主要是指轻质聚合体(LWA, light weight aggregates)。

基质在人工湿地结构中占有最大体积, 是人工湿地区别于自然湿地的重要特征^[68]。国内外有关基质的研究主要集中在不同基质对有机物、氮和磷等污染物的净化效果^[69-70]及其去除机理^[71]。不同基质各有优缺

点, 如沸石^[72]的氨氮去除效果较好, 砾石^[73]、钢渣、煤灰渣^[74]等的除磷效果较为显著。为了充分发挥各类基质优势, 人工湿地往往由多种基质组成, 以有效去除各种污染物, 并可同时有效避免堵塞, 延长运行周期。

2.1.3 植物

大量研究表明^[47], 不同湿地植物在生长速度、污染物的吸收转化能力、泌氧能力等存在显著差异, 这导致基质中的微生物种群及数量有所不同, 筛选适宜的植物对稳定和提高人工湿地的净化功能具有重要意义。

表面流人工湿地的植被类型较为丰富, 包括沉水、浮水、挺水等多种水生植物类型。人工湿地中的植

物不仅可以直接吸收、利用污水中可利用态的营养物质,吸附和富集重金属及一些有毒有害物质^[75],而且输送氧气至根区,利于微生物呼吸^[76],其庞大的根系为细菌提供了多样的生境,利于根区细菌群落降解多种污染物等。国内外最常用的湿地植物种类主要有芦苇(*Phragmitesaustralis*)、香蒲(*Typhalatifolia*)和灯心草(*Juncuseffusus*)^[77],而凤眼莲(*Eichhorniacrassipes*)、黑三棱(*RhizomaScirpiYagarae*)、水葱(*Scirpusvalidus*)等植物也比较常用^[77]。从表 5 可知,大量植物应用于表面流人工湿地系统,在不同程度上发挥了脱氮除磷的作用,强化了人工湿地的去除效果。

2.1.4 脱氮除磷机制

人工湿地可通过多种机制脱氮,包括生物(微生物作用、植物吸收等)、物理(沉积、挥发等)和化学反应(吸附作用)。Vymazal^[85]考察了水平潜流人工湿地脱氮情况,认为湿地中 N 的主要去除机制是有氧区的硝化细菌和厌氧区的反硝化细菌共同完成的,有文献表明^[47],其贡献率达 80%;而挥发作用、吸附作用和

植物吸收在脱氮方面并未发挥较大作用。

人工湿地除磷主要依赖湿地基质、水生植物和微生物以及三者之间的联合作用,通过一系列复杂的物理(沉积)、化学(沉淀、吸附)以及生物(植物吸收、微生物吸收与积累)的途径,实现除磷的目的^[86-87](表 6)。

2.2 人工湿地运行操作

2.2.1 运行方式

运行操作不仅直接影响人工湿地的脱氮除磷效果,而且在一定程度上决定了人工湿地的系统稳定性。人工湿地运行方式可分为连续运行和间歇运行两种。Laak 等^[91]发现,连续运行较为简便、快捷,且处理水量更多;但是,仅依靠系统自身复氧并不能满足有机物分解和微生物作用的需求,且易造成系统堵塞,进而影响脱氮除磷效果,因而需要通过改变运行方式来增加系统的溶解氧。已有研究表明^[92],垂直流人工湿地采用间歇运行方式可提高系统中的溶解氧水平,从而提高湿地的 COD、氨氮和 TN 去除效果。由表 7

表 5 表面流人工湿地中不同植物对于脱氮除磷的影响
Table 5 Removals of nitrogen and phosphorus with different plants in surface flow constructed wetland

植物类型	进水氮磷浓度/ mg·L ⁻¹	湿地尺寸/m (长×宽×高)	处理规模	工艺参数	氮磷去除效果	参考文献
石菖蒲 (<i>AcorusgramineusSoland</i>)	污水综合排放标准 GB 8978—1996 的一级	1.0×0.5×0.6	—	间歇运行; HRT=1~7 d	NH ₄ -N:86.3% TP:46.5%	[78]
美人蕉(<i>Canna indica</i>)					NH ₄ -N:87.2% TP:60.4%	
水芋(<i>Calla palustris</i>)					NH ₄ -N:74.2% TP:54.1%	
杜鹃(<i>Rhododendronsimsii</i>)					NH ₄ -N:76.1% TP:61%	
一叶兰(<i>Common Aspidistra</i>)					NH ₄ -N:77.3% TP:41.5%	
袖珍椰子 (<i>Chamaedoreaelegans</i>)	NH ₄ -N:0.02~0.85 NO ₃ -N:7.70~10.56	29×11×1.2	—	HLR=5~50 cm·d ⁻¹	NH ₄ -N:76.3% TP:46.2%	[79]
香蒲(<i>Typhalatifolia</i>)					NH ₄ -N:0.00~0.57 mg·L ⁻¹ NO ₃ -N:5.72~10.22 mg·L ⁻¹	
芦苇(<i>Phragmitesaustralis</i>)						
混合大型植物,草						
姜花 (<i>Hedychiumcoronararium</i>)					TN:71% NH ₄ -N:68%	
芦苇(<i>Phragmitesaustralis</i>)	TN:48.05~52.47 NH ₄ -N:8.71~13.05	35×4.5×0.7	—	连续运行		[80]
宽叶香蒲(<i>Typhalatifolia</i>)					TN:31.4% TP:29.4%	
香蒲(<i>Typhalatifolia</i>)					NO ₃ -N:24.09% TN:18.89% TP:51.94%	
芦苇(<i>Phragmitesaustralis</i>)					NO ₃ -N:12.67%~58.85%; NH ₄ -N:14.81%~74.71%	
香蒲(<i>Typhalatifolia</i>)						
浮萍(<i>Commom Duckweed</i>)	NO ₃ -N:14.5~15.8	中试规模	—	HLR=0.002 m·d ⁻¹ HRT=7 d	TN:70%~98% TP:0~4.6%	[48]
沉水植物						
水葱(<i>Scirpusvalidus</i>)					TN:60%	
莎草(<i>Scirpusolneyi</i>)	TN:6~8	0.9×4 hm ²	1226~5985 m ³ ·d ⁻¹	HLR=0.65 m·d ⁻¹		[84]

可知,在水力负荷接近的情况下,复合垂直流人工湿地间歇运行的氨氮去除效果优于连续运行。氨氮去除主要依靠湿地中微生物的硝化作用,这需要更高的溶解氧浓度,而间歇运行方式可在一定程度上增加复氧能力,强化硝化作用,使出水氨氮浓度进一步降低。

2.2.2 水力负荷

在实际应用中,当人工湿地的构型、植物和基质类型等确定后,水力负荷(HLR,hydraulic loading)就成为人工湿地水质净化效果和氧环境的关键影响因素。优化 HLR 能极大地提高人工湿地的水质净化效果,不同的 HLR 会影响到污染物在人工湿地系统内部的运移、接触时间和氧环境的变化,而氧环境是微生物活动、有机物降解和氮磷转化的重要影响因素,直接关系着二级出水脱氮除磷的效果。

研究表明^[68],不同水力负荷条件下人工湿地的脱氮除磷效果差别较大。例如,当 HLR 在一定范围内变

化时,垂直潜流人工湿地的 TN 去除率随 HLR 的增加而呈现下降趋势^[18]。这是因为增大 HLR 就缩短了微生物与氮污染物的接触时间,不利于硝化、反硝化过程的进行,导致出水中 TN 浓度有所升高;同时,随 HLR 的增加除磷效果逐渐降低,但较 TN 去除率的下降趋势缓慢^[94-95]。

2.2.3 基质布置方式

基质在为植物和微生物提供生长介质的同时,还能够通过沉淀、过滤和吸附等作用直接去除污染物,而基质的种类、布置方式等会直接影响其效果^[96]。在人工湿地内部填充多孔、表面积大的基质,可改善人工湿地的水力学性能,同时增强污染物(尤其是氮、磷)的去除性能^[97]。基质布置方式主要包括基质种类搭配及其粒径级配,可根据二级生化出水的水质特点及水质净化要求,选择合理的基质布置方式以强化脱氮除磷效果,并确保系统长期稳定运行。

表 6 人工湿地脱氮除磷机理^[45,86-90]
Table 6 Mechanisms of nitrogen and phosphorus removals by constructed wetland^[45,86-90]

类型	机理	特点
物理	沉积	氮:悬浮物的重力沉淀,通常对湿地中氮去除的影响很小 磷:可沉降含磷固体的重力沉淀
	吸附	氮:填料对 NH ₄ -N 较强的交换吸附作用,氨氮吸附通常是快速可逆,并非湿地中氮去除的长期显著途径 磷:磷素吸附在基质或植物表面
化学	挥发沉淀	氮:氨氮从湿地中挥发,pH 值是影响湿地中氨氮挥发的重要因素 磷:磷酸盐与水中不溶物的形成或共沉淀
	微生物作用	氮:氨化、硝化/反硝化,湿地中硝化/反硝化的脱氮量通常较显著 磷:微生物对磷素的吸收量取决于其生长所需,积累量与环境中的氧状态有关
生物	植物吸收	氮/磷:适宜条件下植物摄取的氮、磷量较显著

表 7 不同运行方式人工湿地的脱氮除磷效果
Table 7 Nitrogen and phosphorus removals with different operation modes of constructed wetland

进水浓度/mg·L ⁻¹	湿地类型与尺寸/m (长×宽×高)	运行方式	水力负荷	去除效果	参考文献
NH ₄ -N:0~13.6 NO ₃ -N:2.34~16.8 TN:6.40~19.8 TP:0.48~3.49	水平潜流 14.5×2.6×1.0	连续运行	0.32 m·d ⁻¹	TN:25%~62.3%(冬季较低); TP:50%(较为平稳)	[93]
NH ₄ -N:0.16±0.11 NO ₃ -N:9.27±0.67	表面流 29×11×1.2	连续运行	0.05~0.5 m·d ⁻¹	NH ₄ -N:0.21±0.10 mg·L ⁻¹ NO ₃ -N:8.37±1.05 mg·L ⁻¹	[79]
NH ₄ -N:0.2~3.7 TP:0.5~2.75	垂直潜流 3×1.5×0.6	连续运行	2.67 m·d ⁻¹ (0.5 m ³ ·h ⁻¹)	NH ₄ -N:46.7%~59.9% TN:8.8%~32.5% TP:54.9%~69.1%	[12]
NH ₄ -N:9.2~33.4 TN:14.6~41.2	复合垂直流 2×1×0.75	连续运行	0.6~0.8 m·d ⁻¹	NH ₄ -N:67% TN:80%	[55]
《污水综合排放标准 GB 8978—1996》 中的一级 A 或 B 标准	表面流 1.0×0.5×0.6	间歇运行(12 h/12 h)	0.043~0.3 m·d ⁻¹	NH ₄ -N:74.2%~87.2% TP:41.5%~61%	[78]
NH ₄ -N:12 TP:2	复合垂直流 0.6×0.35×0.7	间歇运行(12 h/12 h)	0.4 m·d ⁻¹	NH ₄ -N:82.15% TN:60.32% TP:30.15%	[49]

赵发敏等^[98]选取沸石、无烟煤和粉煤灰作为人工湿地基质,考察比较了不同基质布置方式的脱氮效果,结果表明,沸石、无烟煤和粉煤灰按照 1:2:1(W/W)混合时, $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率可达 95.8%。张翔凌等^[96]比较了垂直潜流人工湿地中 5 种基质(沸石、无烟煤、蛭石、高炉钢渣、生物陶粒)不同布置方式的脱氮除磷效果,结果表明,在优化的基质布置方式时(由上至下依次填充无烟煤、生物陶粒、沸石), $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN、TP 的去除率分别达到 91%、85%和 85%以上,同时钢渣处于组合基质底层时的除磷效果较好,并且分层布置基质的人工湿地,其脱氮除磷效果优于基质简单掺混的人工湿地。

2.2.4 人工湿地组合方式

针对二级出水深度净化的要求和不同人工湿地的优缺点,实际应用时,可将不同类型的人工湿地串联或并联。人工湿地的串联运行,一定程度上增加了湿地长度,降低了单位面积湿地的负荷量,增加了水力停留时间;而并联运行,可增加湿地处理规模。同时,选择合适的湿地进行串联,可以避免一种流态湿地的自有缺陷,例如:表面流人工湿地能显著去除有机物^[99],但氮、磷去除有待提高;水平潜流人工湿地因氧气传输限制不能保证硝化作用的有效进行,垂直潜流人工湿地在满足硝化作用时(复氧效果良好)却不能持续稳定地进行反硝化作用。因此,可根据湿地的水流状态、基质及水生植物类型差异对各特征污染物的不同作用,合理组合不同类型的湿地,实现二级出水深度净化的目标。陆琳琳^[100]采用复合垂直流、表面流和潜流人工湿地串联的三级组合工艺处理污水,其中第一级湿地的 TN 和 TP 平均去除率分别为 63.66%和 47.78%,第二级湿地的 TN 和 TP 平均去除率分别为 33.98%和 45.42%,第三级湿地的 TN 和 TP 平均去除率分别为 46.29%和 41.35%,组合系统的脱氮除磷效果均能达到 80%左右。

3 人工湿地运行管理

人工湿地的运行一般经历两个阶段:系统调试、植物复活、根系发展的不稳定阶段和植物生长成熟、处理效果良好的稳定成熟阶段^[47]。系统从启动到成熟一般需要 1~2 年。实践证明,当植物经过三个生长季节,就可以与杂草竞争^[101]。

正常运行后,湿地的定期维护至关重要,包括水利系统与设施管理、工程管理、基质管理、运行管理(布水系统管理)和植物系统管理等方面^[68]。人工湿地系统在设计合理且污水水质及水量变化不大的情况下,一方面可自流运行,另一方面也可减少维护工作量。

气候、季节等对人工湿地的脱氮除磷效果具有很大影响,所以在运行管理方面应特别注意。干旱/半干旱地区,应挑选合适的时期收割植物,以保证人工湿地有效去除有机物和氨氮^[102];寒冷地区可通过将水位上升到冰冻面来实现人工湿地保温和越冬。此外,冬季气温较低,易造成湿地处理能力下降,出水水质不达标,可对来水进行预处理,降低进水污染负荷,这在弥补处理能力下降的同时也可预防床体堵塞^[103]。通过试验发现,即使在寒冷冬季,通过采取隔离保温措施,人工湿地仍然具有较好的污水处理能力^[104]。此外,还可采用改善微生物活性等办法进一步降解污染物,实现人工湿地冬季出水达标排放^[105]。

4 人工湿地经济分析

人工湿地应用日益增多,除了技术优势外,其低廉的建设投资和运行费用也发挥了举足轻重的作用(表 8)。例如,山东胶南表面流人工湿地处理厂的运行费用为 0.08 元·m⁻³,深圳沙田潜流人工湿地处理厂的运行费用为 0.14 元·m⁻³,江苏杭集镇生活污水处理厂人工湿地深度处理系统运行费用约为 0.184 元·m⁻³。

表 8 人工湿地污水处理系统的经济、用地指标统计
Table 8 The costs and land area of constructed wetland for wastewater treatment

项目名称	湿地类型	处理规模/m ³ ·d ⁻¹	吨水投资/元·t ⁻¹	吨水用地/m ² ·t ⁻¹	备注
南口污水处理厂人工湿地系统 ^[4]	水平潜流	10 000	818.59	1.58	2011 年
辽宁莲花湖人工湿地系统 ^[107-108]	潜流/表面流	50 000	2800	10.7	2009 年
杭集镇生活污水处理厂人工湿地深度处理系统 ^[109]	水平潜流	6860	656	1.75	2005 年
深圳白泥坑人工湿地系统 ^[110]	水平潜流	4500	528.9	2.0	1996 年
上海松江人工湿地系统 ^[68]	复合垂直流	—	352	1.0	2002 年
武汉月湖人工湿地系统 ^[111]	复合垂直流	500~3500	450~500	1.2~8.4	2006 年
武汉三角湖人工湿地系统 ^[112]	复合垂直流	1000~1500	267~375	2.0	2004 年

已有分析表明,在满负荷运行的情况下,不仅人工湿地的所有费用(建设投资、运行和维护费等)仅约为城市污水处理厂的50%,而且其运行和维护费用稳定,同时人工湿地独特的环境价值能够提供其约27%的运行和维护成本,具有显著的经济效益和环境效益^[106]。

考虑到人工湿地水力负荷低、占地面积大的特点和我国城市化进程中土地资源的紧缺状况,大规模应用人工湿地对污水处理厂尾水进行深度处理存在一定的局限性。如大中型城镇污水处理厂日处理水量较大,不太适宜采用人工湿地进行尾水深度处理。因此,需因地制宜,综合考虑占地、经济、受纳水体环境质量等因素,并进一步深入分析和总结人工湿地的适用规模。基于国内人工湿地深度处理城市污水处理厂尾水的现状,人工湿地的规模不宜过大,适于对小型城镇污水处理厂尾水进行深度处理,日处理规模在 $1000\sim 40\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 之间^[4,113-117]。

5 结论及展望

人工湿地可深度处理城市污水处理厂的二级出水,但其研究与应用尚有待加强。目前,该领域研究主要集中在优化人工湿地的运行参数、提高去除效果等方面,但这些研究多数没有从我国不同区域、不同城市二级出水的水质特征这一角度出发,并且人工湿地的选用、设计和运行缺乏有效指导。因此,今后研究与应用工作的重点展望如下:

(1)结合不同地域的城市污水二级出水的水质特征和受纳水体的水质需求,因地制宜,以重点目标污染物(如氮、磷)的去除为导向,选取不同类型的人工湿地,明确适宜的人工湿地应用规模,优化人工湿地的设计与运行参数,强化人工湿地的脱氮除磷效果,深入开展人工湿地在城市污水二级出水处理中的研究与应用。

(2)目前人工湿地的设计和运行管理多依赖于经验方法,应加强人工湿地的数值模型及其模拟研究,并结合现有实践结果,以便优化湿地设计、提高湿地处理效率,为人工湿地的深入研究和推广应用提供理论指导。

参考文献:

[1] 顾宗藻. 中国富营养化湖泊的生物修复[J]. 农村生态环境, 2002, 18(1):42-45.
GU Zong-lian. Bio-remediation of eutrophied lakes in China[J]. *Rural Eco-Environment*, 2002, 18(1):42-45.

[2] Woodward R T, Wui Y. The economic value of wetland services: A meta-analysis[J]. *Ecological Economics*, 2001, 37(2):257-270.
[3] Zdraga. The effect of environmental conditions on the ability of a constructed wetland to disinfect municipal wastewaters [J]. *Environmental Management*, 2002, 29(4):510-515.
[4] 王昊. 北方都市生态人工湿地深度处理污水厂二级出水的研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2011.
WANG Hao. Advanced treatment study on northern metropolis ecological constructed wetlands for secondary effluent of wastewater treatment plants[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2011.
[5] 代晋国, 宋乾武, 张晓丹. EPP 填料曝气生物滤池处理城市污水厂二级出水的中试研究[J]. 安全与环境工程, 2008(1):42-45.
DAI Jin-guo, SONG Qian-wu, ZHANG Xiao-dan. Pilot test on EPP padding used in BAF to treat secondary effluent[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2008(1):42-45.
[6] 杨琦, 尚海涛, 席宏波, 等. 超滤反渗透处理城市二级生活污水厂出水出水研究中试研究[J]. 膜科学与技术, 2007(3):71-74.
YANG Qi, SHANG Hai-tao, XI Hong-bo, et al. Ultrafiltration reverse osmosis treatment of municipal secondary sewage treatment plant effluent pilot study[J]. *Membrane Science and Technology*, 2007(3):71-74.
[7] 李民. 城市污水厂二级出水的深度处理及其回用[J]. 工业水处理, 2005(1):72-74.
LI Min. Advanced treatment of secondary effluent of city sewage disposal plant and its reuse[J]. *Industrial Water Treatment*, 2005(1):72-74.
[8] 吕建波, 孙力平, 赵新华, 等. 涂铁砂滤料吸附过滤去除城市污水厂二级处理出水中磷的研究[J]. 水处理技术, 2009(3):31-34.
LÜ Jian-bo, SUN Li-ping, ZHAO Xin-hua, et al. Coated iron sand filter adsorption filter removal from the effluent of secondary treatment of phosphorus in the water[J]. *Technology of Water Treatment*, 2009(3):31-34.
[9] 安红梅, 吴立波, 岳尚超, 等. 斜发沸石对城市污水处理厂二级出水中氨氮的处理效果研究[J]. 环境工程学报, 2010(5):1111-1115.
AN Hong-mei, WU Li-bo, YUE Shang-chao, et al. Experimental study on removal of ammonia nitrogen in secondary effluent by clinoptilolite[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010(5):1111-1115.
[10] 孙颖. 曝气生物滤池处理二级出水的试验研究[D]. 天津:天津大学, 2008.
SUN Ying. Experimental studies on the treatment of secondary effluent by BAF[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
[11] 龙向宇. 石灰混凝法去除城市污水处理厂二级出水中有机物的工艺研究[D]. 武汉:武汉大学, 2004.
LONG Xiang-yu. The technological study on the removal of organic substances in secondary treated sewage effluent by lime [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
[12] 陈雯, 杨波, 汪诚文. 深圳市布吉污水处理厂构建人工湿地试验研究[J]. 水资源保护, 2010(5):67-70, 81.
CHEN Wen, YANG Bo, WANG Cheng-wen. Study on constructed wetland of Buji sewage plant in Shenzhen[J]. *Water Resource Protection*, 2010(5):67-70, 81.
[13] 黄深. 城市污水厂二级处理出水臭氧深度处理研究[D]. 北京:清华大学, 2008.
HUANG Shen. Advanced treatment of secondary effluent by ozonation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
[14] 杨自雄, 吴莹莹. 某污水处理厂改良型 A²O 工艺设计及调试[J]. 广西城镇建设, 2010(12):84-87.
YANG Zi-xiong, WU Ying-ying. On optimization design for a sewage plant by improved A²O process [J]. *Cities and Towns Construction in*

- Guangxi, 2010(12):84-87.
- [15] 曾 远. 改良型 CASS 工艺在广西某县城污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2011(24):53-55.
ZENG Yuan. Application of modified CASS process in a municipal sewage treatment plant in Guangxi [J]. *China Water & Wastewater*, 2011(24):53-55.
- [16] 何晓斌. 海口车站污水处理厂水解好氧工艺 [J]. 甘肃科技, 2006(2):44-46.
HE Xiao-bin. Haikou station sewage treatment plant hydrolysis aerobic process[J]. *Gansu Science and Technology*, 2006(2):44-46.
- [17] 胡传侠. 固定化三维电极-生物膜法去除二级生化出水中硝酸盐氮的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.
HU Chuan-xia. Study on removal of nitrate from secondary effluent by immobilized three-dimension electrode-biofilm reactor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007.
- [18] 张 磊. 人工湿地系统对污水处理厂二级出水净化实验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2010.
ZHANG Lei. Study on treatment of effluent in municipal secondary sewage plant with constructed wetland [D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2010.
- [19] 姜婷婷. 臭氧强化混凝深度处理城市污水处理厂二级出水试验研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2010.
JIANG Ting-ting. Study on advanced treatment technology of ozonization enhanced coagulation for secondary effluent from the municipal wastewater plant [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2010.
- [20] 熊集兵. 低温条件下组合式人工生态系统对二级出水氮磷的去除研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
XIONG Ji-bing. Studies of nitrogen and phosphorus removal in a combined ecological system receiving secondary effluent under low temperature[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [21] 谷先坤, 王国祥, 刘 波, 等. 复合垂直流人工湿地净化污水厂尾水的研究[J]. 中国给水排水, 2011(3):8-11.
GU Xian-kun, WANG Guo-xiang, LIU Bo, et al. Advances purification of effluent from sewage treatment plant by integrated vertical-flow constructed wetland[J]. *China Water & Wastewater*, 2011(3):8-11.
- [22] 王树涛. O₃/BAF 联合工艺深度处理生活污水二级出水的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.
WANG Shu-tao. Advanced treatment of secondary effluent by combined pre-ozonation and biofiltration[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [23] 王树涛, 王 虹, 马 军, 等. 我国北方城市污水处理厂二级处理出水的水质特性[J]. 环境科学, 2009(4):1099-1104.
WANG Shu-tao, WANG Hong, MA Jun, et al. Analysis of the secondary effluent of municipal wastewater in North China[J]. *Environmental Science*, 2009(4):1099-1104.
- [24] 贾国元. CAST 工艺在长春市双阳污水处理厂的应用研究 [D]. 长春:吉林大学, 2006.
JIA Guo-yuan. The application of CAST in Shuangyang wastewater treatment plant[D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [25] 白晓慧, 王宝贞. 寒冷地区城市污水处理厂改进工艺的运行效能 [J]. 中国环境科学, 2001(1):70-73.
BAI Xiao-hui, WANG Bao-zhen. Performance of a modified municipal wastewater treatment plant in cold region[J]. *China Environmental Science*, 2001(1):70-73.
- [26] 张兴兴. 西安市污水处理厂强化一级与 A²/O 系统效果分析及运行参数优化试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2005.
ZHANG Xing-xing. Analyses on the efficiency of enhances primary treatment and A²/O system as well as studies on the optimization of the operation parameters of Xi'an wastewater treatment plant[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.
- [27] 王 勇, 李炳书, 何成军. 浅谈某机场污水处理厂污水处理工艺[J]. 陕西建筑, 2011(9):45-48.
WANG Yong, LI Bing-shu, HE Cheng-jun. On an airport sewage treatment plant wastewater treatment process[J]. *Shaanxi Architecture*, 2011(9):45-48.
- [28] 刘 瑞. 宝鸡市污水资源化策略研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.
LIU Rui. Research on the sewage reuse in Baoji[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2007.
- [29] 鲁耀东. 兰州市七里河、安宁区污水处理厂工艺分析[J]. 甘肃科技, 2006, 22(9):142-144.
LU Yao-dong. Seven Mile River in Lanzhou City, Anning District sewage treatment plant process analysis[J]. *Gansu Science and Technology*, 2006, 22(9):142-144.
- [30] 梅向阳, 普红平. 新疆昌吉市某开发区污水处理厂工程[J]. 西南给排水, 2007, 29(1):5-7.
MEI Xiang-yang, PU Hong-ping. In Changji Development Zone sewage treatment plant project[J]. *Southwest Water & Wastewater*, 2007, 29(1):5-7.
- [31] 李德生, 雷海东. 城市污水处理厂出水低浓度污染物的生物降解研究[J]. 环境工程学报, 2010(7):1529-1536.
LI De-sheng, LEI Hai-dong. Study on biodegradation of low concentration pollutants of effluent water from municipal wastewater treatment plants [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010(7):1529-1536.
- [32] 王 颖. 混凝过滤法深度处理城市污水厂二级出水的试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2007.
WANG Ying. The experimental studies of coagulation-filters technology to process the city two levels of water leakage [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007.
- [33] 杨玉梅. 重庆鸡冠石污水处理厂的设计特点及运行管理改进[J]. 中国给水排水, 2008(16):35-39.
YANG Yu-mei. Design characteristics and operation management improvement of Chongqing Jiguanshi wastewater treatment plant[J]. *China water & Wastewater*, 2008(16):35-39.
- [34] 丁云松, 吴国防, 冯 杰, 等. 简析重庆永川城市生活污水处理厂调试过程中的问题及对策[J]. 绿色大世界·绿色科技, 2009(1):36-39.
DING Yun-song, WU Guo-fang, FENG Jie, et al. Analyzing problem and countermeasure in the commissioning of the municipal wastewater treatment plant in Yongchuan district Chongqing City[J]. *Journal of Green Great World*, 2009(1):36-39.
- [35] 姚 奇, 刘 岩, 李 欢, 等. 污水处理厂 CAST 工艺的调试及运行 [J]. 环境科技, 2010(S2):45-46, 49.
YAO Qi, LIU Yan, LI Huan, et al. Debugging and running of CAST process in sewage treatment plant[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010(S2):45-46, 49.
- [36] 李 培. 某城市污水处理厂 A²/O 工艺脱氮问题诊断与优化研究 [D]. 苏州:苏州科技学院, 2011.
LI Pei. Diagnosis and optimization on the denitrification issues in a municipal sewage using A²/O technology[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2011.
- [37] 孙 勇. 曝气生物滤池工艺在大庆市西城区污水处理厂的应用[D]. 长春:吉林大学, 2009.
SUN Yong. Biological aerated filter technology west city subdivision wastewater treatment plant in Daqing City[D]. Changchun: Jilin University, 2009.

- [38] 张志剑, 周林强, 李 慧, 等. 市政污水处理厂生物除磷运行效能与机理分析[J]. 中国环境科学, 2010(12): 1614-1621.
ZHANG Zhi-jian, ZHOU Lin-qiang, LI Hui, et al. Effectiveness and mechanism of enhanced biological phosphorus removal(EBPR) of municipal wastewater treatment plants [J]. *China Environmental Science*, 2010(12): 1614-1621.
- [39] 邵军峰. 城市污水脱氮除磷及污泥水强化生物脱氮试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
SHAO Jun-feng. Study on the nitrogen phosphorus for municipal wastewater and sludge water strengthening bio-denitrification [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [40] 郑福灵, 张金松, 曲志军, 等. 微絮凝直接过滤处理污水处理厂二级出水的中试研究[J]. 给水排水, 2009(S1): 119-122.
ZHENG Fu-ling, ZHANG Jin-song, QU Zhi-jun, et al. The micro-flocculation direct filtration of secondary effluent of sewage treatment plant in the pilot study[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009(S1): 119-122.
- [41] 胡雪峰, 朱 琴, 陈 斌, 等. 污水处理厂出水的环境质量和农业再利用[J]. 农业环境保护, 2002, 21(6): 530-534.
HU Xue-feng, ZHU Qin, CHEN Bin, et al. Environmental quality of treated wastewater and its reuse for irrigation[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(6): 530-534.
- [42] 翁齐文. 福州市洋里污水处理厂氧化沟工艺运行情况改进分析[J]. 福建建筑, 2006(2): 124-125, 119.
WENG Qi-wen. Operation and improvement discussion on carrousel oxidation ditch process of Fuzhou Yangli wastewater treatment plant[J]. *Fujian Architecture & Construction*, 2006(2): 124-125, 119.
- [43] 黄中华. 浅谈筲箕污水处理厂对海峡环境的贡献[J]. 化学工程与装备, 2011(8): 204-206.
HUANG Zhong-hua. Yundang sewage treatment plant on the contribution of the environment[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2011(8): 204-206.
- [44] R H K. Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(2): 159-174.
- [45] Jan V. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1-3): 48-65.
- [46] 汤显强, 黄岁樑. 人工湿地去污机理及其国内外应用现状 [J]. 水处理技术, 2007, 33(2): 9-13.
TANG Xian-qiang, HUANG Sui-liang. Mechanisms of pollutant removal in constructed wetlands and their applications both at home and abroad[J]. *Technology of Water Treatment*, 2007, 33(2): 9-13.
- [47] 王世和. 人工湿地污水处理理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
WANG Shi-he. Theory and technology of constructed wetland[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [48] Margaret G. The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical and arid Australia[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(5): 501-509.
- [49] 韩瑞瑞, 袁林江, 孔海霞. 复合垂直流人工湿地净化污水厂二级出水的研究[J]. 中国给水排水, 2009(21): 50-52.
HAN Rui-rui, YUAN Lin-jiang, KONG Hai-xia. Purification of secondary effluent from WWTP by integrated vertical-flow constructed wetland[J]. *China Water & Wastewater*, 2009(21): 50-52.
- [50] Xiong J, Guo G, Mahmood Q, et al. Nitrogen removal from secondary effluent by using integrated constructed wetland system[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(4): 659-662.
- [51] Xiong J, Qin Y, Mahmood Q, et al. Phosphorus removal from secondary effluents through integrated constructed treatment system [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 63(5-12): 98-101.
- [52] 袁林江, 韩瑞瑞, 韩 玮. 间歇进水复合垂直流人工湿地的净化特性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2008(4): 521-526.
YUAN Lin-jiang, HAN Rui-rui, HAN Wei. Intermittent water purification characteristics of vertical flow constructed wetlands[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2008(4): 521-526.
- [53] 余丽华, 贺 锋, 徐 栋, 等. 碳源调控下复合垂直流人工湿地脱氮研究[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3300-3305.
SHE Li-hua, HE Feng, XU Dong, et al. Nitrogen removal under the condition of carbon source supplement in integrated vertical-flow constructed wetland [J]. *Environmental Science*, 2009, 30 (11): 3300-3305.
- [54] 王全金, 李 丽, 李忠卫. 复合垂直流人工湿地除氮磷效果研究[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(6): 1326-1329.
WANG Quan-jin, LI Li, LI Zhong-wei. Research on phosphorus and nitrogen removal from sewage by integrated vertical flow constructed wetlands[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49(6): 1326-1329.
- [55] Wang X, Han B, Shi Y, et al. Advanced wastewater treatment by integrated vertical flow constructed wetland with *vetiveria zizanioides* in North China[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1(1): 1258-1262.
- [56] Nairn R W, Mitsch W J. Phosphorus removal in created wetland ponds receiving river overflow [J]. *Ecological Engineering*, 1999, 14 (1-2): 107-126.
- [57] Pant H K, Reddy K R, Lemon E. Phosphorus retention capacity of root bed media of sub-surface flow constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 17(4): 345-355.
- [58] 赵桂瑜, 秦 琴, 周 琪. 几种人工湿地基质对磷素的吸附作用研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(6): 84-85.
ZHAO Gui-yu, QIN Qin, ZHOU Qi. Phosphorus adsorption by some substrates in constructed wetland system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 29(6): 84-85.
- [59] 袁东海, 高士祥, 景丽洁, 等. 几种粘土矿物和粘土对溶液中磷的吸附效果[J]. 农村生态环境, 2004, 20(4): 60-63, 72.
YUAN Dong-hai, GAO Shi-xiang, JING Li-jie, et al. Phosphorus adsorption of some clay minerals and soils[J]. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(4): 60-63, 72.
- [60] 汤显强, 李金中, 刘学功, 等. 人工湿地填料磷去除效果的影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 748-752.
TANG Xian-qiang, LI Jin-zhong, LIU Xue-gong, et al. Influencing factors of phosphorus removal performance of constructed wetlands substrates [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27 (2): 748-752.
- [61] 王媛媛, 张衍林. 人工湿地的基质及其深度对生活污水中氮磷去除效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 581-586.
WANG Yuan-yuan, ZHANG Yan-lin. Effects of the depth and variety of substrates used in constructed wetlands on nitrogen and phosphorus removal[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 581-586.
- [62] Bruch I, Fritsche J, Bänninger D, et al. Improving the treatment efficiency of constructed wetlands with zeolite-containing filter sands[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(2): 937-941.
- [63] Gale P M, D'Ái I, Reddy K R, et al. Denitrification potential of soils from constructed and natural wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 1993, 2(2): 119-130.
- [64] 聂发辉, 吴晓芙, 胡曰利. 人工湿地中蛭石填料净化污水中氨氮能力[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 280-282.
NIE Fa-hui, WU Xiao-fu, HU Yue-li. $\text{NH}_4\text{-N}$ removal capacity of ver-

- miculite stuffing in constructed wetland [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003, 16(6):280-282.
- [65] Vohla C, Křivá M, Bavor H J, et al. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands: A review [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(1):70-89.
- [66] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1998, 32(2):393-399.
- [67] 尹 炜, 李培军, 傅金祥, 等. 潜流人工湿地不同基质除磷研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006, 22(6):985-988.
YIN Wei, LI Pei-jun, FU Jin-xiang, et al. The removal of phosphorus by different substrate in subsurface constructed wetland [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2006, 22(6):985-988.
- [68] 吴振斌. 复合垂直流人工湿地[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
WU Zhen-bin. Integrated vertical-flow constructed wetland [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [69] Gray S, Kinross J, Read P, et al. The nutrient assimilative capacity of maerl as a substrate in constructed wetland systems for waste treatment [J]. *Water Research*, 2000, 34(8):2183-2190.
- [70] 李怀正, 叶建锋, 徐祖信. 几种经济型人工湿地基质的除污效能分析[J]. 中国给水排水, 2007, 23(19):27-30.
LI Huai-zheng, YE Jian-feng, XU Zu-xin. Analysis on removal efficiency of pollutants by some substrates in vertical-flow constructed wetland[J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(19):27-30.
- [71] Drizo A, Frost C A, Grace J, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1999, 33(17):3595-3602.
- [72] 徐丽花, 周 琪. 沸石去除废水中氨氮及其再生[J]. 中国给水排水, 2003, 19(3):24-26.
XU Li-hua, ZHOU Qi. Zeolite in waste and ammonia nitrogen removal regeneration[J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(3):24-26.
- [73] 谭洪新, 周 琪. 湿地填料的磷吸附特性及潜流人工湿地除磷效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):353-356.
TAN Hong-xin, ZHOU Qi. Characterization of adsorption on phosphorus in stuffings and its removal in substratum in wetland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):353-356.
- [74] 徐祖信, 谢海林, 叶建锋, 等. 模拟煤灰渣垂直潜流人工湿地的除磷性能分析[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(4):241-243.
XU Zu-xin, XIE Hai-lin, YE Jian-feng, et al. Feasibility of phosphorus removal by coal ash in a vertical flow constructed wetland system[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, 29(4):241-243.
- [75] Ghermandi A, Bixio D, Thoeys C. The role of free water surface constructed wetlands as polishing step in municipal wastewater reclamation and reuse[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1-3):247-258.
- [76] Lai W, Wang S, Peng C, et al. Root features related to plant growth and nutrient removal of 35 wetland plants[J]. *Water Research*, 2011, 45(13):3941-3950.
- [77] 李志炎, 唐宇力, 杨在娟, 等. 人工湿地植物研究现状 [J]. 浙江林业科技, 2004, 24(4):56-62.
LI Zhi-yan, TANG Yu-li, YANG Zai-juan, et al. Constructed wetland plant research[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2004, 24(4):56-62.
- [78] 康军利. 人工湿地对二级出水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 去除效果[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(5):35-38.
KANG Jun-li. Purification effect of constructed wetland on $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP removal from secondary effluent [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(5):35-38.
- [79] Bachand P A M, Horne A J. Denitrification in constructed free-water surface wetlands; II Effects of vegetation and temperature[J]. *Ecological Engineering*, 1999, 14(1-2):17-32.
- [80] 郑仁宏, 邓仕槐, 李远伟, 等. 表面流人工湿地硝化和反硝化强度研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(1):37-39, 43.
ZHENG Ren-hong, DENG Shi-huai, LI Yuan-wei, et al. Nitrification and denitrification in surface flow wetland [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, 29(1):37-39, 43.
- [81] 谭洪新, 周 琪, 杨殿海. 宽叶香蒲表面流人工湿地脱氮除磷效果研究[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(5):11-15.
TAN Hong-xin, ZHOU Qi, YANG Dian-hai. Removal of nitrogen and phosphorus by free water surface constructed wetland planted with *Typha latifolia*[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 31(5):11-15.
- [82] 陈秀荣, 周 琪. 人工湿地脱氮除磷特性研究[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(7):57-60.
CHEN Xiu-rong, ZHOU Qi. Study on the characteristics of N/P removal in constructed wetland [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2005, 27(7):57-60.
- [83] García-Lledó A, Ruiz-Rueda O, Vilar-Sanz A, et al. Nitrogen removal efficiencies in a free water surface constructed wetland in relation to plant coverage[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(5):678-684.
- [84] R H K. The effects of wetland vegetation and morphology on nitrogen processing[J]. *Ecological Engineering*, 2008, 33(2):126-141.
- [85] Vymazal J. Nitrogen removal in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow - Can we determine the key process?[J]. *Nutrient Cycling and Retention in Natural and Constructed Wetlands*, 1999:1-17.
- [86] 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 Ecological Sinica*, 2007, 27(3):1226-1232.
- [87] 卢少勇, 金相灿, 余 刚. 人工湿地的磷去除机理 [J]. 生态环境, 2006, 15(2):391-396.
LU Shao-yong, JIN Xiang-can, YU Gang. Phosphorus removal mechanism of constructed wetland[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2):391-396.
- [88] 卢少勇, 金相灿, 余 刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, 15(8):2670-2677.
LU Shao-yong, JIN Xiang-can, YU Gang. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 15(8):2670-2677.
- [89] Jan V. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(5):478-490.
- [90] 白玉华, 章小军, 雷志洪, 等. 垂直流人工湿地净化机理及工程实践 [J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(7):761-766, 772.
BAI Yu-hua, ZHANG Xiao-jun, LEI Zhi-hong, et al. Mechanisms and applied engineering of vertical flow constructed wetland in wastewater treatment[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2008, 34(7):761-766, 772.
- [91] Laak R. Wastewater Engineering Design for Unsewered Areas[M]. Lancaster: Technomic Publ A G. 1980.
- [92] McNeven D, Barford J, Hage J. Adsorption and biological degradation of ammonium and sulfide on peat[J]. *Water Research*, 1999, 33(6):1449-1459.
- [93] 付国楷, 周 琪, 杨殿海, 等. 潜流人工湿地深度净化二级处理出水研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(13):31-35.
FU Guo-kai, ZHOU Qi, YANG Dian-hai, et al. Research on subsurface-floe constructed wetland for advances treatment of secondary ef-

- fluent[J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(13):31-35.
- [94] Prochaska C A, Zouboulis A I, Eskridge K M. Performance of pilot-scale vertical-flow constructed wetlands, as affected by season, substrate, hydraulic load and frequency of application of simulated urban sewage[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31(1):57-66.
- [95] 凌 祯, 杨具瑞, 于国荣, 等. 不同植物与水力负荷对人工湿地脱氮除磷的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(11):1815-1820.
- LING Zhen, YANG Ju-rui, YU Guo-rong, et al. Influence of different plants and hydraulic loading on the nitrogen and phosphorus removal of constructed wetlands[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(11):1815-1820.
- [96] 张翔凌, 武俊梅, 王 荣, 等. 垂直流人工湿地系统中不同组合填料净化能力研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(19):1-4.
- ZHANG Ling-xiang, WU Jun-mei, WANG Rong, et al. Purification capacity of different combined fillers in vertical flow constructed wetlands[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(19):1-4.
- [97] 黄逸群, 张 民, 徐玉新. 人工湿地填料净化生活污水级配优化研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(3):130-134, 138.
- HUANG Yi-qun, ZHANG Min, XU Yu-xin. Optimizing substrate gradation for constructed wetland treating domestic wastewater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(3):130-134, 138.
- [98] 赵发敏, 海热提, 韩晓丽. 人工湿地填料去除氨氮优化配比及影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(9):26-30.
- ZHAO Fa-min, HAI Re-ti, HAN Xiao-li. Optimizing substrate gradation and effect factors for constructed wetland removal of ammonia nitrogen[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(9):26-30.
- [99] Masi F. Winery high organic content wastewaters treated by constructed wetlands in Mediterranean climate[C]. Proceedings of Eighth International Conference Wetland Systems for Water Pollution Control, Tanzania, IWA and University of Dares Salaam, 2002.
- [100] 陆琳琳. 人工湿地组合工艺处理污染河水研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- LU Lin-lin. Study on constructed wetlands in series for treating polluted river water[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [101] 汪俊三. 植物碎石床人工湿地污水处理技术和工程案例[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- WANG Jun-san. Plant gravel bed constructed wetland wastewater treatment technology and engineering case[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009.
- [102] 严 弋, 海热提. 潜流式人工湿地在我国干旱区的试运行[J]. 水处理技术, 2007, 33(10):42-45.
- YAN Yi, HAI Re-ti. Trial operation of subsurface flow constructed wetland in the arid area [J]. *Technology of Water Treatment*, 2007, 33(10):42-45.
- [103] Cooke J G. Phosphorus removal processes in a wetland after a decade of receiving a sewage effluent[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, 21(4):733-739.
- [104] 刘学燕. 在北方地区利用潜流人工湿地处理地表水试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- LIU Xue-yan. Study on subsurface flow constructed wetland for application to treating surface water in North Area of China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [105] Ragusa S R, McNevin D, Qasem S, et al. Indicators of biofilm development and activity in constructed wetlands microcosms [J]. *Water Research*, 2004, 38(12):2865-2873.
- [106] Teng C, Leu S, Ko C, et al. Economic and environmental analysis of using constructed riparian wetlands to support urbanized municipal wastewater treatment[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44(2):249-258.
- [107] 张 姝, 尚佰晓, 周 莹. 莲花湖人工湿地对污水的净化效果研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(9):25-28.
- ZHANG Shu, SHANG Bai-xiao, ZHOU Ying. Study on purification effect of sewage by constructed wetland in Lianhua Lake[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(9):25-28.
- [108] 吴秋菊, 刘丽馥. 浅谈铁岭市莲花湖人工湿地及运行效果[J]. 黑龙江科技信息, 2012(1):258.
- WU Qiu-ju, LIU Li-fu. Discussion of Tieling City the Lotus Lake workers wetlands and operating results[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2012(1):258.
- [109] 范旭红. 人工湿地污水处理系统及其应用[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- FAN Xu-hong. The treatment technology of wastewater using constructed wetland system and its application in the project design[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [110] 陈韞真, 叶纪良. 深圳白泥坑、雁田人工湿地污水处理场[J]. 电力环境保护, 1996, 12(1):47-51.
- CHEN Yun-zhen, YE Ji-liang. The Shenzhen Bainikeng, Yantian wetland sewage treatment plant[J]. *Electric Power Environmental Protection*, 1996, 12(1):47-51.
- [111] 胡胜华, 张 婷, 周巧红, 等. 武汉三角湖复合垂直流人工湿地对重金属元素的去除研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10):2468-2473.
- HU Sheng-hua, ZHANG Ting, ZHOU Qiao-hong, et al. The effect of integrated vertical-flow constructed wetland on removal of heavy metals in Sanjiao Lake(Wuhan) over annual time periods[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10):2468-2473.
- [112] 徐 栋, 成水平, 付贵萍, 等. 受污染城市湖泊景观化人工湿地处理系统的设计[J]. 中国给水排水, 2006, 22(12):40-44.
- XU Dong, CHENG Shui-ping, FU Gui-ping, et al. Design of landscaping constructed wetland system for the treatment of polluted urban lakes[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(12):40-44.
- [113] 杨立君. 垂直流人工湿地用于城市污水处理厂尾水深度处理[J]. 中国给水排水, 2009, 25(18):41-43.
- YANG Li-jun. Application of vertical flow constructed wetland to advanced treatment of tailwater from municipal wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(18):41-43.
- [114] 孙久振, 刘志军, 贾西成. 人工湿地系统在二级污水处理厂尾水深度处理中的应用[J]. 中国高新技术企业, 2009, 21:121-122.
- SUN Jiu-zhen, LIU Zhi-jun, JIA Xi-cheng. Wetland system in the tail water depth treatment of secondary sewage treatment plant[J]. *Chinese Hi-tech Enterprises*, 2009, 21:121-122.
- [115] 张 丽, 朱晓东, 邹家庆. 人工湿地深度处理城市污水处理厂尾水[J]. 工业水处理, 2008, 28(1):85-87.
- ZHANG Li, ZHU Xiao-dong, ZOU Jia-qing. Application of constructed wetland to the advanced treatment of effluent in a municipal sewage plant[J]. *Industrial Water Treatment*, 2008, 28(1):85-87.
- [116] 蒋岚岚, 刘 晋, 吴 伟, 等. 城北污水处理厂尾水人工湿地处理示范工程设计[J]. 中国给水排水, 2009, 25(10):26-29.
- JIANG Lan-lan, LIU Jin, WU Wei, et al. Design of constructed wetland for treatment of tailwater from Chengbei wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(10):26-29.
- [117] 杨 林, 李咏梅. 组合人工湿地处理工业园区污水厂尾水的中试研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(6):1846-1850.
- YANG Lin, LI Yong-mei. Pilot-scale study on advanced treatment of tail-water from wastewater treatment plant in industrial park using hybrid constructed wetland system [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(6):1846-1850.