

利用有机覆盖物处理的人工湿地外排 焦化废水研究

魏巍, 徐元崇, 杨国英, 王倩, 刘洁, 赵言文

(南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

摘要: [目的] 为进一步降低污染物浓度, 提高钢铁企业水资源循环利用率。[方法] 采用水平潜流人工湿地处理外排焦化废水, 通过监测分析进出水中浊度、化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)含量, 探讨冬季人工湿地植物层不添加及添加有机覆盖物对钢铁企业外排焦化废水净化水平的影响。[结果] 在低温季节, 水力停留时间为 5 d 时, 不添加有机覆盖物人工湿地对外排焦化废水浊度、COD、TN 和 TP 的平均去除率分别为 68.55%, 14.94%, 14.20% 和 71.26%; 添加有机覆盖物人工湿地对外排焦化废水浊度、COD、TN 和 TP 的平均去除率分别为 72.54%, 21.62%, 20.50% 和 71.88%; 有机覆盖膜的保温作用使得 COD 去除率升幅达 44.68%, TN 去除率升幅达 44.45%。[结论] 在植物层添加有机覆盖物作为保温材料, 可以提高人工湿地在低温条件下的净化效率。

关键词: 水平潜流; 人工湿地; 冬季运行; 有机覆盖物; 外排焦化废水

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)01-0017-06

中图分类号: X703

文献参数: 魏巍, 徐元崇, 杨国英, 等. 利用有机覆盖物处理的人工湿地外排焦化废水研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 017-022. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.003; Wei Wei, Xu Yuanchong, Yang Guoying et al. A Study on treatment of discharged coking wastewater by constructed wetlands using organic mulches[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 017-022. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.003

A Study on Treatment of Discharged Coking Wastewater by Constructed Wetlands Using Organic Mulches

WEI Wei, XU Yuanchong, YANG Guoying, WANG Qian, LIU Jie, ZHAO Yanwen

(College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: [Objective] The paper aims to further reduce pollutant concentration and improve the reclamation rate of wastewater in iron and steel enterprises. [Methods] We adopted two sets of horizontal subsurface flow constructed wetlands for the treatment of discharged coking wastewater in iron and steel enterprises, and investigated the impacts of wetland vegetation with and without organic mulches on the treatment of discharged coking wastewater by constructed wetland in winter through the monitoring and analyzing the turbidity, chemical oxygen demand(COD), total nitrogen(TN), and total phosphorus(TP) concentrations in influent and effluent. [Results] In low-temperature season, the hydraulic retention time was 5 days, the average removal rates of turbidity, COD, TN, and TP was 68.55%, 14.94%, 14.20% and 71.26% in constructed wetland without organic mulches while the average removal rates of those in constructed wetland with organic mulches was 72.54%, 21.62%, 20.50% and 71.88%, respectively. The removal rates of COD and TN increased by 44.68% and 44.45%, respectively. [Conclusion] Organic mulches could be used as insulating material to help increase the purification rate of constructed wetland under the low-temperature condition.

Keywords: horizontal subsurface flow; constructed wetland; winter operation; organic mulches; discharged coking wastewater

收稿日期: 2016-05-17

修回日期: 2016-06-15

资助项目: 江苏省水利科技项目“江苏省水土保持规划专题研究”(2012031)

第一作者: 魏巍(1990—), 男(汉族), 江苏省淮安市人, 硕士研究生, 研究方向为水土资源保护。E-mail: zmrcxzn@163.com。

通讯作者: 赵言文(1965—), 男(汉族), 江苏省徐州市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境生态学、生态环境影响评价研究。E-mail: ywzhao@njau.edu.cn。

焦化废水是煤制焦炭、焦炉煤气净化及焦化产品精制回收过程中产生的废水的总称,是目前钢铁生产行业较难处理的工业废水之一。中国是世界钢铁生产的第一大国,焦炭是钢铁炼制过程中不可缺少的原料。近年来,随着国内钢铁工业、焦炭行业的迅猛发展,焦化废水的排放量也逐年增加。焦化废水成分复杂,其含有的污染物浓度高、毒性大。除含有高浓度的氨氮、氰化物、硫化物、氟化物等无机污染物外,还含有大量的酚类化合物、多环芳香族化合物(PAHs)及含氮、氧、硫的杂环有机化合物^[1],焦化废水对环境的危害不容忽视。目前,国内外针对焦化废水深度处理技术开展的研究较多,主要集中于一些物理和化学处理技术,包括混凝沉淀、吸附、铁炭微电解、高级氧化和膜分离技术^[2-3]。为加强企业水循环利用率,需要对焦化废水进行深度处理。高级氧化和膜分离技术投资较高、能耗较大,难以在工程上规模应用。

人工湿地作为一种污水生态处理技术,具有维护简单、运行费用低、抗冲击负荷能力强和环境友好等优点^[4],近年来该技术逐渐应用于工业废水处理^[5]。人工湿地通过植物、填料和微生物这个复合生态系统的物理、化学和生物的重三重协同作用,实现对污水的净化。人工湿地在实地运行过程中,其运行效率不仅受到湿地本身构成各因素的影响,还会随着水力负荷、气温条件及污染水平的改变而产生较大的差异,其中气温是一个相当重要的因素。张建等^[6]研究了冬季潜流式人工湿地对污染河水的处理效果,人工湿地在采取地膜覆盖保温措施后,NH₃-N 平均去除率由 29.4% 上升至 67.6%;COD 平均去除率由 29.0% 提高到 46.6%;系统温度比无地膜覆盖的高;微生物的活性显著提高。采取保温措施后人工湿地的运行成本会增加,保温措施使用不当还会产生二次污染。目前,对于人工湿地保温措施的研究主要集中于不同覆盖层的设计,常用的覆盖层有炭化后的芦苇屑、塑料地膜及空气层加冰层等,针对有机覆盖物在人工湿地中的研究以及净化机理研究则较少报道。

有机覆盖物是利用各种有机生物质材料通过粉碎、加工处理后铺设于栽植的植物周围,起到保湿、保温、除杂、促生等作用^[7]。有机覆盖物的材料十分广泛,包括稻秆、麦秆等农业生物质和碎树皮、木片、粉碎枝叶、松针、锯木屑、果壳等林业生物质。在寒冷的冬季,有机覆盖物具有良好的保温作用,可减轻冰雪与霜冻灾害对植物的伤害;陈玉娟等^[8]考察了有机覆盖物对城市绿地土壤温度的影响,土壤表层在铺设有机覆盖物后,土壤温度的日变化明显降低,冬季土壤温度升高了 0.9~1.5℃。有机覆盖物作为一种来源

于农、林生物质资源再利用的清洁材料。近年来,随着其生产工艺、配方技术的不断优化与发展,有机覆盖物的生产成本大大降低,为其在国内的推广使用打下了良好的基础。

本研究拟选取香蒲、芦苇作为人工湿地植物层,对比冬季(当年的 12 月及次年的 1 月与 2 月)人工湿地植物层添加有机覆盖物与不添加有机覆盖物对上海宝山宝钢炼钢厂外排焦化废水一般污染物的去除差异,以期为人工湿地在中国北亚热带季风气候区的推广使用及有机覆盖物在人工湿地中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验用水

试验用水采集自苏州市相城区黄埭镇工业园内某钢炼钢厂外排的焦化废水,当地气候类型为北亚热带季风性气候,雨热同期,日照充分,雨量充沛,极端最高气温 40.2℃,极端最低气温 -12.1℃。春秋较短,冬夏较长。试验期间外排焦化废水水质情况见表 1。

表 1 外排焦化废水水质情况

指标	废水水质		
	范围	均值	标准差
pH 值	6.13~8.49	7.12	0.35
浊度(NTU)	3.02~9.31	6.24	2.20
COD/(mg·L ⁻¹)	30.61~64.87	47.12	9.87
TN/(mg·L ⁻¹)	42.07~58.53	50.47	5.66
TP/(mg·L ⁻¹)	0.14~0.59	0.28	0.12

1.2 试验装置与材料

水平潜流人工湿地小试装置由 PVC 板焊接而成,装置尺寸为 1.60 m×0.85 m×0.80 m(长×宽×深)。为了使进、出水流均匀稳定,装置配有进、出水槽,通过穿孔板与填料区联通。填料选取表面孔隙率较高的砾石填料,粒径在 4~8 mm。植物选取香蒲和芦苇。为便于植物的种植和生长,在潜流人工湿地石质填料层上覆盖了 0.10 m 厚度的土壤。装置在中间设置隔板,隔板厚度 0.05 m,形成 1.60 m×0.4 m×0.80 m(长×宽×深)两个空间,其中一个空间 AW₁(artificial wetland 1)栽植植物层土壤表层不覆盖有机覆盖物;另一个空间 AW₂(artificial wetland 2)栽植植物层土壤表层覆盖有机覆盖物。

选择以松柏树皮、松针和木霉菌水分散剂为有机覆盖物主要原料,按重量比为松柏树皮 60%~70%,松针 25%~30%以及木霉菌水分散剂 5%~10%的配比配成本试验采用的有机覆盖物,覆盖在人

工湿地植株土层表层,覆盖厚度为 5 cm。

人工湿地小试装置采用 BT100~100 M 型兰格恒流泵控制进水流量,全天 24 h 连续运行。水力停留时间控制在 5 d,水力负荷为 $0.13 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,流量为 56 L/d。试验前对两种人工湿地植物生长状况进行观测,待植物生长发育稳定后,开展本试验,整个系统于 2013 年 12 月初开始运行,2014 年 2 月末停止运行,每 7d 测量 1 次进出水中各项指标的数值并记录。

1.3 指标分析方法

大气气温及人工湿地土壤温度、pH 值、浊度、COD 分别由温度计、PHB-2 型便携式 pH 计、2100P 型便携式浊度仪、重铬酸钾消解法测定。TN, $\text{NH}_3\text{-N}$, TP 等主要水质指标检测均按照国家标准分析方法及国家环保局组织编写的《水和废水监测分析方法》(第四版)所规定的方法进行测定。

1.4 数据分析方法

采用 SPSS 18.0 软件进行统计分析,作图采用 Excel 作图。各处理的比较采用单因素分析方法(F 检验),凡小于 0.05(或 0.01)水平的视为显著(或极显著)。

2 结果与分析

2.1 有机覆盖物的保温效率

试验期间,对人工湿地土壤温度进行了监测,结果见表 2,人工湿地在土壤表层添加有机覆盖物后,土壤温度升高,升高范围在 $0.8\sim 1.8 \text{ }^\circ\text{C}$,平均升高了 $1.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。结果表明,有机覆盖物具有保温作用。

表 2 不同处理条件下土壤温度的比较

日期	土壤平均温度/ $^\circ\text{C}$		
	人工湿地 1	人工湿地 2	人工湿地 2 提高值
1202	7.9	9.2	1.3
1209	13.5	14.6	1.1
1216	5.7	6.9	1.2
1223	9.6	10.6	1.0
1230	11.9	12.7	0.8
0106	7.4	8.8	1.4
0113	9.8	10.9	1.1
0120	6.9	8.3	1.4
0127	5.8	7.6	1.8
0203	6.7	7.9	1.2
0210	8.2	9.5	1.3
0217	10.1	11.2	1.1
0224	12.0	13.4	1.4

在低温季节,有机覆盖物对于土壤的增温作用是十分明显的^[9]。铺设有机覆盖物也能够使零点等值

线延伸的特别深。首先,有机覆盖物会阻挡土壤热量的散失,土壤失热速度降低,进而导致土壤温度降低缓慢;其次,有机覆盖物分解过程中为微生物提供了充足的食料,刺激土壤微生物的活动^[10],土壤内氨化细菌、固氮细菌、纤维分解细菌、真菌明显增加,而微生物的呼吸作用、固氮作用等生长发育活动会产生一定热量,进而导致土壤表层温度的升高。因而,有机覆盖物在低温季节的增温作用会促进植物的生长发育,提高植物抗冻作用,为人工湿地植物的生长发育提供了更加稳定的环境。

2.2 浊度去除效率

试验期间,对人工湿地进出水的浊度进行监测。如图 1 所示,人工湿地进水浊度波动范围比较大,在 $3.02\sim 9.31 \text{ NTU}$ 范围内变化,平均值为 6.24 NTU 。水平潜流人工湿地对外排焦化废水的浊度为有较好的去除效果,AW₁人工湿地出水的平均浊度为 1.96 NTU ,去除率达到 68.55% ;AW₂人工湿地出水的平均浊度为 1.71 NTU ,去除率达到 72.54% 。AW₂的浊度去除率要高于 AW₁。

试验运行初期,AW₁,AW₂对浊度的去除水平基本相当,随着试验的进行,AW₂的除浊水平要略优于 AW₁,且随着平均气温的变化而变化,即温度升高两者的浊度去除水平逐渐接近。

人工湿地对废水浊度的去除主要受两方面因素的影响:一是人工湿地内部基质的过滤作用,基质的比表面积大,表面微孔和中孔结构发育,水中大部分分离散颗粒会在范德华引力和静电力的综合作用下,吸附在基质表面而达到很好的去浊效果;二是土壤微生物的吸附降解以及植物通过食物链的输出作用^[11]。添加有机覆盖物后,植物表层结构更加复杂,人工湿地土壤温度升高,土壤微生物活性增加,有机质含量增加,增强了对浊度颗粒的吸附能力和吸附胶体颗粒的稳定性,提高了人工湿地系统对污水浊度的去除效率。

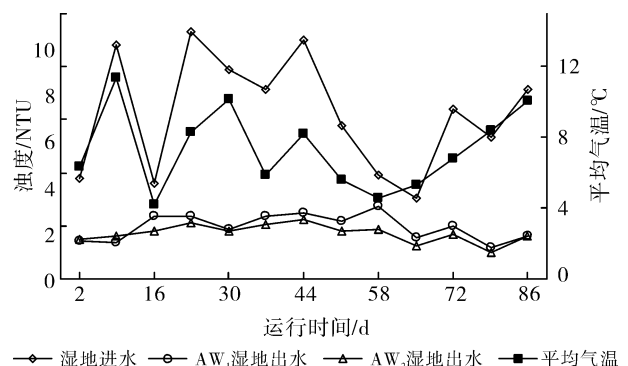


图 1 人工湿地对浊度的去除水平

2.3 COD 去除效率

试验期间,外排焦化废水中 COD 的去除效率如图 2 所示。人工湿地进水的 COD 浓度在 30.61~64.87 mg/L 范围波动,平均浓度为 47.21 mg/L。在 HRT = 5 d 的情况下,AW₁ 装置中 COD 去除率达 14.94%;AW₂ 装置中 COD 去除率达 21.62%。COD 去除率高于方艳等^[12]考察的砾石人工湿地对外排焦化废水 COD 去除率 9.25%。添加有机覆盖物作为人工湿地保温材料后,COD 的去除效率升幅达 44.67%。

试验运行初期,AW₁,AW₂ 对 COD 的去除水平基本相当,随着试验的进行,AW₂ 出水中的 COD 浓度要低于 AW₁ 出水中 COD 的浓度,温度越低,AW₁,AW₂ 出水中 COD 浓度差异越大,温度升高时,两者出水中 COD 浓度逐渐接近。

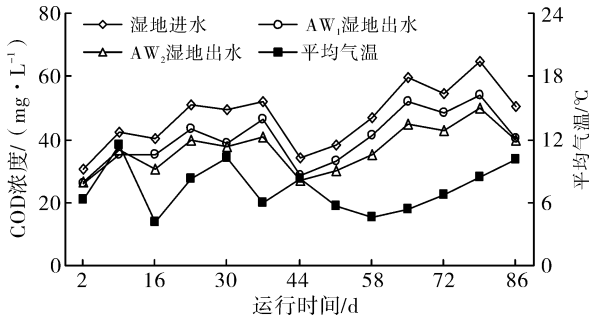


图 2 人工湿地对 COD 的去除水平

外排焦化废水中的有机物大多是难降解有机物,Machate 等^[13]研究了三环芳烃菲在人工湿地中的去除效果和途径,结果表明人工湿地对三环芳烃菲具有良好的去除效果,且填料吸附是其主要去除途径之一。人工湿地土壤微生物的活性指标也是影响 COD 去除效率的重要因素,一方面,低温条件下土壤温度的升高有利于土壤微生物活性的提高^[14],提高 COD 的去除效果;另一方面,有机覆盖物还会增加土壤呼吸,促进土壤中营养物质的转化及增加土壤中细菌、真菌和放线菌的数量,形成植物层—覆盖层—土壤的好氧环境,促进有机物的好氧分解,提高 COD 的去除效率。

2.4 TP 去除效率

试验期间,人工湿地进水中的 TP 浓度在 0.14~0.59 mg/L 范围波动,平均浓度为 0.28 mg/L。湿地运行 2 个月后,进水 TP 波动较大,但出水较为稳定。填料的截留对 TP 的去除起到了明显的作用,AW₁ 人工湿地出水平均浓度为 0.08 mg/L,TP 去除率为 71.26%;AW₂ 人工湿地出水平均浓度为 0.08 mg/L,TP 去除率为 71.88%。

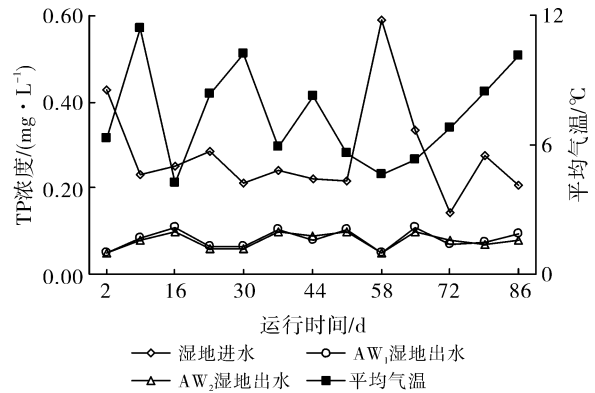


图 3 人工湿地对 TP 的去除水平

两组处理对外排焦化废水 TP 去除率基本一致,有机覆盖物对 TP 的吸附作用表现不明显,TP 的总体处理效果良好,说明填料的吸附是人工湿地除磷的主要途径,与其他研究者的结论一致^[15]。

2.5 N 去除效率

氮污染物是外排焦化废水的主要污染物之一,高浓度的含氮废水外排容易引起环境水体的富营养化^[16],人工湿地对外排焦化废水 TN 和 NH₃-N 的去除效果如图 4—5 所示。

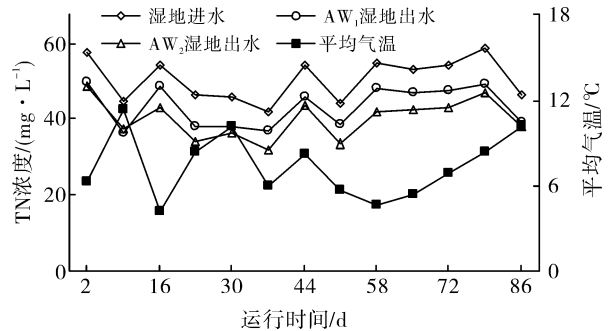


图 4 人工湿地对焦化废水 TN 的去除效果

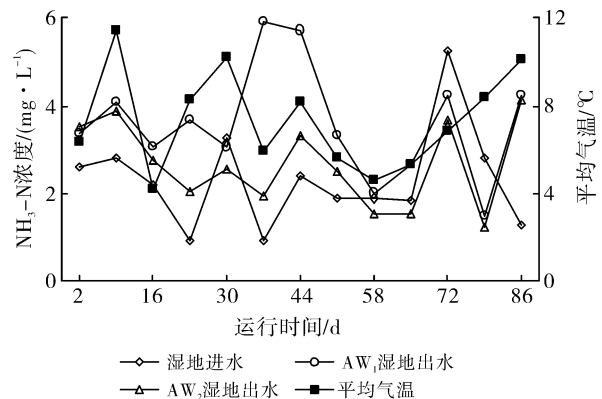


图 5 人工湿地对 NH₃-N 的去除效果

试验期间,如图 4 所示,进水 TN 的平均浓度为 50.47 mg/L,AW₁ 人工湿地对 TN 的去除率为

14.20%, AW₂人工湿地对 TN 的去除率为 20.50%。试验运行初期, AW₁, AW₂对 TN 的去除水平基本相当; 试验运行两周后, AW₂出水中的 TN 浓度要低于 AW₁出水中 TN 的浓度; 试验进行的第 3, 4, 5 周, 平均气温逐渐升高, AW₁, AW₂出水中 TN 浓度差异有所减少; 试验进行 1 个月后, 随着平均温度的降低, AW₁, AW₂出水中 TN 浓度差异有所减少两者出水中 TN 浓度逐渐接近。李林峰等^[17]研究了不同植物在人工湿地脱氮中的贡献, 研究发现不同湿地植物对 TN 的去除效率有很大的差异; 杜刚等研究了人工湿地中微生物数量与污染去除的关系, 研究发现植物种类对 TN 去除的影响主要是由植物对氮素吸收富集能力不同所致, 与湿地微生物数量也有很大的关系, 不同种类植物对湿地微生物数量的影响不大, 温度的升高是微生物数量增加呈正相关。在湿地植物层添加有机覆盖物作为保温材料后, TN 的去除效率升幅达 44.45%, 有机覆盖物对 TN 吸附能力及保温后湿地微生物数量的增加是人工湿地 TN 去除效率提高的主要原因。

人工湿地进水的 NH₃-N 浓度在 0.90~5.23 mg/L, 平均浓度为 2.31 mg/L (如图 5 所示)。2 组人工湿地的出水水质均出现了 NH₃-N 浓度升高的现象。氨氮的氧化需要湿地系统中有充足的溶解氧, 在水平潜流人工湿地中, 大气复氧的速率有限, 人工湿地主要是处于厌氧环境的, 硝化速率受到限制, 反硝化速率会高于硝化速率, 硝化作用是人工湿地脱氮的限制步骤。本研究试验中, 外排焦化废水中的含氮有机物在人工湿地中得到降解, 产生氨氮, 但由于湿地中溶解氧的不足限制了硝化细菌对氨氮的转化, 导致了湿地出水出现氨氮的累积升高的现象。而缺氧环境对反硝化细菌有利, 废水中的硝态氮得到了一定程度的降解。反硝化细菌属于异养性细菌, 在反硝化过程中需要有机碳源, 由于外排焦化废水中的有机物大多是难以生物降解的, 所以也导致了反硝化速

率的下降, 表现为人工湿地对外排焦化废水中氮污染物去除率不高。

2.6 不同处理条件下污染物的去除效率比较

本研究采用的两种人工湿地对浊度, COD, TN 和 TP 有较好的去除效率。试验期间, AW₁对焦化废水浊度, COD, TN 和 TP 的平均去除率分别为 68.55%, 14.94%, 14.20% 和 71.26%; AW₂对焦化废水浊度, COD, TN 和 TP 的平均去除率分别为 72.54%, 21.62%, 20.50% 和 71.88%。AW₂对浊度, COD, TN 和 TP 的去除率要高于另一组, 经单因素方差分析(F 检验), 分析结果见表 3, 冬季 AW₁和 AW₂对浊度、COD 和 TN 的去除率差异显著 ($p < 0.05$), 其中对 COD, TN 去除率达到了极显著的水平 ($p < 0.01$), 对 TP 的去除率差异不明显。

表 3 不同人工湿地处理条件下污染物的去除水平比较

污染物	去除率/%		
	湿地 1	湿地 2	湿地 2 提高率
浊度(NTU)	68.55	72.54	5.82*
COD/(mg·L ⁻¹)	14.94	21.62	44.68**
TP/(mg·L ⁻¹)	71.26	71.88	0.87
TN/(mg·L ⁻¹)	14.20	20.50	44.45**
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	—	—	—

注: * 表示差异显著 ($p < 0.05$); ** 表示差异极显著 ($p < 0.01$)。

在低温季节, 有机覆盖物会提高土壤表层温度, 增强土壤微生物活性, 改善植物生长环境^[18], 试验期间, 还将人工湿地在植物采集之日前所去除的 N, P 污染物总量与每个人工湿地植物吸收的元素含量进行了比较 (见表 4), 可以发现通过收割植物对 N, P 的去除效率占人工湿地的比重很小, 2 个湿地的植物去除 N, P 较小, 均不到人工湿地去除 N, P 含量的 0.2%, 与徐竟成等^[19]的研究结果较为一致, 有机覆盖物本身对 N, P 的去除效果表现一般。

表 4 不同处理条件下污染物的去除水平比较

装置	项目	N 含量	P 含量
人工湿地 1	植物地上部分吸收含量/mg	1.79±0.12	0.68±0.08
	人工湿地去除总量/mg	2 563.53±212.34	1 387.82±118.27
	植物去除所占比重/%	0.07±0.01	0.05±0.01
人工湿地 2	植物地上部分吸收含量/mg	4.07±0.46	0.72±0.07
	人工湿地去除总量/mg	3 745.32±342.19	1 423.49±152.16
	植物去除所占比重/%	0.11±0.02	0.05±0.01

3 讨论与结论

人工湿地生态系统通过基质、植物、微生物的共

同作用来实现对污染物的降解和去除。人工湿地净化废水的机理复杂, 迄今还不完全清楚。目前, 关于人工湿地基质和植物方面国内外学者已经开展了较

多的研究,设计了较多的优化工艺,取得了很好的试验效果,还发现了不同季节人工湿地对废水净化有较大的差异^[20]。人工湿地在低温季节的运行还有诸多的限制因素。因此,低温季节人工湿地的应用,应从湿地本身运行成本及生态安全等方面进行优化,如改变运行方式、选用优质填料、选用环保保温材料等,而不能一味增加湿地外部成本,从而降低湿地的价值,影响人工湿地的推广应用。

本研究通过利用有机覆盖物的生态安全、保土保温、增肥增效、经济廉价等特点,设计添加有机覆盖物作为人工湿地保温材料,对比了有机覆盖物人工湿地与普通人工湿地的保温效率、典型污染物去除效率等方面的差异,提出了低温季节下有机覆盖物人工湿地净化外排焦化废水水质的积极作用,初步分析了土壤微生物活性及根系好氧环境是影响外排焦化废水水质净化的重要因素,促进了新型材料有机覆盖物在人工湿地净化工业外排焦化废水水质中的应用,但就有机覆盖物人工湿地的土壤—植物—覆盖物系统的微生物种类、数量等具体指标及详细机理的研究还不够深入,下一步可重点进行有机覆盖物人工湿地微生物种群结构方面的试验。本研究主要结论如下:

(1) 冬季低温条件下,在人工湿地植物表层添加有机覆盖物,土壤温度平均升高了 1.2℃,有机覆盖物有保温效果。

(2) 试验期间,两种人工湿地对外排焦化废水污染物有一定的去除效果。不添加有机覆盖物人工湿地对外排焦化废水浊度、COD、TN 和 TP 的平均去除率分别为 68.55%,14.94%,14.20%和 71.26%;有机覆盖物人工湿地对浊度、COD、TN 和 TP 的平均去除率分别为 72.54%,21.62%,20.50%和 71.88%。

(3) 冬季低温条件下,人工湿地植物层添加有机覆盖物作为保温材料后,COD 去除率升幅达 44.68%,TN 去除率升幅达 44.45%。

(4) 低温条件下人工湿地的运行,可以考虑在植物层添加清洁、成本较低的有机覆盖物作为保温材料替代采取地膜覆盖等高成本、易污染的保温措施,提高人工湿地的运行效率,减少人工湿地的运行成本及可能产生的二次污染,推进人工湿地在我国寒冷地区的使用。

[参 考 文 献]

- [1] Ghose M K. Complete physico-chemical treatment for coke plant effluents[J]. *Water Research*, 2002,36(5):1127-34.
- [2] 于开宁,王程,李艳,等. 焦化废水深度处理研究进展[J]. *工业水处理*, 2009,29(9):11-14.
- [3] Vrhovšek D, Kukanja V, Bulc T. Constructed wetland (CW) for industrial waste water treatment[J]. *Water Research*, 1996,30(10):2287-2292.
- [4] 李亚静,朱文玲,黄柱坚,等. 垂直流人工湿地脱氮过程的生态动力学模拟与分析[J]. *农业环境科学学报*, 2015,34(4):776-780.
- [5] 高侃,范旭. 人工湿地污水处理技术的应用现状与前景展望[J]. *吉林林业科技*, 2014,43(3):38-41.
- [6] 张建,邵文生,何苗,等. 潜流人工湿地处理污染河水冬季运行及升温强化处理研究[J]. *环境科学*, 2006,27(8):1560-1564.
- [7] Kosterna, E. The effect of soil mulching with organic mulches, on weed infestation in broccoli and tomato cultivated under polypropylene fibre, and without a cover[J]. *Journal of Plant Protection Research*, 2014, 54(2):188-198.
- [8] 陈玉娟,王成,鄯光发,等. 有机覆盖物对城市绿地土壤水分和温度的影响[J]. *中国城市林业*, 2009,7(3):52-54.
- [9] 高婷,赵天成,马仁彪. 低温半干旱区不同覆盖物对地温和水分时空分布的影响[J]. *土壤通报*, 2007,38(2):229-232.
- [10] Ssali H, McIntyre B D, Gold C S, et al. Effects of mulch and mineral fertilizer on crop, weevil and soil quality parameters in highland banana[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003,65(2):141-150.
- [11] 张增胜,徐功娣,李方,等. 水平潜流人工湿地复合系统净化农村高浊度富营养化水体的研究[J]. *水处理技术*, 2009,35(2):46-49.
- [12] 方艳,徐竟成,李光明,等. 铁炭法强化人工湿地深度处理外排焦化废水试验研究[J]. *井冈山大学学报:自然科学版*, 2011,32(6):59-63.
- [13] Machate T, Noll H, Behrens H, et al. Degradation of phenanthrene and hydraulic characteristics in a constructed wetland[J]. *Water Research*, 1997,31(3):554-560.
- [14] 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.
- [15] 王琴,瞿贤, Arcangeli J P, 等. 人工湿地植物对高盐废水中 COD 的去除作用[J]. *环境工程*, 2013(S1):312-315.
- [16] Hulle S W H V, Vandeweyer H J P, Meesschaert B D, et al. Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010,162(1):1-20.
- [17] 李林锋,年跃刚,蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. *环境科学研究*, 2009,22(3):337-342.
- [18] Langergraber G, Pressl A, Leroch K, et al. Long-term behaviour of a two-stage CW system regarding nitrogen removal[J]. *Water Science and Technology*, 2011, 64(5):1137-1141.
- [19] 徐竟成,徐立,黄翔峰,等. 宝钢外排综合废水人工湿地生态净化回用处理中试研究[J]. *钢铁*, 2010,45(3):87-91.
- [20] 黄翔峰,谢良林,陆丽君,等. 人工湿地在冬季低温地区的应用研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2008,30(11):84-89.