

垂直流-水平潜流一体化人工湿地对菜地废水的净化效果

朱太涛¹, 崔理华^{1*}, 林伟仲², 黄睦凯¹

(1.华南农业大学资源环境学院环境科学与工程系, 广州 510642; 2.环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要:广州市番禺区东升农场菜地废水未经处理直接排入水生植物塘,最终流入附近河流,由于菜地废水水质较差,对其造成了严重的污染,严重威胁了附近居民的饮水安全。为了提高菜地出水水质,减轻对河流的污染,通过构建垂直流-水平潜流一体化人工湿地,对菜地废水进行净化处理。湿地经过9个月的运行,结果显示,湿地对COD、NH₄⁺-N和TP的平均去除率分别达56.40%、79.09%和79.79%以上,COD、NH₄⁺-N和TP出水平均浓度分别为9.45、0.47 mg·L⁻¹和0.06 mg·L⁻¹,均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅱ类水质标准。湿地对TN的平均去除率较低,仅为35.08%,通过补充甘蔗叶作为碳源,湿地对TN的平均去除率显著提高,但随着碳源投加量的增加,去除率逐渐降低。本实验碳源投加量以1.62 kg·m⁻³为宜,TN的平均去除率最高,达80.85%,出水TN平均浓度从3.06 mg·L⁻¹降低至0.90 mg·L⁻¹。

关键词:菜地废水;水生植物塘;垂直流-水平潜流;净化效果;甘蔗叶;碳源

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)01-0166-06

Removal Efficiencies of Wastewater from Vegetable Land by the Integrated Vertical-flow and Horizontal-flow Constructed Wetlands

ZHU Tai-tao¹, CUI Li-hua^{1*}, LIN Wei-zhong², HUANG Mu-kai¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection of People's Republic of China, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Untreated wastewater with poor quality from vegetable lands in Dongsheng Farm, Panyu District, Guangzhou City is discharged directly into macrophyte ponds and eventually flows into adjacent rivers, which have seriously polluted the water resources and threatened the safety of drinking water for local residents. In this study, the integrated vertical-flow and horizontal-flow constructed wetlands were developed to treat the wastewater for water quality improvement. The nine-month operation results indicated that the average removal rates of COD, NH₄⁺-N, and TP were 56.40%, 79.09%, and 79.79%, respectively. The average concentrations of COD, NH₄⁺-N, and TP from the effluent were 9.45 mg·L⁻¹, 0.47 mg·L⁻¹ and 0.06 mg·L⁻¹, respectively, which were all reached the Level-Ⅱ of "Environmental Quality Standards for Surface Water" (GB3838—2002). The average removal rate of TN was low with only 35.08%. By supplying plant carbon such as sugarcane leaves to the wetland system, the average removal rate of TN was improved significantly. However, as the external carbon source dosage continued to increase, the average removal rate of TN was gradually decreased. Our experiments showed that the optimal supplemental amount of plant carbon was 1.62 kg·m⁻³ of sugarcane leaves, which has lead to the average removal rate of TN by 80.85% and to the decrease of the effluent average concentration of TN from 3.06 mg·L⁻¹ to 0.90 mg·L⁻¹.

Keywords: wastewater of vegetable plot; macrophyte ponds; integrated vertical-flow and horizontal-flow; purification effect; sugarcane leaves; carbon source

收稿日期:2011-03-16

基金项目:国家自然科学基金项目(40871110,41071214);广东省科技计划项目(2010B031800007,2009A020101005);广州市科技支撑计划项目(2008Z1-E621);广东省海洋渔业局项目(B201001C03)。

作者简介:朱太涛(1988—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为水污染控制工程。E-mail:763303211@qq.com

* 通讯作者:崔理华 E-mail:lihui@scau.edu.cn

人工湿地水处理技术是充分利用人工介质中栖息的植物、微生物以及基质所具有的物理、化学特性,通过过滤、吸附、离子交换、植物吸收和微生物分解等途径来处理污水的,以此达到降解污染物、净化水质的目的^[1-3]。目前,人工湿地技术已广泛应用于点源污染的治理,并取得了较好的处理效果。袁林江等研究了复合垂直流人工湿地对废水中 COD 和氮的处理,系统运行稳定后对 COD、氨氮和总氮的去除率分别可达到 85%、80%、70%^[4]。近年来,也有人利用人工湿地治理非点源污染,且效果显著^[5-6]。Peterjohn 和 Correll 研究以人工湿地作为农田和水体之间的过渡带,结果表明,50 m 宽的沿岸植被缓冲带能减少 89% 的氮和 80% 的磷进入地表水^[7]。巴西的 Engenho 湿地对磷、硝酸盐和氨的去除率分别达到 93%、78% 和 50%^[8]。

广州市番禺区东升农场菜地废水未经处理,通过排水沟渠直接排入水生植物塘,并最终流入附近河道。由于菜地废水水质较差,为劣 V 类(见表 1),对河道水体造成了严重的污染,严重影响了附近居民的饮水安全。本研究通过建立垂直流-水平潜流一体化人工湿地对废水进行净化处理,以期提高出水水质,使处理出水达到饮用水水源的水质要求。

另外,利用人工湿地处理菜地废水,通常会因为菜地废水有机氮浓度较低、反硝化碳源不足而导致人工湿地脱氮效果不佳^[9-10],需要考虑向人工湿地补充碳源。本实验选用甘蔗叶(农场内堆积有大量甘蔗叶,一般直接被焚烧还田,既污染空气,又浪费生物能源)作为植物碳源,以期提高人工湿地脱氮效果,并为进一步深入研究和开发甘蔗叶作为人工湿地外加碳源提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验处理系统工艺流程如图 1 所示。

垂直流与水平潜流一体化人工湿地由两部分组成,前部分是垂直流湿地,尺寸为 1 m×1 m×1.1 m,在上部布 DN20 的 PVC 管,在 PVC 管上钻孔,该湿地种植风车草;后部分是水平潜流湿地,尺寸为 1 m×1 m×0.75 m,种植美人蕉。墙壁都采用水泥砂浆抹面的砖结构,底部采用混凝土结构。植物种植密度均为 16 丛·m⁻²。

1 号湿地垂直流的基质填充次序为:30 cm 厚的碎石(粒径 2~4 cm)、35 cm 厚的沸石(粒径 0.5~1 cm)、35 cm 厚的砂子与高炉渣混合填料(砂子与高炉渣 4:1 混合);水平流潜流湿地基质填充的次序为:30

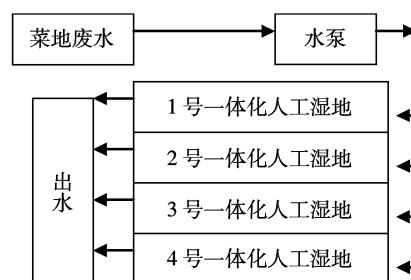


图 1 垂直流-水平潜流一体化人工湿地处理系统工艺流程图

Figure 1 The process chart of the integrated vertical-flow and horizontal-flow constructed wetlands

cm 厚的碎石(粒径 2~4 cm)、35 cm 厚的沸石(粒径 0.5~1 cm)、10 cm 厚的砂子。2~4 号湿地的垂直流与水平潜流的基质填充次序与 1 号湿地相同,但加入碳源量不同,1~4 号湿地碳源投加量分别为 0、1.62、3.24、4.86 kg·m⁻³,碳源采用甘蔗叶,剁碎添加。

1.2 运行管理方式

垂直流-平潜流一体化人工湿地系统于 2010 年 3 月建成并开始运行,至 2010 年 12 月 20 日共运行 9 个月,每个月取样 2~3 次,把 9 个月的数据逐项求平均,作为湿地的出水浓度。湿地运行的水力负荷为 0.63 m³·m⁻²·d⁻¹。

1.3 进水水质

供试废水取于东升农场内接受菜地废水的水生植物塘,其水质状况如表 1 所示。

表 1 供试废水水质状况(mg·L⁻¹)

Table 1 Characteristic of sewage used in the experiment(mg·L⁻¹)

指标	COD	TP	TN	NH ₄ ⁺ -N
浓度范围	5.23~44.01	0.17~0.65	1.79~10.04	0.79~5.73
平均值	21.67	0.31	4.72	2.22
标准误	2.28	0.02	0.76	0.28

注:表中 COD、TP、TN、NH₄⁺-N 样本数分别为 15、18、16、18,下同。

1.4 水质分析方法

总磷(TP):钼酸铵分光光度法;总氮(TN):碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法;NH₄⁺-N:纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009);COD_{Cr}:重铬酸钾消解法。

1.5 统计方法

用 Excel 2003 和 SAS8.2 软件对数据进行平均值、标准误的计算和方差分析、相关性分析,多重比较采用 Duncan 法,采用 P=0.05 的显著水平。

2 结果与分析

2.1 对 COD 的去除效果

1~4 号垂直流-水平潜流一体化人工湿地出水

COD 平均浓度如图 2 所示。可以看出,碳源投加量不同,出水 COD 平均浓度不同,且碳源投加量越大,出水 COD 平均浓度越大。碳源投加量为 0 时,COD 平均去除率为 56.40%,出水 COD 平均浓度为 $9.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) I 类水质标准。碳源投加量为 $1.62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,出水 COD 平均浓度为 $20.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,接近进水 COD 平均浓度 ($21.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),没有恶化出水水质。当碳源投加量为 3.24 、 $4.86 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,出水 COD 平均浓度均高于进水 COD 平均浓度 ($21.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

COD 常用来指示水体中有机物的含量,反映了湿地进出水有机物浓度变化。从图 2 可知,不投加植物碳源时,垂直流-水平潜流一体化人工湿地对 COD 有较好的去除效果。湿地进水为富营养化水生植物塘水,COD 浓度较低,且主要为可溶性 COD,在湿地中可以通过附着于基质及植物根系上的微生物的降解作用去除。另外,基质的过滤截留作用也是湿地去除有机物的有效途径,有研究结果表明,高炉渣和沸石等基质对 COD 有较好的去除效果^[11-12]。有研究表明,沸石人工湿地对有机物的去除率达到 78%以上^[13],湿地系统内补充植物碳源,在湿地运行的过程中,植物中半纤维素和纤维素逐渐被水解而释放出有机物,补充植物量越大,植物水解释放出的有机物越多,有机物的大量释放会恶化出水水质。从图 2 可知,碳源投加量为 $1.62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 较适宜,出水 COD 平均浓度低于进水,不会产生二次污染的问题。

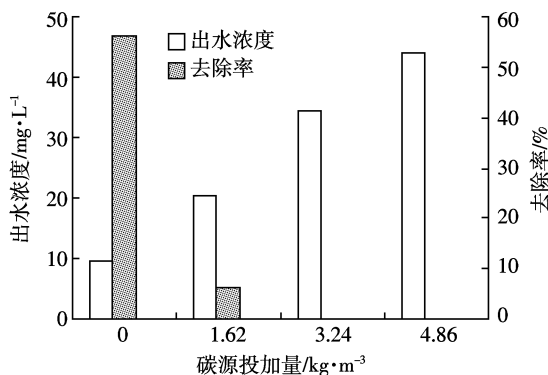


图 2 不同碳源投加量对 COD_{Cr} 的去除效果

Figure 2 Removal efficiency of COD_{Cr} with different carbon source additions

2.2 对 NH₄⁺-N 的去除效果

从图 3 可以看出,碳源投加量为 0 时,NH₄⁺-N 平均去除率为 79.09%,出水 NH₄⁺-N 平均浓度为 $0.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,小于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达《地表水环境质量标准》

(GB 3838—2002) II 类水质标准。随着碳源投加量的增加,出水 NH₄⁺-N 平均浓度逐渐增大 ($1.19 \sim 1.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),NH₄⁺-N 平均去除率逐渐降低 ($46.73\% \sim 20.72\%$)。

除包含进水中携带的一部分氨氮之外,人工湿地内氨氮通常是由有机氮经矿化转化而来,之后氨氮通过湿地内基质、微生物和植物的综合作用得以去除。沸石、高炉渣等基质疏松多孔,比表面积较大,利于氨氮在其表面吸附^[14],然后通过系统内的微生物硝化降解作用去除^[15]。有研究表明,沸石人工湿地及蛭石和高炉渣人工湿地对氨氮去除率分别可达 61%、70%以上^[12-13]。湿地内种有植物时,植物根系具有输氧作用,可以在湿地系统内形成好氧区域,有利于硝化细菌对氨氮的硝化降解作用。另外,植物对氨氮也有一定的吸收作用^[16]。有研究表明,种植植物可以显著提高湿地对氨氮的去除率达 10%以上^[12]。另外,NH₄⁺-N 去除也可以通过氨挥发来实现,一般人工湿地的 pH 在 7.5~8.0 之间,当 pH 大于 8.5 时氨氮挥发才会发生,所以通常 NH₃ 挥发损失较少^[17-18]。湿地内补充植物碳源,在湿地运行过程中植物会逐渐释放出氨氮,氨氮的释放量可达 $0.002 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[19],释放的氨氮可以补偿系统对氨氮的去除,碳源投加量越大,氨氮补偿量也越大^[20],导致 NH₄⁺-N 平均出水浓度升高,平均去除率下降。所以,碳源投加量不宜过大,本实验碳源投加量以 $1.62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 为宜。

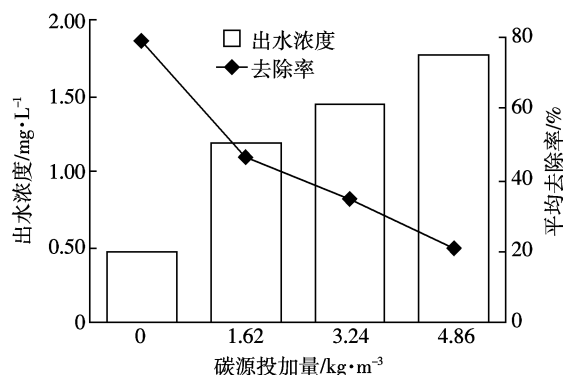


图 3 不同碳源投加量对 NH₄⁺-N 的去除效果

Figure 3 Removal efficiency of NH₄⁺-N with different carbon source additions

2.3 对 TN 的去除效果

从图 4 可以看出,补充植物碳源人工湿地对 TN 有较好的去除效果。碳源投加量为 $1.62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,TN 的平均去除率最高,达 80.85%,出水总氮平均浓度为 $0.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类水质标准。随着碳源投加量增加,TN 去除

率逐渐降低(70.02%~67.99%),出水 TN 平均浓度逐渐升高(1.41~1.51 mg·L⁻¹)。不补充植物碳源时,垂直流-水平潜流一体化人工湿地对 TN 的平均去除率较低,仅为 35.08%,出水平均浓度为 3.06 mg·L⁻¹,大于 2.0 mg·L⁻¹。

废水中的 TN 主要包括硝氮、氨氮及有机氮。大量研究表明,人工湿地中的氮主要通过系统内微生物的硝化、反硝化作用去除。通过使用垂直流人工湿地及植物根系输氧等方式,可以强化湿地内微生物的硝化作用,因而微生物的反硝化作用成为湿地脱氮的决定性因素。微生物反硝化作用需要有机碳作为电子供体,以还原硝酸盐氮,当系统有机碳供应不足时,会降低 TN 的去除效率。虽然进水中提供一部分有机碳,但因其含量较低,不能满足微生物反硝化作用脱氮所需要的有机碳含量,所以需要人工补充碳源。目前,人工湿地采用的补充碳源多为植物碳源,其脱氮效率较高^[21-22]。湿地在运行过程中,甘蔗叶不断分解释放出有机碳,弥补了进水中有机碳的不足,强化了反硝化作用,提高了脱氮效率。从图 4 可以看出,碳源投加量为 1.62 kg·m⁻³ 较适宜。

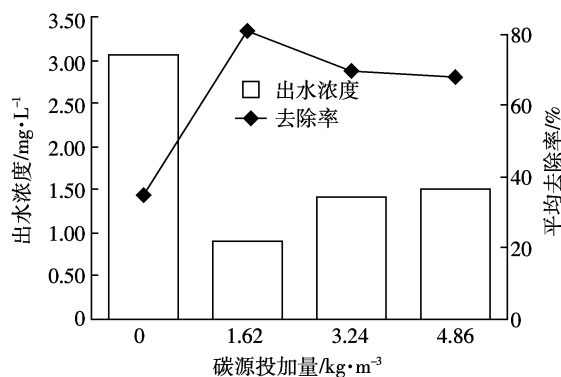


图 4 不同碳源投加量对 TN 的去除效果

Figure 4 Removal efficiency of TN with different carbon source additions

2.4 对总磷的去除效果

从图 5 可以看出,不补充植物碳源时,TP 平均去除率为 79.79%,出水 TP 平均浓度为 0.06 mg·L⁻¹,达《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水质标准。随着碳源投加量的增加,湿地 TP 平均去除率和出水平均浓度的变化规律与 NH₄⁺-N 一致。当碳源投加量为 1.62 kg·m⁻³ 时,出水水质较好,平均去除率为 65.91%,出水 TP 平均浓度(0.09 mg·L⁻¹)达《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水质标准。

人工湿地对磷的去除主要通过基质吸附、植物吸

收和微生物去除 3 条途径来实现,其中基质吸附起着主导作用。废水中的磷主要包括活性磷和非活性磷两种,其中非活性磷可以被植物吸收利用,但通常吸收较为缓慢且去除率较低,有研究表明,植物摄取作用的去除率仅为 1%~3%^[23]。微生物对磷的去除包括对磷的正常同化和对磷的过量积累,而植物根系分泌物可促进某些嗜磷细菌的生长,促进磷的吸收转化^[24],但微生物吸收的磷是比较少的^[25]。只有基质对磷的吸附作用是磷去除的主要途径,有研究表明,沸石,高炉渣等基质对磷有较好的吸附去除作用^[26-27],蛭石和高炉渣垂直流人工湿地对 TP 的去除率达 76.15%以上^[12]。湿地中补充植物碳源,在其运行的过程中植物营养物质磷也会被释放到水中,但释放量较少,当植物碳源投加量少于 2 g·L⁻¹ 时,磷释放量几乎为零^[20]。因此,补充植物碳源对湿地中磷的去除影响较小。但碳源投加量也不宜过大,碳源投加量越大,磷释放量必然越大,可能引起水质恶化。本实验中,碳源投加量较为适宜,出水 TP 平均浓度均低于进水,没有引起水质恶化,但随着碳源投加量的增加,出水 TP 平均浓度有变大的趋势,平均去除率也随之降低,本实验碳源投加量以 1.62 kg·m⁻³ 较适宜。

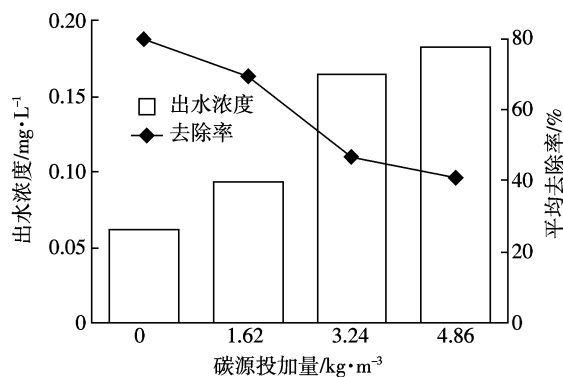


图 5 不同碳源投加量对 TP 的去除效果

Figure 5 Removal efficiency of TP with different carbon source additions

3 讨论

3.1 一体化人工湿地对 COD、NH₄⁺-N 和 TP 的净化效果

利用人工湿地净化菜地废水,主要是通过湿地内植物、基质及微生物等的综合作用对污染物加以去除,废水中的有机物经过基质和植物根系截留之后,再经过系统内微生物的降解作用得以去除。从本实验看,一体化人工湿地对 COD 净化效果较好,去除率可达 56.40%。本实验基质主要为高炉渣、沸石等材料,

由于其内部孔隙较多,且表面具有较强的色散力^[28],对废水中氨氮、磷等污染物有较好的吸附作用^[29];湿地种有水生植物,植物根系的分泌物及其输氧作用,可为微生物生长提供良好的环境条件,提高了氨氮和磷的去除效果^[30]。从本实验看,一体化人工湿地对TP、氨氮的去除率分别可达79.79%和79.09%以上。湿地内补充植物碳源,在其分解利用的过程中会释放出有机物、氨氮和磷等营养物质,可能影响系统对废水中COD、NH₄⁺-N和TP的去除。从本实验看,投加碳源量以1.62 kg·m⁻³为宜,出水COD、NH₄⁺-N和TP平均浓度低于进水,不会产生二次污染的问题。

3.2 一体化人工湿地对TN的净化效果

人工湿地中的氮主要通过微生物的硝化、反硝化作用去除,本实验废水取于收集菜地排水的水生植物塘,进水有机物浓度较低,而当进水有机物浓度较低时,微生物的反硝化作用会成为人工湿地氮去除的限制因素,因此需要补充碳源。有研究表明,通过向人工湿地补充芦苇秆等植物碳源,TN的去除率可提高至60%以上^[9]。补充甘蔗叶作为植物碳源提高了人工湿地对TN的去除效率,但碳源投加量并不是越大越好,随着碳源投加量的增加,TN平均去除率逐渐降低,出水TN浓度逐渐升高,本实验碳源投加量以1.62 kg·m⁻³为宜。

4 结论

(1)垂直流-水平潜流一体化人工湿地对COD、NH₄⁺-N和TP有较好的去除效果,对COD、NH₄⁺-N和TP的平均去除率分别达56.40%、79.09%、79.79%以上,COD、NH₄⁺-N和TP出水平均浓度分别为9.45、0.47 mg·L⁻¹和0.06 mg·L⁻¹,均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅱ类水质标准。湿地内补充植物碳源,在湿地运行的过程中会分解释放有机物、氨氮和磷等营养物质,增加了废水中的污染物浓度,从本实验看,碳源投加量以1.62 kg·m⁻³为宜,不会恶化出水COD、NH₄⁺-N和TP浓度。

(2)不补充植物碳源时,湿地对TN的平均去除率仅为35.08%,出水平均浓度为3.06 mg·L⁻¹,出水水质较差。补充植物碳源可以提高垂直流-水平潜流一体化人工湿地对TN的去除效率。但补充植物碳源量不是越多越好,因为随着碳源投加量的增加,去除率逐渐降低,出水TN平均浓度逐渐升高。本实验碳源投加量以1.62 kg·m⁻³为宜,不仅TN的平均去除率最高,达80.85%,且出水总氮平均浓度降低至0.90 mg·L⁻¹。

参考文献:

- [1] 崔理华,楼倩,等.两种复合人工湿地系统对东莞运河污水的净化效果[J].生态环境学报,2009,18(5):1688-1692.
CUI Li-hua, LOU Qian, et al. Purification efficiency of wastewater in Dongguan canal by different hybrid constructed wetlands[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5):1688-1692.
- [2] 田晓燕,吴晓燕,张剑锋,等.间歇流人工湿地处理系统微生物净化机理研究[J].环境科学与技术,2009,32(12):56-59.
TIAN Xiao-yan, WU Xiao-yan, ZHANG Jian-feng, et al. Mechanism of microorganism purged wastewater in sequence constructed wetland process[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(12):56-59.
- [3] 宋铁红,韩相奎,林英姿,等.间歇流人工湿地处理生活污水试验研究[J].吉林建筑工程学院学报,2003,20(3):1-3.
SONG Tie-hong, HAN Xiang-kui, LIN Ying-zi, et al. The experimental study of batch-flow constructed wetland treating municipal wastewater[J]. *Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute*, 2003, 20(3):1-3.
- [4] 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),2008,40(4):521-526.
YUAN Lin-jiang, HAN Rui-rui, HAN Wei. Characteristics of COD and nitrogen removal of integrated vertical-flow constructed wetland with intermittent feeding[J]. *Xi'an Univ of Arch & Tech(Natural Science Edition)*, 2008, 40(4):521-526.
- [5] 唐鼎鹏,张玲,张旭.人工沸石复合湿地技术控制面源污染应用研究[J].安徽农业科学,2010,38(14):7501-7503.
TANG Chong-peng, ZHANG Ling, ZHANG Xu. Study on the application of technique of constructed wetland combined with zeolite for control of non-point source pollution[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2010, 38(14):7501-7503.
- [6] 姜翠玲,崔广柏.湿地对农业非点源污染的去除效应[J].农业环境保护,2002,21(5):471-473,476.
JIANG Cui-ling, CUI Guang-bo. Effectiveness of wetlands in removal of non-point pollutants from agricultural source [J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(5):471-473, 476.
- [7] Peterjohn W T, Correll D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest[J]. *Ecology*, 1984 (65):1466-1475.
- [8] Farahbakhshazad N, Morrison G M, Filho E S. Nutrient removal in a vertical up flow wetland in Piracicaba, Brazil[J]. *Ambio*, 2000, 29(2):74-77.
- [9] 贾文林,吴娟,武爱国,等.碳氮比对人工湿地污水处理效果的影响[J].环境工程学报,2010,4(4):767-770.
JIA Wen-lin, WU Juan, WU Ai-guo, et al. Effect of influent C/N addition on performance of wastewater treatment in constructed wetlands[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(4):767-770.
- [10] 刘刚,闻岳,周琪.补充生物质强化水平潜流湿地去除硝酸盐氮研究[J].中国给水排水,2009,25(21):13-16.
LIU Gang, WEN Yue, ZHOU Qi. Adding biomass for removal of nitrate in horizontal subsurface flow constructed wetland [J]. *China Water*

- & Wastewater, 2009, 25(21):13-16.
- [11] 黄德锋, 李 田. 不同基质复合垂直流人工湿地对富营养化景观水的净化效果[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(8):616-621.
HUANG De-feng, LI Tian. Effect of the substrate on purification of eutrophic scenic water in integrated vertical-flow constructed wetlands[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, 29(8):616-621.
- [12] 朱文玲, 崔理华, 朱夕珍, 等. 混合基质垂直流人工湿地净化废水效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊1):44-48.
ZHU Wen-ling, CUI Li-hua, ZHU Xi-zhen, et al. Removal efficiencies of simulated mixed matrix vertical-flow constructed wetlands for effluent treatment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(Suppl1):44-48.
- [13] 高红杰, 彭剑峰, 宋永会, 等. 铵饱和和天然钙型沸石基质人工湿地对模拟养猪废水的处理效能[J]. 环境保护科学, 2010, 36(6):14-16, 34.
GAO Hong-jie, PENG Jian-feng, SONG Rong-hui, et al. Performance of circular flow constructed wetland(CFCW) stuffed with natural Ca-form zeolite saturated with ammonium for simulated swine wastewater treatment[J]. *Environmental Protection Science*, 2010, 36(6):14-16, 34.
- [14] Guo X J, Zeng L, Li X M, et al. Ammonium and potassium removal for anaerobically digested wastewater using natural clinoptilolite followed by membrane pretreatment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151(1):125-133.
- [15] Jespersen D N, Sorrell B K, Brix H. Growth and root oxygen release by *Typha latifolia* and its effects on sediment methanogenesis[J]. *Aquatic Botany*, 1998, 61:165-180.
- [16] Rogers K H, Breen A J, Chick A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: Evidence for the role of aquatic plants[J]. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, 1991, 63(7):934-941.
- [17] Vymazal J, Brix H, Cooper P, et al. Removal mechanisms and types of constructed wetlands in Europe[M]. Leiden: Backhuys Publishers, 1998:17-66.
- [18] Jayaweera G R, Mikkelsen D S. Assessment of ammonia volatilization from flooded soil systems[J]. *Advances in Agronomy*, 1991, 45:303-365.
- [19] 李 燕, 王丽卿, 张瑞雷. 5种沉水植物死亡分解过程中氮磷营养物质的释放[J]. 上海环境科学, 2008, 27(2):68-72.
LI Yan, WANG Li-qing, ZHANG Rui-lei. Nutrient releasing dynamics during decomposition process for five species of submerged macrophytes[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2008, 27(2):68-72.
- [20] 赵联芳, 朱 伟, 高 青. 补充植物碳源提高人工湿地脱氮效率. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(6):644-649.
ZHAO Lian-fang, ZHU Wei, GAO Qing. Improving nitrogen removal of constructed wetlands by supplying plant carbon[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2009, 10(6):644-649.
- [21] Fleming-singer M S, Horne A J. Enhanced nitrate removal efficiency in wetland microcosms using an episodiment layer for denitrification[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002(36):1231-1237.
- [22] Ingersol T L, Baker L A. Nitrate removal in wetland microcosm[J]. *Water Research*, 1998, 32(3):677-684.
- [23] 崔理华, 朱夕珍, 骆世明, 等. 垂直流人工湿地系统对污水磷的净化效果[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(7):13-17.
CUI Li-hua, ZHU Xi-zhen, LUO Shi-ming, et al. The purification efficiency of phosphorus by means of vertical-flow constructed wetlands treatment system[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(7):13-17.
- [24] 熊 飞, 李文朝, 潘继征, 等. 人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展[J]. 湿地科学, 2005, 3(3):228-234.
XIONG Fei, LI Wen-chao, PAN Ji-zheng, et al. Efficiency and functioning of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands: A review[J]. *Wetland Science*, 2005, 3(3):228-234.
- [25] Schreijer M, Kampf R, Toet S, et al. The use of constructed wetlands to upgrade treated sewage effluents before discharge to natural surface water in Texel Island, the Netherlands-pilot study[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5):231-237.
- [26] Brooks A S, Rozenwald M N, Geohring L D, et al. Phosphorus removal by wollastonite: A constructed wetland substrate[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15:121-132.
- [27] 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, 17:345-355.
- [28] 苗伟红. 人工湿地填料处理污水的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
MIAO Hong-wei. Experimental study on sewage treatment by fillings in constructed wetlands[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [29] 邓雁希, 许 虹, 黄 玲, 等. 炉渣处理含磷废水的实验研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(3):290-292.
DENG Yan-xi, XU Hong, HUANG Ling, et al. The removal of phosphorus from wastewater with the help of slag [J]. *ACTA Petrological Etmineral Mineralogica*, 2003, 22(3):290-292.
- [30] 郭本华, 宋志文, 韩潇源. 碎石、沸石和页岩陶粒构建人工湿地的除磷效果[J]. 工业用水与废水, 2005, 36(2):46-52.
GUO Ben-hua, SONG Zhi-wen, HAN Xiao-yuan. Phosphorus removal effect of artificial wetland built with detritus, zeolite and shale-haydite [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2005, 36(2):46-52.