

有机负荷对潮汐流人工湿地净化农村生活污水的影响

杜新, 施春红^①, 马方曙 (北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 农村生活污水排量逐年增加,传统人工湿地复氧能力较差,床体氧环境直接影响污染物去除效果。通过模拟农村生活污水间歇排放特征,构建新型潮汐流人工湿地小试试验,对比研究了不同 COD 负荷下(167.9、221.9、610.3 和 760.0 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)床体氧环境和污染物去除效果。结果表明:有机物浓度是潮汐流 COD 去除效果的主要限制因素,COD 去除率最高为 95.6%; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果随有机负荷增加而逐渐升高(85.2%~98.7%),有机负荷增加有助于加强异养菌同化作用。TN 去除规律同 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,反硝化强度因有机物增加而增加,TN 去除率最大为 80.3%。火山岩吸附 P 性能较差,而有机负荷的增加促进了聚磷菌(PAOs)的吸 P 作用,TP 去除率最高达 71.0%。
关键词: 潮汐流; 农村生活污水; 有机负荷; 氧环境

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831(2015)03-0380-05

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2015.03.017

Impact of Organic Pollutant Loading on Effect of Artificial Tidal Flow Wetland Purifying Rural Domestic Sewage.

DU Xin, SHI Chun-hong, MA Fang-shu (School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: With increasing discharge of domestic sewage in the rural areas, conventional constructed wetlands gradually fail in reoxygenation capacity, oxygen environments of their beds directly affect pollutants removal efficiency. By simulating the characteristic of intermittent discharge of domestic sewage in the rural areas, a new type of artificial tidal flow wetland (ATFW) was constructed in lab for an experiment to explore impact of COD loading (167.9, 221.9, 610.3 and 760.0 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) on oxygen environment of the bed and pollution removal efficiency. Results show that concentration of organic pollutants was the main factor limiting COD removal efficiency of the tidal flow; COD removal efficiency of the system may reach as high as 95.6%; the ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) removal efficiency increased with rising organic pollutant loading rate from 85.2% to 98.7%; and higher organic pollutant loading favored assimilation of heterotrophic bacteria and enhanced denitrification. The removal of total nitrogen (TN) followed a trend similar to that of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ with the highest TN removal rate reaching up to 80.3%. Although adsorption was regarded as the primary pathway of phosphorus removal, which was determined by influent phosphorus concentration, the proportion of total phosphorus (TP) removal through adsorption was low due to the poor adsorption capacity of volcanics. Higher OLR stimulated phosphorus accumulating organisms (PAOs) to absorb P, pushing TP removal rate up to 71.0%.

Key words: tidal flow; rural domestic sewage; organic loading rate; DO condition

作为生态处理技术的一种,人工湿地以投资低、能耗低、运行管理方便等特点近年来得到广泛应用^[1],特别是在一些经济不发达、基础设施不健全的农村地区^[2]。不同类型的湿地,因其结构和运行方式不同,使得床体氧环境和污染物去除效果具有差异性^[3]。表面流湿地由于污水限于基质表面流动,水位较浅,易受季节影响,净化效果难以稳定。水平潜流湿地虽然构造上避免了表面流湿地的缺陷,污水在床体内部流动,充分利用了基质截留作用,但由于床体长期处于淹水状态,复氧能力较差,从而限制了污染物的去除效率^[4]。垂直流湿地中污水依靠重力作用非饱和流动,虽然复氧能力相对于水平潜流有所提高,但仍不能满足高浓度有

机物及氨氮的氧化去除要求^[5]。

近年来,一种新型的潮汐流人工湿地逐渐发展起来,其原理就是床体交替注满和排水,依靠床体饱和浸润面周期性变化产生的基质孔隙吸力将大气氧吸入床体,可显著提高床体氧传输量^[6]和复氧能力^[7]。研究表明,潮汐运行可提供平均 350 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的复氧量^[8],远远高于垂直流(50~90 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)^[9]和水平潜流(1~8 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)^[10]的

收稿日期: 2014-09-01

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07105-002-01)

^① 通信作者 E-mail: sch.22@163.com

复氧能力。而且处理相同量的污染物,潮汐流湿地较曝气水平潜流湿地节省一半的能耗^[11]。目前,已有不少潮汐流应用于农村生活污水处理的报道^[12-14],但大多数研究均采用瞬间进水和瞬间排空的运行方式,通过控制床体淹没(反应)和排空(闲置)时间以优化污染物去除效率,而关于依据农村生活污水排放时段特征(夜晚基本无污水产生)而进行的人工湿地(白天运行,夜晚闲置)的研究则鲜有报道。

笔者通过模拟农村生活污水间歇排放特征,在实验室构建无植物潮汐流人工湿地,对比研究不同有机负荷下床体氧环境以及湿地对 COD、NH₄⁺-N、TN 和 TP 的去除效果,以期为潮汐流人工湿地的实际应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置和运行条件

试验装置为 1 套模拟的圆柱体潮汐流人工湿地系统(图 1)。柱体由有机玻璃制成,高 1 700 mm,内径 150 mm,内部装填火山岩基质,上层填充粒径 8~10 mm 的粗颗粒,装填高度 800 mm,底层填充粒径 3~5 mm 的细颗粒,装填高度 700 mm。柱体中部垂直放置 PVC 管以便实时监测反应器中 DO。装置安装实时控制系统,控制进水和出水时间。

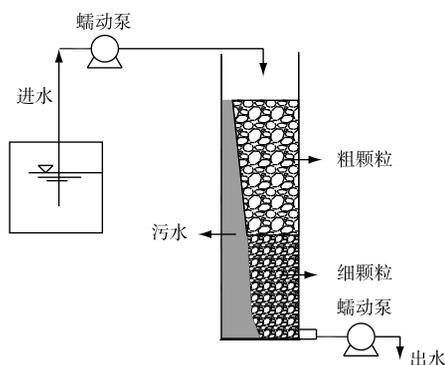


图 1 潮汐流人工湿地系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of constructed wetland system

试验用水为人工配制的生活污水。通过混合无水葡萄糖、氯化铵和磷酸氢二钾,配制 $\rho(\text{COD})$ 为 200~300 mg · L⁻¹ (对应有机负荷为 152~228 g · m⁻² · d⁻¹) 和 800~1 000 mg · L⁻¹ (对应有机负荷为 608~760 g · m⁻² · d⁻¹)、 $\rho(\text{TN})$ 为 31 mg · L⁻¹ 和 $\rho(\text{TP})$ 为 5 mg · L⁻¹ 的生活污水。每个负荷下反应器运行 20 d,停运 3~4 d 后变换负荷。潮汐流运行方式为 08:00~17:00 进水,14:30~23:00 出水,

23:00~次日 08:00 闲置。进水方式由上而下,进水流速为 25 mL · min⁻¹,水力负荷为 0.76 m³ · m⁻² · d⁻¹,反应器运行温度为 13.0~19.2 °C。

1.2 采样和水质分析

反应器启动及生物挂膜时间为 40 d。每天采集进出水测定 COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TN 和 TP。COD 浓度采用快速消解分光光度法测定, NH₄⁺-N 浓度采用纳氏试剂分光光度法测定, NO₃⁻-N 浓度采用紫外分光光度法测定, NO₂⁻-N 浓度采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定, TN 浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, TP 浓度采用钼酸铵分光光度法测定。DO 浓度采用 HACH HQ40d 多参数水质测定仪测定。

2 结果与讨论

2.1 湿地中 DO 浓度的变化

湿地中 DO 浓度影响着有机物降解程度以及硝化和反硝化强度等^[15]。图 2 为潮汐流顶部(距底部高度 120~150 cm) DO 浓度周期变化情况。其中,依据 DO 变化趋势差异,420 min 测试时间大致可分为 3 个阶段,第 1 阶段(180~330 min)为 DO 探针浸没前 2.5 h,第 2 阶段(330~540 min)为 DO 探针浸没至进水停止,进水停止后的 1 h 为第 3 阶段(540~600 min)。

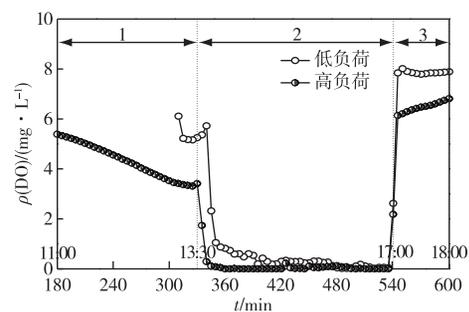


图 2 潮汐流人工湿地运行过程中 $\rho(\text{DO})$ 的变化

Fig. 2 Variation of DO in operation of the ATFW system

由图 2 可知,DO 变化较复杂,但也有一定的规律。高有机负荷下,第 1 阶段,污水由上而下进入床体,伴随着有机物沿程好氧分解,DO 浓度开始逐步下降,但降低速率较缓慢。当进入第 2 阶段,DO 探针完全浸没水中,即床体充满水,大量有机物持续好氧分解造成 DO 浓度大幅度降低,直至为 0。由于没有额外的氧补充,床体维持 DO 浓度为 0 至进水停止时刻。第 3 阶段,由于停止进水,DO 探针慢慢暴露水面,此刻 DO 浓度迅速恢复到较高水平,直至

饱和。另外,低有机负荷下,DO浓度在第1阶段呈现相对缓慢的下降趋势,在第3阶段呈相对较高的饱和水平,这主要是因为高浓度有机物分解加速消耗DO。

2.2 人工湿地运行效果

潮汐流人工湿地运行效果如表1和图3所示。由表1可知,尽管进水有机物浓度从257增加到 $900 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (相应有机负荷由195.3增至 $684 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),但潮汐流对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的去除效率分别增加10%、11%、53%和38%,平均去除负荷从112.2、11.1、3.6和 $0.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 增加到438.6、13.0、11.9和 $1.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,说明进水有机物的增加有利于潮汐流去除污染物。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 呈相反的变化趋势,有机负荷的增加明显减少出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度,而出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度略微升高。

表1 潮汐流人工湿地运行效果

Table 1 Performance of the artificial tidal flow wetland

进水负荷	指标	进水 $\rho/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水 $\rho/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除率/ %
低负荷	COD	257.1 ± 39.2	36.6 ± 4.2	85.5 ± 2.6
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	25.3 ± 0.9	3.3 ± 0.7	87.1 ± 2.7
	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	4.9 ± 0.2	20.2 ± 1.8	—
	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	0	0.2 ± 0.1	—
	TN	31.5 ± 1.2	25.3 ± 2.2	21.8 ± 7.1
	TP	5.1 ± 0.3	3.7 ± 0.3	28.5 ± 7.1
高负荷	COD	900.2 ± 100.5	40.2 ± 4.4	95.3 ± 0.6
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	25.9 ± 2.2	0.5 ± 0.5	98.1 ± 2.1
	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	4.1 ± 0.4	4.7 ± 3.7	—
	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	0	1.4 ± 0.8	—
	TN	31.2 ± 3.4	7.7 ± 3.2	74.8 ± 11.5
	TP	4.6 ± 0.4	1.5 ± 0.4	66.7 ± 10.1

2.2.1 有机物的去除

图3为有机负荷变化对COD去除效果的影响。选取4种COD负荷,分别为167.9、221.9、610.3和 $760.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。随着有机负荷的增加,潮汐流COD去除效果逐步升高,分别为83.9%、87.0%、95.0%和95.6%,其对应去除量(去除负荷)分别为 2.5 g ($95.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)、 3.4 g ($129.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)、 10.3 g ($389.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)和 12.9 g ($486.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)。这说明有机负荷的增加促进COD去除,同时也反映潮汐流在处理高有机负荷污水方面具有较大的潜力。

有机物去除效果同湿地中氧含量紧密相关,并且氧首先供给有机物好氧降解^[8]。因DO限制,传统的湿地只有在较低的有机负荷下才能取得高效

的有机物去除效果。PROCHASKA等^[16]对垂直流处理模拟城市污水的研究发现,在较低的有机负荷下($20 \sim 40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),垂直流对COD的去除效率最高可达92%。另有研究显示,综合考虑 BOD_5 (95%)和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (90%)的去除效果,垂直流最适宜的有机负荷(以 BOD_5 计)为 $10 \sim 40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[17]。潮汐运行可以明显改善传统湿地复氧能力弱的缺陷。SUN等^[6]通过氧供需计算发现,在平均进水有机负荷为 $738 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的条件下,潮汐流 $473 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的供氧量几乎可以满足有机物好氧分解理论氧需求($478 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。当DO充裕时,进水有机物浓度成为衡量COD去除效果的主要限制因素^[18]。另外有研究表明,潮汐流具有处理高有机负荷污水的能力^[19]。SUN等^[19]在高强度污水处理的研究中得出,当进水有机负荷(以COD计)为 $2000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,潮汐流COD去除率仍能达到70%。该研究虽然进水有机负荷与之相比相差甚大,但平均95%的COD去除率仍能说明潮汐流在处理高有机负荷污水方面具有很好的作用。

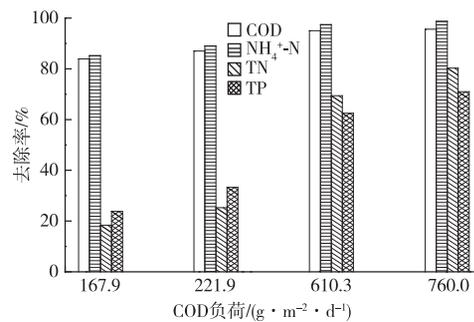


图3 有机负荷变化对污染物去除效果的影响

Fig. 3 Effect of organic pollutant loading on pollutant removal efficiency

2.2.2 氮的去除

潮汐流对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果随有机负荷的增加而逐步升高,分别为85.2%、89.0%、97.4%和98.7%(图3)。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要通过硝化作用、基质吸附、异养菌同化、氨挥发和厌氧氨氧化等途径从人工湿地中除去。硝化作用是一种微生物好氧自养过程, $\rho(\text{DO})$ 高于 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 是硝化反应发生的必要条件^[20],且只有当有机物质量浓度降至 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下^[21],硝化反应才能起到显著作用。异养菌同化作用是异养菌利用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 合成自身的细胞物质。理论上每降解 $1 \text{ g} \text{ BOD}_5$ 消耗 $0.074 \text{ g} \text{ NH}_4^+\text{-N}$ ^[22],然而现实情况较复杂,实际值会小于理论值。

该研究采用易生物降解的葡萄糖作为有机碳源,在考虑去除的有机物量仅是通过异养菌分解的前提下,低有机负荷下潮汐流因有机物降解而消耗的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别为0.18 g(51%)和0.25 g(71%)。然而,通过与实测 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率(85%~89%)相比,实际由异养菌同化贡献值要远小于上述计算值。低有机负荷下大量 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的生成反映出充分的硝化反应发生。低有机负荷下,潮汐流充足的复氧量不仅可以满足一定浓度有机物降解氧需求,而且可以保证高强度的硝化反应发生。此条件下,少量增加有机负荷有利于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除。

SUN等^[6]通过理论估算得出,当有机负荷(以 BOD_5 计)提升至 $571\sim 906\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,潮汐流湿地内仅有不到1%的DO用于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化,由此通过硝化降解的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不及10%。高有机负荷下,过量的有机物进一步阻碍了硝化细菌竞争DO,从而导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化效果降低。然而,该研究中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率仍然升高的主要原因是有机物去除量显著增加,导致由异养菌同化减少的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 明显增加,从而弥补了因硝化减弱引起的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除量减少。

有机负荷对TN的影响趋势(图3)同 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化相似,TN去除率逐渐上升,分别为18.4%、25.3%、69.4%和80.3%。TN去除首先依赖高效的硝化反应。硝化反应结束后,反硝化细菌在有机物为电子供体的条件下,利用硝化产物($\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$)作为电子受体将其转化成 N_2 ^[23]。反硝化去除的TN占湿地所有脱氮量的60%~95%^[24]。低有机负荷下,潮汐流高效的硝化反应为反硝化过程提供了充足的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 来源(表1),进满水后的缺氧环境有利于反硝化进行。此条件下TN去除效果较差主要是因为有机碳源的不足。理论上,转化1 g $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 至 N_2 将消耗8.67 g COD^[25]。研究显示,间歇曝气的人工湿地 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率高达93.9%,但由于进水有机碳源的限制,TN去除率仅为46.9%^[15]。电子供体的缺乏阻碍了反硝化进程,从而限制TN的去除量。此时积累的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 成为出水TN的主要存在形态。随着有机负荷的增加,尽管硝化强度减弱,但生成的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($>5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)仍能满足高强度的反硝化需求,此时充足的有机碳源满足了电子供体的需求,从而提高TN去除效果。

2.2.3 P的去除

随着有机负荷的增加,潮汐流对TP的去除率不断上升,分别为23.8%、33.3%、62.5%和71.0%

(图3)。湿地P一般通过基质吸附、化学沉淀、微生物同化和植物吸收等途径得以除去。基质吸附和化学沉淀主要决定于基质类型,高富含钙、镁、铁、铝等元素的基质有助于湿地对磷的去除^[26-27]。另外,进水P浓度决定磷的首要去除机制,从而显著影响P去除效果^[28]。当进水 $\rho(\text{TP})$ 大于 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,吸附是P的首要去除机制,当进水 $\rho(\text{TP})$ 低于 $0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,微生物除P更为主要。微生物除P主要依靠聚磷菌(PAOs)的吸P作用,缺氧条件下,PAOs将体内的P释放到环境中,同时吸收有机物以储存能量,之后有氧条件下,释放能量以超量吸P^[29]。同时有研究发现,在缺氧环境下某些PAOs也可以利用硝酸盐进行反硝化聚P^[30]。

该研究中进水 $\rho(\text{TP})$ 为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,决定其首要去除途径为基质吸附。然而由于采用的火山岩基质吸附性能较差,因而由基质吸附的TP较少。CHEN等^[31]从不同基质垂直流人工湿地处理污水的研究中发现,同一条件下,火山岩湿地对P的去除率最高,仅有13.3%,远低于沙砾湿地(64.4%)和木屑湿地(38.8%),可以推断PAOs的吸收对除P有一定贡献。然而有机物浓度成为低负荷下潮汐流PAOs除P的主要限制因素^[25],随着有机负荷的增加,PAOs吸P强度提高,从而使得TP去除率升高。

3 结论

潮汐运行显著提高床体的氧传输量和复氧能力。随着有机负荷的增加,潮汐流对污染物的去除效果均逐渐增强,有机物浓度是衡量COD去除效果的主要限制因素,COD去除率最高为95.6%。尽管高有机负荷下硝化强度减弱,但异养菌同化作用增强, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率由85.2%升至98.7%。反硝化强度因有机物的增加而升高,TN去除率增幅明显,由18.4%升至80.3%。试验所选火山岩基质的吸附效果较差,有机负荷的增加可促进PAOs吸磷,TP去除率最高为71.0%。

参考文献:

- [1] CASELLES-OSORIO A, GARCÍA J. Performance of Experimental Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands Fed With Dissolved or Particulate Organic Matter[J]. Water Research, 2006, 40(19): 3603-3611.
- [2] VYMAZAL J. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment[J]. Ecological Engineering, 2005, 25(5): 475-477.
- [3] 栾晓丽, 王晓, 赵钰, 等. 复合垂直流与潜流人工湿地沿程脱氮除磷对比研究[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(11): 26-29.

- [4] 孙文杰,余宗莲,关艳艳,等.垂直流人工湿地净化污水的研究进展[J].安全与环境工程,2011,18(1):25-28.
- [5] COOPER P. The Performance of Vertical Flow Constructed Wetland Systems With Special Reference to the Significance of Oxygen Transfer and Hydraulic Loading Rates[J].Water Science & Technology,2005,51(9):81-90.
- [6] SUN G,ZHAO Y,ALLEN S.Enhanced Removal of Organic Matter and Ammoniacal-Nitrogen in a Column Experiment of Tidal Flow Constructed Wetland System[J].Journal of Biotechnology,2005,115(2):189-197.
- [7] BEHREND L,HOUE L,BAILEY E,*et al.* Reciprocating Constructed Wetlands for Treating Industrial, Municipal and Agricultural Wastewater[J].Water Science & Technology,2001,44(11/12):399-405.
- [8] WU S,ZHANG D,AUSTIN D,*et al.* Evaluation of a Lab-Scale Tidal Flow Constructed Wetland Performance:Oxygen Transfer Capacity,Organic Matter and Ammonium Removal[J].Ecological Engineering,2011,37(11):1789-1795.
- [9] COOPER P, SMITH M, MAYNARD, H. The Design and Performance of a Nitrifying Vertical-Flow Reed Bed Treatment System[J].Water Science & Technology,1997,35(5):215-221.
- [10] GARCIA J,ROUSSEAU D P,MORATO,J,*et al.*Contaminant Removal Processes in Subsurface-Flow Constructed Wetlands:A Review[J].Critical Reviews in Environmental Science and Technology,2010,40(7):561-661.
- [11] AUSTIN D,NIVALA J.Energy Requirements for Nitrification and Biological Nitrogen Removal in Engineered Wetlands [J]. Ecological Engineering,2009,35(2):184-192.
- [12] 吴树彪,张东晓,柳清青,等.潮汐流人工湿地床处理生活污水的优化研究[J].中国农业大学学报,2010,15(2):106-113.
- [13] 刘昌伟,薛晨,杨永哲,等.新型潮汐流人工湿地深度处理生活污水的研究[J].中国给水排水,2012,28(011):10-13.
- [14] WOOD J,FERNANDEZ G,BARKER A,*et al.*Efficiency of Reed Beds in Treating Dairy Wastewater[J].Biosystems Engineering,2007,98(4):455-469.
- [15] JIA W,ZHANG J,WU J,*et al.*Effect of Intermittent Operation on Contaminant Removal and Plant Growth in Vertical Flow Constructed Wetlands: A Microcosm Experiment [J]. Desalination,2010,262(1/2/3):202-208.
- [16] 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.
- [17] BRIX H,ARIAS C A.The Use of Vertical Flow Constructed Wetlands for On-site Treatment of Domestic Wastewater:New Danish Guidelines[J].Ecological Engineering,2005,25(5):491-500.
- [18] 李春华,王蔚卿,倪利晓,等.人工曝气对垂直潜流人工湿地运行效率的影响[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(3):259-263.
- [19] SUN G,ZHAO Y Q,ALLEN S J.An Alternative Arrangement of Gravel Media in Tidal Flow Reed Beds Treating Pig Farm Wastewater[J].Water, Air, and Soil Pollution,2007,182(1/2/3/4):13-19.
- [20] YE F,LI Y.Enhancement of Nitrogen Removal in Tower Hybrid Constructed Wetland to Treat Domestic Wastewater for Small Rural Communities[J].Ecological Engineering,2009,35(7):1043-1050.
- [21] SUN G, GRAY K, BIDDLESTONE A. Treatment of Agricultural Wastewater in Downflow Reed Beds: Experimental Trials and Mathematical Model [J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1998,69(1):63-71.
- [22] CANNON AD, GRAY R, BIDDLESTONE A J,*et al.*SE-Structures and Environment:Pilot-Scale Development of a Bioreactor for the Treatment of Dairy Dirty Water[J].Journal of Agricultural Engineering Research,2000,77(3):327-334.
- [23] PROSNANSKY M, SAKAKIBARA Y, KURODA M. High-Rate Denitrification and SS Rejection by Biofilm-Electrode Reactor (BER) Combined With Microfiltration[J].Water Research,2002,36(19):4801-4810.
- [24] LEE C G, FLETCHER T D, SUN G. Nitrogen Removal in Constructed Wetland Systems [J]. Engineering in Life Sciences,2009,9(1):11-22.
- [25] PENG Z, PENG Y, GUI L,*et al.*Competition for Single Carbon Source Between Denitrification and Phosphorus Release in Sludge Under Anoxic Condition [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering,2010,18(3):472-477.
- [26] ZHAO Y J, LIU B, ZHANG W G,*et al.*Performance of Pilot-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands in Responding to Variation in Influent C/N Ratios of Simulated Urban Sewage [J]. Bioresource Technology,2010,101(6):1693-1700.
- [27] PANT H, REDDY K, LEMON E. Phosphorus Retention Capacity of Root Bed Media of Sub-Surface Flow Constructed Wetlands [J]. Ecological Engineering,2001,17(4):345-355.
- [28] MARTÍN M, GARGALLO S, HERNÁNDEZ-CRESPO C,*et al.* Phosphorus and Nitrogen Removal From Tertiary Treated Urban Wastewaters by a Vertical Flow Constructed Wetland [J]. Ecological Engineering,2013,61:34-42.
- [29] LEE D S, JEON C O, PARK J M. Biological Nitrogen Removal With Enhanced Phosphate Uptake in a Sequencing Batch Reactor [J]. Water Research,2001,35(16):3968-3976.
- [30] CARVALHO G, PAULO C, OEHMEN A,*et al.*Denitrifying Phosphorus Removal;Linking the Process Performance With the Microbial Community Structure [J]. Water Research,2007,41(19):4383-4396.
- [31] CHEN Y, GUERRA H B, MIN K S,*et al.*Operation of the Vertical Subsurface Flow and Partly Submersed Stormwater Wetland With an Intermittent Recycle [J]. Desalination and Water Treatment,2012,38(1/2/3):349-359.

作者简介:杜新(1990—),男,安徽合肥人,硕士生,主要研究方向为水体污染控制。E-mail:duxin2008@sohu.com

(责任编辑:陈昕)