

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.06.018



潜流式人工湿地消纳城市污水厂尾水 微生物特性及机制

胡林潮^{1,2}, 周新程¹, 邓文¹, 陈萍¹, 陈晶¹, 张文艺¹

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州, 213164; 2. 常州市环境科学研究院, 江苏 常州, 213022)

摘要:为揭示潜流式人工湿地消纳城市污水厂尾水微生物特性及机制,以位于常州市城北污水处理厂内的潜流式人工湿地消纳城市污水厂尾水旁路试验系统中的植物根系、湿地填料及湿地土壤中微生物为研究对象,通过镜检、脲酶、磷脂脂肪酸(PLFA)等分析手段对其进行相关研究。结果表明,植物根系、填料中含有团藻等菌胶团和轮虫、变形虫等原生动物,团藻等菌胶团通过自身新陈代谢及光合作用,利用尾水中N、P进行生物代谢,去除低碳源条件下尾水中的N、P等。湿地脲酶平均含量(N)约为22.43 mg/g,其活性与TN的去除呈线性相关,活性越高,TN去除率越高。消纳城市污水厂尾水湿地填料中饱和脂肪酸(PLFA)含量为99.30%,不饱和脂肪酸含量仅为0.70%,这与潜流式人工湿地处理城市污水中的PLFA含量有很大差别(分别为76.97%、23.03%)。以脂肪酸生物标记量为指标,显示湿地填料中形成了以好养细菌为优势种群的微生物生态结构。团藻、好氧微生物是低碳源尾水中TN等污染物去除的主要载体微生物。

关键词:尾水; 磷脂脂肪酸; 脲酶; 人工湿地

中图分类号:X701 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)06-0135-07

Characteristics and mechanism of micro-organisms with subsurface flow wetland consumptive municipal sewage treatment effluents

Hu Linchao^{1,2}, Zhou Xincheng¹, Den Wen¹, Chen Ping¹, Chen Jing¹, Zhang Wenyi¹

(1. School of Environment & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, P. R. China;
2. Changzhou Academy of Environmental Science, Changzhou 213022, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: The micro-organisms of plant roots, wetland filler and wetland soil of subsurface flow wetland consumptive municipal sewage treatment plant effluents bypass test systems, in Changzhou City, north of the city sewage treatment plant, were studied through microscopic examination, urease, phospholipid fatty acid (PLFA) and other analytical tools for related studies to reveal the characteristics and mechanism of

收稿日期:2016-03-09

基金项目:“十二五”国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012zx07301-001);国家自然科学基金(41571471);常州市和武进区科技支撑项目(CE20155061、WS201521)

作者简介:胡林潮(1983-),男,博士,主要从事土壤污染治理及水污染治理研究,(E-mail)172542255@qq.com。
张文艺(通信作者),男,博士,教授,(E-mail)zwy@cczu.edu.cn。

Received:2016-03-09

Foundation item: National Major Science & Technology Program for Water Pollution Control and Management (No. 2012zx07301-001); National Natural Science Foundation of China (No. 41571471); Science and Technology Project of Changzhou City and Wujin District (No. CE20155061, WS201521)

Author brief: Hu Linchao(1983-), PhD, main research interests: remediation studies of contaminated soil and wastewater, (E-mail)172542255@qq.com.
Zhang Wenyi(corresponding author), PhD, professor, (E-mail)zwy@cczu.edu.cn.

micro-organisms with Subsurface Flow Wetland consumptive municipal sewage treatment plant effluents. The results showed that plant roots, filler contained rotifers, amoeba and other protozoa and Volvox, Volvox used the N, P and other pollutant of tail waters through photosynthesis biological metabolism, removal of N, P, etc, under conditions of low-carbon. The average content of wetland urease(N) was about 22.43 mg/g, the activity of urease was linearly related to the removal of TN, the higher the activity, the higher the removal rate of TN. Saturated fatty acid (PLFA) content was 99.30%, unsaturated fatty acid content was only 0.70% in Wetland fillers, which with subsurface flow wetland treatment PLFA contents of municipal sewage is very different (76.97% and 23.03%, respectively). The amount of fatty acid biomarker as an indicator, reveal wetlands matrix formed with aerobic bacteria was dominant structure of microbial ecology. Volvox, aerobic microorganisms was the main carriers of microbial removal of TN and other pollutants in low carbon source tail water.

Keywords: sewage effluents; phospholipid fatty acid; urease; constructed wetland.

潜流式人工湿地生态消纳城市污水厂尾水技术近年来在中国南方地区一些污水处理厂提标改造中得到应用,该技术主要通过湿地基质、湿地植物、微生物的协同作用对污水厂尾水进行消纳^[1-4]。由于城市污水厂尾水碳含量低,总氮及硝酸盐氮含量较高,C、N、P 营养比约为 54:17:1,难以达到传统生物法处理城市污水微生物所需 C、N、P 营养比 100:5:1。这种基于湿地填料多因素协同作用下的尾水生态消纳,其微生物特性与传统潜流式人工湿地处理城市污水可能存在差异。有关湿地土壤层微生物特性的研究已有报道,崔伟等^[5]通过对湿地脲酶活性的测定有可能建立衡量湿地去除效果的模式体系,且得出湿地脲酶活性与 TN 去除率呈正相关性;Sanz-Cobena 等^[6]研究表明土壤有机氮转化为无机氮的强度可用脲酶活性来反映,脲酶活性是评价氮素转化机制的指标之一;王震宇等^[7]通过 DAPI 染色法、FDA 染色法和稀释平板法发现黄河三角洲退化湿地微生物数量、活性及多样性与土壤盐度呈显著负相关;Richard 等^[8]通过 PLFA 谱图研究发现真菌在低肥力的土壤生化过程中发挥重要作用。

潜流式人工湿地主要通过湿地微生物消纳城市污水厂尾水,对尾水有一定的脱氮除磷效果,在中国已有应用^[9],但在低碳源条件下对湿地微生物的研究报道相对较少。本研究以潜流式人工湿地消纳城市污水厂尾水为试验研究对象,通过镜检湿地介质(填料、底泥土壤、植物根系等)中的生物膜,检测湿地土壤脲酶活性和磷脂脂肪酸(PLFA)指标,揭示低碳源、高总氮、高硝酸盐氮条件下潜流式人工湿地微生物功能、活性、多样性和群落结

构等方面特性。

1 材料与方 法

1.1 尾水消纳旁路试验系统及其运行效果

试验地点为江苏省常州市城北污水处理厂内,如图 1 所示。

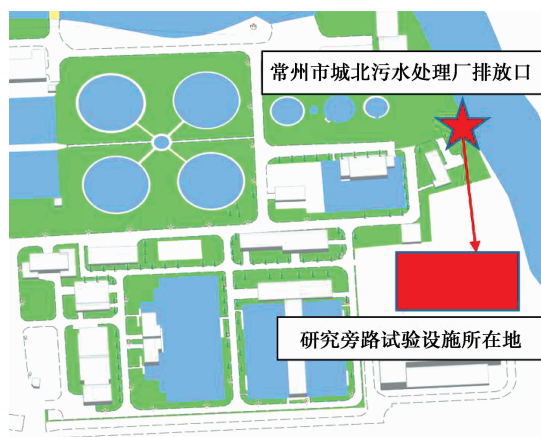


图 1 湿地旁路试验建造点

Fig. 1 The construction site of wetland bypass test

人工湿地剖面如图 2 所示。湿地呈长方体结构,宽(B)2.0 m,总长(L)8.0 m,深(H)1.5 m。其中进水池长(L_1)0.5 m,调节池长(L_2)0.5 m,人工湿地主体长(L_3)6.0 m,沉淀池长(L_4)0.5 m,集水池长(L_5)0.5 m,孔隙率 40%,有效容积 9.6 m³,日处理水量为 5~8 m³,水力负荷 0.31~0.50 m³/(m²·d)。尾水依次流过湿地进水池、调节池、湿地主体,最后进入收集池,通过管道输送至尾水排放口。通过流量计和调节阀控制进水流量。湿地内部采用石灰石、钢渣、陶粒、红砖作为湿地填料,充填高度 1.2 m,填料上部铺设无纺布,再在无纺布上层铺 0.25 m 厚

土壤,种植黄花鸢尾、菖蒲、美人蕉、梭鱼草等挺水植物,无纺布可以阻断土壤下渗到湿地填料中堵塞湿地,同时,无纺布具有透水性,不会阻断水流,植物的根系也可以穿透无纺布向下伸展。

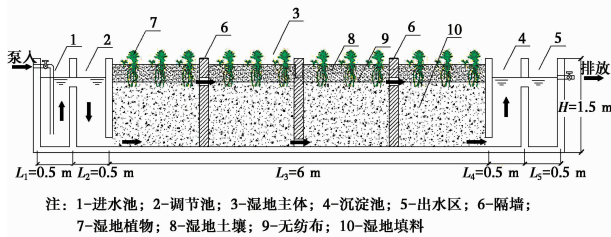


图2 湿地旁路试验设施工艺剖面图

Fig. 2 The sectional view of wetland bypass test facility processes

试验土建工程于2013年12月开工,2014年1月进行管道安装,2月正式运行。经18个月连续运行,除TN外,可使消纳尾水的COD、NH₃-N、TP等指标由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B排放标准,降解达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)V类水质要求(表1所示)。

表1 湿地旁路试验运行效果

Table 1 The running effect of wetland bypass test

水质理化指标	进水浓度/ (mg·L ⁻¹)	出水浓度/ (mg·L ⁻¹)	平均去除率/%
COD	29.08~42.40	22.53~32.86	22.52
NH ₃ -N	0.88~1.04	0.67~0.80	23.86
TN	9.58~12.36	6.95~8.97	27.45
TP	0.52~0.61	0.38~0.40	30.67
SS	16~20	14~16	16.25
DO	2.0~4.0	2.0~3.0	

1.2 样品采集

1)微生物镜检样品的采集,使用灭菌后的玻璃采样仪器,用镊子和小刀刮取湿地介质填料和植物根系表面的生物膜,制作载玻片,并立即分析。

2)中试湿地土壤的采集:1)中试脲酶活性土壤的样品采集,从2014年7—11月之间每月采集一次,土壤采集深度20 cm,分别采集湿地前端、中部、后端的土壤样品,样品前端、中部、后端分别平行设置3个点,分析土壤为3个采集点的混合土壤,土壤采集后,自然风干;2)中试湿地磷脂脂肪酸土壤的样

品采集,于2014年11月份采集,采集深度为20 cm,湿地中均匀设置前中后3个采集点,分析样品为3个采集点的混合样品。土壤采集后冷冻于-20℃冰箱,分析测定时取用。

1.3 检测方法

1.3.1 微生物镜检 生物相镜检采用XDS200PH倒置生物显微镜观测,生物相识别参考《环境微生物图谱》^[10]。

1.3.2 土壤脲酶活性检测 湿地土壤的脲酶活性采用奈氏比色法测定^[11-12],具体方法为:称取5 g风干后的土壤样品,放置于100 L锥形瓶中。加入10 mL pH 6.7的磷酸缓冲液和0.5 mL甲苯,摇匀,混合处理15 min。再加入10 mL 10%尿素溶液(对照以水代替),置于37℃恒温培养箱培养48 h。培养结束后,加入20 mL的1 mol/L KCl,震荡摇匀10 min。将混合液通过滤纸过滤,吸取0.1 mL滤液置于25 mL比色管中,用蒸馏水稀释至10 mL,摇匀,加入4 mL的1 mol/L NaOH,显色,稀释至25 mL刻度处。静置10 min,以空白样品作对照,在波长460 nm处测定其吸光度。

1.3.3 磷脂脂肪酸的测定 磷脂脂肪酸(PLFA)测定,参照Bligh法^[13-14]以及本课题组论文^[15],主要测试步骤为:①脂肪酸的提取;②PLFA的分离;③PLFA的甲酯化;④PLFA样品的提取和测定。待测样品用GSMS-QP2010气相色谱质谱联用仪分析,色谱柱为DB-5-MS(30 m × 250 μm × 0.25 μm)毛细管柱,氦气作为载气,不分流进样,扫描方式:SIM。

2 结果与讨论

2.1 湿地微生物镜检

采用倒置生物显微镜对湿地植物根系和湿地填料进行镜检,结果如图3所示。其中,(a)是湿地植物根系在倒置显微镜下拍摄出的图片,可以看出植物根系有生物膜菌胶团等少量微生物附着在其表面。(b)为湿地出水口处土壤中镜检出的团藻。(c)、(d)是湿地填料上镜检出的微生物,分别为轮虫和变形虫等原生动物。人工湿地植物根系具有泌氧作用,有较多好氧微生物附着在植物根系上,同时,填料表面也是微生物附着的地方,由于填料比表面积较大,填料和植物根系能够截留尾水中的污染物,微生物以这些污染物为食,并同化为自身的一部分,从而降解尾水中的污染物。同时,湿地

出水口处发现有团藻,说明在低碳源条件下,团藻通过光合作用,利用尾水中的 N、P 等污染物进行生物代谢,从而实现低碳源条件下对尾水中 N、P 的去除。

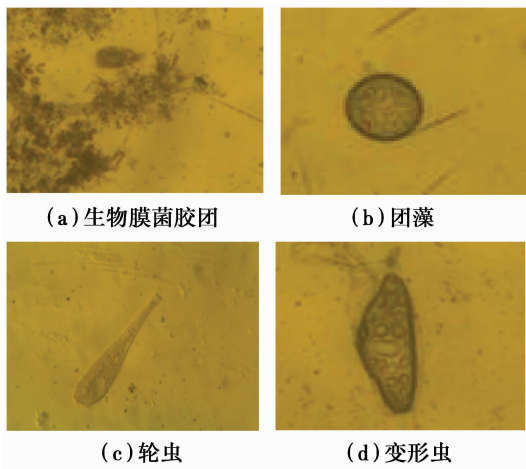


图3 湿地微生物镜检

Fig. 3 The examination of wetland microbial microscopic

2.2 湿地土壤脲酶活性

脲酶是湿地土壤中氮转换的关键酶,其作为一种生物催化剂,能促进尾水中含氮有机物的分解,同时,脲酶活性可作为湿地对含氮有机污染物净化能力的衡量指标^[16]。表2为2014年7—11月湿地前、中、后端土壤脲酶活性变化情况。从月变化看,湿地脲酶含量从7—10月一直处于增长状态,到10月达到最大,平均脲酶含量(N)为37.01 mg/g,11月有所下降。其中,湿地前端、中部、后端的脲酶含量(N)平均值分别是22.15、24.79和20.35 mg/g。由于尾水碳含量低,总氮及硝酸盐氮含量较高,C、N、P营养比难以达到传统生物法处理城市污水微生物所需营养比条件,导致湿地脲酶活性平均含量(N)为22.43 mg/g,与吴振斌等^[17]研究人工湿地植物根区土壤酶活性与污水净化效果及其相关分析所测得的脲酶活性(N)平均值260 mg/g存在较大差异。

湿地前端和中部的平均脲酶含量高于湿地后端的平均脲酶含量,即湿地前端和中部的脲酶活性高于湿地后端的脲酶活性,脲酶活性大体上沿程下降。湿地系统中氮素和有机质污染物在沿程中被降解,沿着水流方向慢慢减少,从而导致微生物的数量、活性、多样性等降低,脲酶活性也随之降低。这与黄娟等^[18]关于潜流式人工湿地土壤中、上层脲酶活性高于土壤下层脲酶活性的研究结果有一定不同。

表2 湿地植物根区土壤前、中、后端脲酶(N)活性/(mg·g⁻¹)

月份	湿地前端	湿地中部	湿地后端	均值
2014年7月	11.55	9.01	13.00	11.19
2014年8月	10.08	15.89	19.08	15.02
2014年9月	22.23	23.47	14.88	20.19
2014年10月	41.07	36.98	33.00	37.01
2014年11月	25.82	38.59	21.78	28.73
均值	22.15	24.79	20.35	22.43

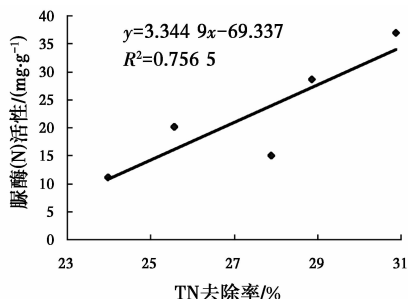


图4 湿地脲酶活性与TN去除率关系

Fig. 4 Relationship between urease activity and TN removal rate in wetland

从图4中可以看出,人工湿地在生态消纳城市污水厂尾水过程中,湿地土壤脲酶活性与TN去除率之间呈正相关性。脲酶能够作为湿地消纳尾水效能的一个重要指标,湿地土壤脲酶活性越高,越有利于湿地微生物的代谢、繁殖,湿地对TN的去除效果越好。其拟合动力学方程式为

$$y = 3.3449x - 69.337$$

$$R^2 = 0.7565, n = 5, P = 0.0553$$

式中: y 为湿地土壤脲酶(N)活性,mg/g; x 为TN去除率,%; R^2 为决定系数,无量纲,其值越接近1,表明拟合效果越好; P 为显著性差异,无量纲;当 $P < 0.05$,表明相关性显著, $P < 0.01$,表明相关性极显著; n 为样本数。

这与邓风等^[19]研究发现潜流湿地土壤脲酶活性与TN的去除率之间存在显著正相关这一结果存在差异。可能由于城市污水厂尾水中TN含量远远低于城市污水中TN含量,导致消纳尾水湿地土壤脲酶活性与TN去除率之间相关性不显著。

2.3 湿地土壤 PLFA

对湿地土壤中提取的PLFA的GC-MS图谱进行分析如下(见表3),表3列出了湿地土壤中的脂肪酸所标记的微生物及其生物标记量等。共检测出

3 种磷脂脂肪酸,且湿地土壤中微生物均为细菌,且好氧细菌占绝大部分并有部分放线菌。其中不饱和脂肪酸 9Me19:0 在湿地土壤中含量为 0.054 nmol/g,含量最少;其次是饱和脂肪酸 i18:0,其含量为 0.271 nmol/g;最多是饱和脂肪酸 17:0,其含量为 0.508 nmol/g。根据 White 等^[20-26]研究得出 PLFA 量和生物量之间存在的转换系数,取 $4 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{pmol}^{-1}$ 推算出饱和脂肪酸 17:0 的生物标记量为 $20.32 \times 10^6 \text{ cell/g}$,指示微生物为好氧细菌;饱和脂肪酸 i18:0 和不饱和脂肪酸 9Me19:0 的生物标记量分别为 $0.22 \times 10^6 \text{ cell/g}$ 和 $10.84 \times 10^6 \text{ cell/g}$,指示微生物都为放线菌。由此可知,运用人工湿地

生态消纳城市污水厂尾水,使得湿地土壤中形成了以好氧细菌为优势种群的微生物生态结构。

运用 PLFA 法检测尾水消纳湿地填料底泥,检测出的脂肪酸种类相对较少、不饱和脂肪酸含量占极少部分以及未检测出真菌、假单胞杆菌、嗜热解氢杆菌等存在,这与尹勇等^[15]运用 PLFA 法研究生态强化法原位净化村镇污水微生物特性的结果存在明显差异。这可能是由于城市污水厂尾水中碳含量低,总氮及硝酸盐氮含量较高,C、N、P 营养比难以达到传统生物法处理城市污水微生物所需营养比条件,导致微生物特性与传统潜流式人工湿地处理城市污水存在以上差异。

表 3 湿地土壤中提取的磷脂脂肪酸

Table 3 Phospholipid fatty acids extracted from wetland soil

序号	脂肪酸种类	脂肪酸	浓度/ (nmol · g ⁻¹)	微生物指示类型	磷脂脂肪酸生物标 记量(10 ⁶)/(cell · g ⁻¹)	含量百分 比/%
1	饱和脂肪酸	17:0	0.508	细菌(好氧细菌) ^[15]	20.32	64.75
2		i18:0	0.271	细菌(放线菌) ^[15,21]	10.84	34.55
3	不饱和脂肪酸	9Me19:0	0.054	细菌(放线菌) ^[15,21]	0.22	0.70

2.4 低碳源条件下的尾水人工湿地消纳微生物作用机制

低碳源条件下,人工湿地对尾水中的污染物降解主要基于以下 3 种途径:

1)由于嗜磷菌在溶解氧小于 2 mg/L 的情况下将会释放,所以污水处理厂尾水的 DO 大多为 2.0~4.0 mg/L。当低碳源的尾水进入潜流湿地时(HRT=20~24 h),除本身含有一定浓度氧外,湿地植物根区根系具有泌氧作用,因此,潜流湿地是一个以好氧环境为主的微生态系统。湿地填料表面及湿地植物根系表面及周围形成了以好氧微生物为主的氧化区域,尾水中有机污染物被好氧微生物利用、降解和分解。

2)具有一定比表面积的石灰石、钢渣、陶粒、红砖构成的湿地填料及其表面生长的微生物膜,通过截留、过滤、吸附等过程消减尾水中的污染物和 SS,表现出水 COD、TN、TP、氨氮及 SS 的同步降低。尾水中 COD 含量低、总氮及硝酸盐氮含量较高,氮主要通过湿地填料表面的微生物膜硝化和反硝化作用以及氨的挥发等过程被去除,湿地填料间隙和植物根系之间能够形成多个好氧—厌氧微区域,湿地微生物能够利用这些微区域对尾水中的氮进行硝化和反硝化作用,从而降解、转化尾水中的氮素。尾水

中磷的去除途径是通过微生物对磷的同化吸收以及自然沉降、填料吸附等,由于湿地植物的光合作用和呼吸作用的进行,交替出现了好氧和厌氧环境,使得微生物对磷的同化作用更易进行。

3)由于湿地系统是一个有氧生态系统,其中生长有一定数量的藻类微生物,其对湿地系统的脱氮、除磷也有一定的贡献。藻类微生物(如团藻)可能通过光合作用或自身新陈代谢作用,利用尾水中的 N、P 等污染物进行生物代谢,从而实现低碳源条件下对尾水中 N、P 的去除。

3 结论

潜流式人工湿地消纳城市污水厂尾水的湿地系统是好氧生态系统,PLFA 揭示该系统中形成了以好氧细菌为优势种群的微生物生态结构。湿地填料和植物根系表面生物膜及悬浮团藻,能同化植物根系和湿地填料截留下的污染物质,降解尾水中的污染物;低碳源条件下,团藻、好氧微生物是低碳源尾水中 TN 等污染物去除的主要载体微生物;湿地脲酶活性与 TN 的去除呈线性相关,活性越高,TN 去除率越高;一定的溶解氧浓度水平和脲酶活性是湿地消纳尾水调试及运行重要控制指标。本研究对潜流式人工湿地消纳城市污水厂尾水微生物特性及机

制的研究有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 付国楷,王敏,张智,等.人工湿地用于污水深度处理的反应动力学[J].土木建筑与环境工程,2012,34(4):111-117.
FU G K, WANG M, ZHANG Z, et al. Reaction kinetics of three types of constructed wetland for advanced domestic wastewater treatment [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2012, 34 (4):111-117. (in Chinese)
- [2] 张文艺,陈晶,邓文,等.反硝化聚磷菌菌剂种子液制备条件及除磷机理[J].土木建筑与环境工程,2014,36(6):99-105.
ZHANG W Y, CHEN J, DENG W, et al. Preparation of denitrifying phosphorus accumulating bacterial seed liquid and analysis of phosphorus removal mechanism [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2014, 36(6):99-105. (in Chinese)
- [3] 何强,万杰,翟俊,等.复合型人工湿地及其在小城镇污水处理中的应用[J].土木建筑与环境工程,2009,31(5):122-126.
HE Q, WAN J, ZHAI J, et al. The compound artificial wetland and its application in treating wastewater in small cities and towns [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2009, 31 (5): 122-126. (in Chinese)
- [4] 唐世敏,秦庆东,钱元弟,等.水平潜流人工湿地处理住宅灰水技术研究[J].土木建筑与环境工程,2013,35(Sup2):146-150.
TANG S M, QIN Q D, QIAN Y D, et al. A study of residential grey water treated by subsurface horizontal constructed wetland [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2013, 35(Sup2): 146-150. (in Chinese)
- [5] 崔伟,张勇,黄民生.复合垂直流人工湿地脲酶和磷酸酶活性与黑臭河水净化效果[J].安徽农业科学,2011,39(13):8016-8018.
CUI W, ZHANG Y, HUANG M S. Activities of urease and phosphatase in integrated vertical flow constructed wetland and purification effect of black and odorous river [J]. Journal of Anhui Agriculture, 2011, 39(13): 8016-8018. (in Chinese)
- [6] SANZ-COBENA A, MISSELBROOK T H, ARCE A, et al. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions [J]. Agriculture, Ecosystems Environment, 2008, 126 (4): 243-249.
- [7] 王震宇,辛远征,李锋民,等.黄河三角洲退化湿地微生物特性的研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2009,39(5):1005-1012.
WANG Z Y, XIN Y Z, LI F M, et al. Microbial community characteristics in a degraded wetland of the yellow river delta [J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2009, 39 (5): 1005-1012. (in Chinese)
- [8] BARDGETT R D, LOVELL R D, HOBBS P J, et al. Seasonal changes in soil microbial communities along a fertility gradient of temperate grasslands [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31: 1021-1030.
- [9] 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,2011,27(3):8-11.
GU X K, WANG G X, LIU B, et al. Advanced purification of effluent from sewage treatment plant by integrated vertical-flow constructed wetland [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(3): 8-11. (in Chinese)
- [10] 马放,杨基先,魏利.环境微生物图谱[M].北京:中国环境科学出版社,2010.
- [11] 黄娟,李祺,张健.改良靛酚蓝比色法测土壤脲酶活性[J].土木建筑与环境工程,2012,34(1):102-107.
HUANG J, LI Z, ZHANG J. Improvement of indophenol blue colorimetric method on activity of urease in soil [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2012, 34 (1): 102-107. (in Chinese)
- [12] 许光辉,郑洪元.土壤微生物分析方法手册[M].北京:农业出版社,1986.
- [13] KOURTEV P S, EHRENFELD J G, HÄGGBLÖM M. Exotic plant species alter the microbial community structure and function in the soil [J]. Ecology, 2002, 83 (11): 3152-3166.
- [14] JOHANSEN A, OLSSON S. Using phospholipid fatty acid technique to study short-term effects of the biological control agent *Pseudomonas fluorescens* DR54 on the microbial microbiota in barley rhizosphere [J]. Microbial Ecology, 2005, 49(2): 272-281.
- [15] 尹勇,冯国勇,周静,等.生态强化法原位净化村镇污水微生物特性[J].环境化学,2015,34(4):792-797.
YIN Y, FENG G Y, ZHOU J, et al. Microbial characteristics of in-situ strengthening bioremediation of rural domestic sewage [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(4): 792-797. (in Chinese)
- [16] 王国芳,吴磊,徐雪玲,等.蚯蚓对垂直流人工湿地微生物量及脲酶活性的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40(5):1013-1018.

- WANG G F, WU L, XU X L, et al. Influence of *Eisenia foetida* on biomass and urease activity in vertical constructed wetland [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2010, 40(5): 1013-1018. (in Chinese)
- [17] 吴振斌, 梁威, 成水平, 等. 人工湿地植物根区土壤酶活性与污水净化效果及其相关分析[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(5): 622-624.
- WU Z B, LIANG W, CHENG S P, et al. Studies on correlation between the enzymatic activities in the rhizosphere and purification of wastewater in the constructed wetland [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(5): 622-624. (in Chinese)
- [18] 黄娟, 王世和, 鄢璐, 等. 潜流型人工湿地的脲酶活性分布特性[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2008, 38(1): 166-169.
- HUANG J, WANG S H, YAN L, et al. Distribution characteristic of urease activity in subsurface constructed wetlands [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2008, 38(1): 166-169. (in Chinese)
- [19] 邓风, 童宁. 潜流人工湿地经济植物根际微环境相关指标的研究[J]. *工业安全与环保*, 2014, 40(12): 8-11.
- DENG F, TONG N. Study on relative indicators of rhizosphere micro-environment of economic plants in the subsurface-flow constructed wetlands [J]. *Industrial Safety and Environment Protection*, 2014, 40(12): 8-11. (in Chinese)
- [20] WHITE D C, FLEMMING C A, LEUNG K Y, et al. In situ microbial ecology for quantitative assessment, monitoring and risk assessment of pollution remediation in soils, the subsurface, the rhizosphere and in biofilms [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 1998, 32(2): 93-105.
- [21] 张燕, 周巧红, 张丽萍, 等. 冬季湿地植物根际微生物群落结构多样性分析[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(11): 108-111.
- ZHANG Y, ZHOU Q H, ZHANG L P, et al. Analysis on rhizo-sphere microbial diversity of wetland plants in winter [J]. *Environment Science & Technology*, 2013, 36(11): 108-111. (in Chinese)
- [22] WHITTAKER P, DAY J B, CURTIS S K, et al. Evaluating the use of fatty acid profiles to identify *Francisella tularensis* [J]. *Journal of Microbiology Methods*, 2007, 90(2): 465-469.
- [23] 陶敏, 贺锋, 徐洪, 等. 氧调控下人工湿地微生物群落结构变化研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(6): 1195-1202.
- TAN M, HE F, XU H, et al. Changes in microbial community structure in constructed wetland under aeration condition [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6): 1195-1202. (in Chinese)
- [24] SAKAMOTO K, LIJAMA T, HIGUCHI R. Use of specific phospholipid fatty acids for identifying and quantifying the external hyphae of the arbuscular mycorrhizal fungus *Gigaspora rosea* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(11): 1827-1834.
- [25] KIMURA M, ASAKAWA S. Comparison of community structures of microbiota at main habitats in rice field ecosystems based on phospholipid fatty acid analysis [J]. *Biology and Fertility Soils*, 2006, 43(1): 20-29.
- [26] 温强, 王晓燕. 北京城市湖泊沉积物中微生物磷脂的分布特征[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(3): 80-85.
- WEN Q, WANG X Y. The Vertical distribution of sedimentary microbial biomass on urban lake in Beijing [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, 33(3): 80-85. (in Chinese)

(编辑 郭飞)