

人工湿地外加碳源碳溶出及反硝化效果研究

王勇 张宝莉* 刘灏 程鸿宇 吴文良

(中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

摘要 为了解人工湿地中固体外加碳源的碳溶出规律及添加量对反硝化效果的影响,本研究选择竹子、木块和木本泥炭作为外加C源材料,在厌氧下测定3种材料的碳溶出量,同时应用于人工湿地中试试验,为人工湿地外加碳源的应用提供依据。结果表明:单位质量的试验材料C的溶出量是竹子>木块>木本泥炭,竹子、木块和木本泥炭的C溶出量均值分别达577.266和59 mg/(kg·d);材料C溶出量随时间变化的回归曲线拟合度较高,溶出稳定。人工湿地中试试验中,添加62 kg木块为外加碳源时的湿地系统对总氮和铵氮的去除率明显高于添加31 kg木块的湿地系统。溶出试验中木块作为人工湿地反硝化脱氮的外加碳源材料促进了人工湿地对氮的去除。

关键词 人工湿地;反硝化脱氮;外加碳源;碳溶出

中图分类号 X703

文章编号 1007-4333(2017)05-0137-07

文献标志码 A

Research on the dissolution of extra carbon source and denitrification effect in the constructed wetlands

WANG Yong, ZHANG Baoli*, LIU Hao, CHENG Hongyu, WU Wenliang

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract The aim of this study was to investigate the carbon (C) dissolution regularities of solid C source and the effects of additional C on denitrification in constructed wetland (CW). Bamboo, wood chips, and woody peat were selected as additional C sources to test C dissolution under anaerobic condition and be used in CW for primary testing to provide application basis. The results showed that: the amount of unit mass materials C dissolution was: bamboo>wood chips>woody peat; The average C dissolution was 577.266 and 59 mg/(kg·d), respectively; The regression equation of C dissolution rate with time showed the fitting of higher degree, while the C dissolution was stabilized. The testing system with additional 62 kg wood chips displayed the higher total nitrogen and ammonium removal rate than the system with additional 31 kg C. In conclusion, it is found that the application of wood chips as CW denitrification extra C materials promoted nitrogen removal.

Keywords constructed wetlands; denitrification remove nitrogen; external carbon source; carbon dissolution

人工湿地系统是模拟自然湿地,根据需求建造的污水处理系统^[1-4]。因具有低投资、低耗能、运行费用低、氮磷去除率高、占地面积少、与自然景观相协调等优点,在国内外得到广泛应用^[5-6]。

人工湿地系统对各种污染物的去除是湿地植物、填料和微生物通过物理、化学及生物的协同作用的结果。人工湿地系统对氮的去除途径包括沉积、氨氮挥发、基质吸附、植物吸收以及微生物的氨化、

硝化和反硝化作用等^[7-9]。植物除氮在氮素去除中占的比例,不同研究者给出不同研究结果,垂直流湿地植物贡献大约50%的总氮去除^[10]。反硝化脱氮的方式有很多种,反渗透、离子交换、化学吸附和生物反硝化等等都是常见的方式^[11],生物脱氮被认为是经济且环保的技术^[12]。反硝化过程除受氮素限制外,碳源供给也很重要,将垂直流湿地污水回流并向系统投加甲醇,总氮去除率可从58%提高到

收稿日期: 2016-03-04

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2011DFG93510)

第一作者: 王勇,博士研究生, E-mail: wangwy6666@sohu.com

通讯作者: 张宝莉,副教授,主要从事污水处理及环境管理研究, E-mail: baoli@cau.edu.cn

89%，增加碳源供给，改变填料结构等促进反硝化过程，可以提高氮素去除率^[13]。

人工湿地反硝化能力受抑制的主要因素是碳源的缺乏^[14-15]，因此碳源是湿地系统氮去除的关键限制因子^[16]，污水中碳氮比偏低时，需要考虑使用外加碳源提供反硝化电子供体^[17]。

目前国内外学者通过向进水中投加葡萄糖、甲醇、乙醇、乙酸等^[13-14, 17-20]等液态有机碳解决碳源不足的问题。以液态有机物作为碳源时，由于进水水质的波动，会造成出水中含有多余的液体碳源，从而增加了后续处理的难度^[13]。近年来越来越多的研究者选择使用固态有机物作为外加碳源去除水中的硝酸盐。目前研究应用的固体外加碳源材料有秸秆、千屈菜植物、棉花、芦苇、报纸以及树皮等，实现对氮的有效去除^[15, 21-25]。

目前的研究主要集中在外加碳源对反硝化脱氮效果的研究，很少有学者发表关于各类固体碳源的碳溶出规律方面的研究成果，本研究通过对竹子、木块和木本泥炭3种碳源材料溶出量的研究，分析其溶出规律，分析其作为人工湿地外加C源的可行性，以期为人工湿地反硝化脱氮外加C源的选择及添加量提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料预处理

选择我国常见竹子、木块材料以及木本泥炭作为外加碳(C)源材料。竹子购于北京市上庄市

场，木块取自北京市房山区农村的杨树，木本泥炭取自生产木本泥炭的公司。将木块去皮，3种材料洗净、晾干备用。整个试验使用同一次采购的一批材料。

人工湿地中外加C源，应用上述同样的木块。

1.2 试验装置

1) 碳溶出试验

试验在室内实验室进行，用半径为13 cm，高42 cm的圆柱形塑料桶编号为A、B和C；将木块、竹子和木本泥炭处理成长2~3 cm，宽1~2 cm，厚1~2 cm的小块，分别置于A、B和C3个反应容器内，填充高度均为35 cm；并记录各种材料的质量。

2) 人工湿地中试试验

中试人工湿地装置设置在房山区，以生活污水为处理和研究对象。设计了可以调控处理水量和各单元之间可以控制连接的实验装置。装置共设6个相同尺寸的单元，装置由不锈钢制成箱体并于表层涂有防锈漆，打孔的PVC隔板装在箱底，隔板与底层留有15 cm汇水层，长、宽、高为90、70和70 cm。第1处理单元高出地面，形成到第2单元的自流，第2单元出水通过蠕动泵输送到第3单元的3a或3b，第3单元出水再进入到第4单元的4c或4d。

厌氧单元(第3单元)为氮的反硝化而设计，采用底层向上布水，淹水装置。单元3中添加不同量的木块作为反硝化脱氮的外加碳源材料，添加木块的量为装置3a:62 kg木块；装置3b:31 kg木块。各单元连接及中试试验的装置照片见图1。



图1 中试试验装置

Fig. 1 The photo of pilot experiment equipment

1.3 试验安排

固体碳源的溶出原理有多种，常见的为水解、微生物分解等。本试验设计用自来水浸泡，每天定时换水的方式运行，试验测定各种材料是否可溶出碳以及其溶出量。设计水力停留时间HRT为24 h，采用自来水为试验用水，在厌氧浸泡的环境下定时

取样，测定浸泡液中的COD含量。试验分2个阶段，第一阶段每天取样，分析其溶出规律，溶出稳定后，进入第二阶段，此阶段每周取样。

试验试运行1个月以后开始取样，每周取样一次，测定各单元出水水质。采样是按照不同单元的水力停留时间分别取各单元出水监测水质，尽量保

证污水的同一性。

1.4 分析方法

C溶出试验：随时测定水温，水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 膜过滤，重铬酸盐法测定 COD。

人工湿地中试试验：总氮(TN)：过硫酸钾氧化-紫外分光光度法，铵态氮：流动分析仪，硝态氮：流动

分析仪。

2 结果与分析

2.1 C溶出试验初期 COD 变化

HRT 为 24 h 的条件下进行试验，试验初期结果如图 2 所示。

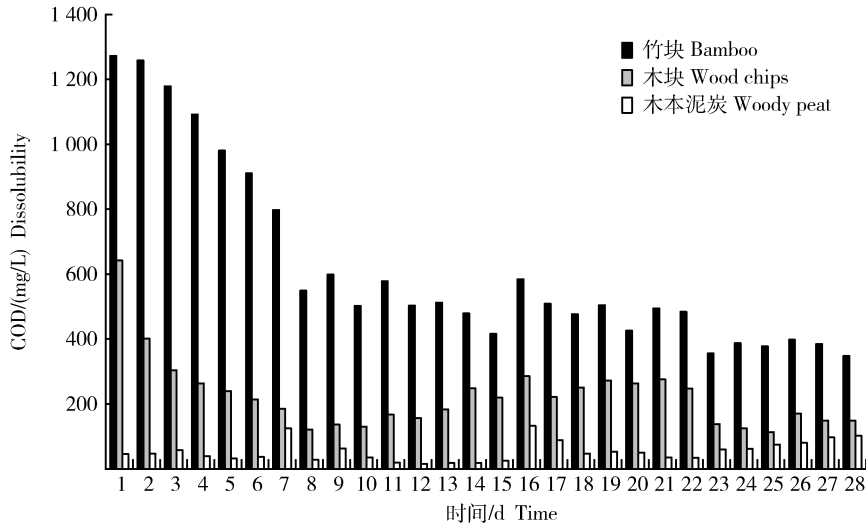


图2 试验初期3种材料溶出的COD浓度

Fig. 2 COD concentration of dissolution 3 kinds of materials in the initial stage of experiment

竹子前 7 d 溶出 COD 的量最高，浓度从 1 272 mg/L 下降至 798 mg/L，之后趋于平稳，浓度在 450 mg/L 上下波动；木块溶出的 COD 量中等，浓度由 642 mg/L 降低至 7 d 的 185 mg/L，之后质量浓度为 121 ~ 286 mg/L，这与 Volokita 等^[19]以报纸和棉花作为反硝化碳源碳源在实验室条件下研究的溶解性有机碳的变化规律初期出水浓度较高，之后迅速降低并维持在一个较低浓度范围内结果保持一致；木本泥炭呈现出与上述 2 种材料不同的变化趋势，其 COD 浓度一直处于较低且稳定的状态，溶出量约为 54 mg/L。分析以上试验结果可知，3 种材料在试验初期 28 d 内的 C 溶出量已基本稳定。

2.2 3种材料COD的溶出量

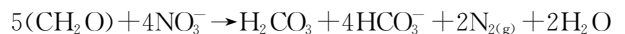
根据试验初期结果可知，各种材料 C 溶出量已基本稳定，这一阶段的试验每周取样，HRT 为 24 h，运行时间共 240 d，测定单位质量的外加碳源材料 C 溶出量，试验结果如图 3 所示。由图可知，3 种材料的 C 溶出量在一定浓度范围内波动，竹子的 C 溶出量最高，均值为 577 mg/(kg·d)，其次为木块，C 溶出量均值为 266 mg/(kg·d)，木本泥炭的 C 溶出量在 3 种材料中的溶出量最低，均值为

59 mg/(kg·d)。

在应用中可根据污水中的氮含量、碳氮比以及试验材料的碳溶出量选择不同的外加碳源材料及添加量，加强人工湿地反硝化脱氮效果，提高人工湿地的氮的去除效率。

2.3 C源添加量计算分析

硝化和反硝化脱氮是人工湿地系统氮去除的一个重要部分，反硝化过程中需要有 C 的参与，其反应过程如下：



其中， CH_2O 代表该过程中催动反应进行的可生物降解的有机物^[26]，C/N 比是反硝化的制约性因素。

污水中较高的 C 含量有利于反硝化脱氮的进行。在人工湿地系统中，由于硝化作用中的耗氧作用，使污水中的 COD 也发生降解而降低，可能会造成后续反硝化作用时的 C/N 比降低，对此人工湿地可以用外加 C 源来满足。如果过多添加 C 源，没有被利用的 C 源会使水体的 COD 升高，增加后续处理的问题，因此适合和适量的添加 C 源在人工湿地的设计中是一个重要参数。

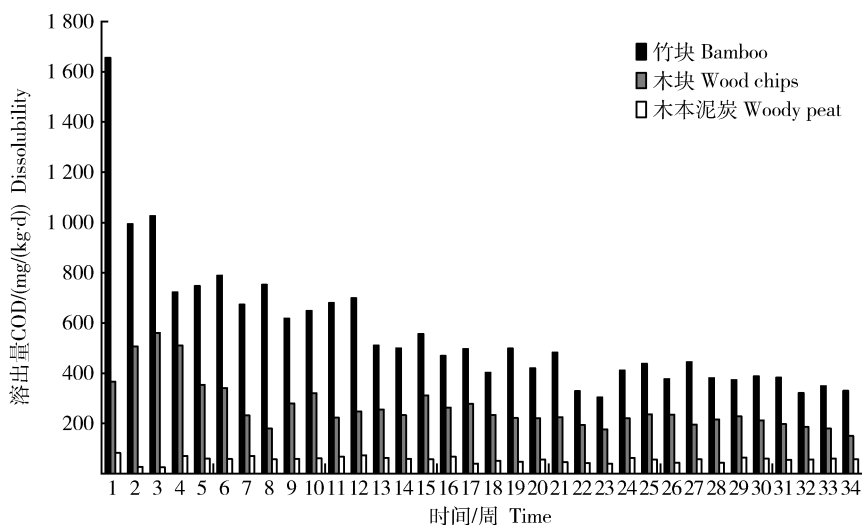
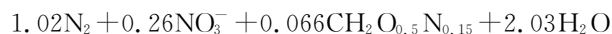
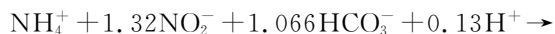
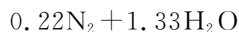
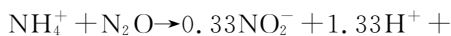


图3 3种材料的C溶出趋势图

Fig. 3 C dissolution trends of the three materials

污水中的氮转化为硝态氮的硝化过程为:



根据^[27]积聚=流入-流出+产生,同时考虑到温度对反应的影响:

$$k_T = k_{20} O^{(T-20)}$$

O:经验所得的温度系数

T:工作水温

在人工湿地的设计中,可以根据污水中的C/N比以及硝化和反硝化的公式,选择合适的外加C源

的材料,计算其适合的添加量。

2.4 人工湿地中外加碳源的中试试验

2.4.1 人工湿地系统的运行参数及处理效果

人工湿地中外加碳源的中试试验采用蠕动泵控制系统的进水量,设计了全自动控制箱,可以手动和自动控制运行时间、运行方式、停运时间、控制原污水的抽取等。人工湿地于2014年9月建成,连续试运行1个月,人工湿地中微生物逐渐驯化,之后开始正式运行取样监测。在进行了不同水力负荷、不同的运行方式和不同木块添加的基质系统组合运行后,得到了各不同组合系统的处理污染物效率。然后按照最佳组合(即1、2、3a、4c)和最佳的运行参数下(水力负荷:0.3(m³/(m²·d)),运行方式:30 min/h),水温:11±1℃下进行运行,运行结果见表1。

表1 中试系统运行参数及效果

Table 1 Parameters and effects of the pilot experiment system operating

污染物指标 Pollutant index	化学需氧量 COD	总氮 TN	总磷 TP	氨氮 NH ₃ -N
进水/(mg/L)	595.5	37.8	2.18	19.4
出水/(mg/L)	34.5	9.2	0.37	3.0
去除率/%	94.2	75.6	83.0	84.7

从表1中看出,在设定的运行条件下,湿地系统对COD、TN、TP和NH₃-N的去除效果较好。污水COD进水质量浓度为438~764 mg/L,出水COD

质量浓度为30.3~41.0 mg/L;TN进水质量浓度为12.9~108 mg/L,出水质量浓度为0.05~17.4 mg/L。

2.4.2 添加 C 源后系统对污染物的去除分析

1)不同 C 源添加量的系统对污染物的去除分析

本研究选择了木块作反硝化的外加碳源,不同添加量单元是 3a 和 3b,运行系统 I (由单元 1、2、3a、4a 组成)和系统 II (由单元 1、2、3b、4a 组成),人工湿地系统在水力负荷为 0.3 m/d,水温为 11±1℃ 下运行,监测不同组合系统 I 和系统 II 对污染物的去除效果,结果见表 2。

表 2 的结果表明,添加 62 kg 木块的系统 I 比

添加 31 kg 木块的系统 II 对 N 和 C 污染物的去除效果好,添加木块作为人工湿地反硝化脱氮的外加碳源促进了系统对氮的去除。经过数据统计分析,2 种不同木块添加量(31 和 62 kg)下系统的总氮平均去除率分别为 54.0 %、71.4%,经过单因素方差分析,不同投加量下 TN 去除率差异性极显著($P < 0.01$),进一步进行最小显著差法(LSD)两两比较发现添加 31 和 62 kg 的系统之间差异性显著($0.01 < P < 0.05$)。

表 2 系统 I 和系统 II 对污染物的去除率

Table 2 System I and system II to the removal rate of pollutants %

污染物指标 Pollutant index	化学需氧量 COD	氨氮 NH ₃ -N	总氮 TN	总磷 TP
湿地 I 系统	94.3	86.4	71.4	84.3
湿地 II 系统	93.6	79.9	54.0	87.5

2 组试验结果表明木块的添加量增加了一倍,但是整个系统的出水 COD 没有增加,说明单元 4 起到了处理单元 3 中剩余的 COD 的作用。

2)添加碳源对系统 N 的去除分析

据研究表明,反硝化去除 1 kg NO₃⁻-N 需消耗 COD 2.86 kg,实际上反硝化需要的含 C 量往往高于理论值,最佳的 C/N 比为 3~4^[28-29];也有研究表明 C/N 至少为 5 才能保证系统高效的进行反硝化作用^[30],而有研究认为如果要想达到同时脱氮除磷,则 TCOD/TKN 至少要在 9 以上^[31]。

以 2015 年湿地系统的数据为依据进行分析,原污水平均 COD/TN 比为 15.2,其 COD/TN 为 4.0~33.5。系统中原污水经过单元 1、单元 2 好氧单元的作用,污水中的 COD 发生降解,到达单元 3 时 COD/TN 会进一步降低,本试验中到达单元 3 前污

水中的 COD 通过耗氧作用平均降低到 118.9 mg/L, COD/TN 最低达到 0.93。

为提高北方人工湿地不依靠植物除氮的效果,本研究在系统中添加木块为外加 C 源来提高污水中的碳氮比以提高厌氧单元的反硝化作用,从表 2 的结果可以看出外加碳源促进了系统对氮的去除。表 3 为添加不同量木块的单元 3a、3b 对 TN 的去除结果。

试验在系统 I、系统 II 中单元 3a(添加 62 kg 木块)、单元 3b(添加 31 kg 木块)中添加了不同量的木块,假设湿地系统的木块与碳溶出试验中木块 COD 溶出量相同,根据碳溶出试验结果(用后百天的平均值 219.3 mg/kg)计算可知(表 3),添加 62 kg 木块可以使单元 3a 中的 COD/TN 从 0.93 上升到 1.85,单元对 TN 的去除率为 64.3%;添加 31 kg 木

表 3 添加不同量木块的单元 3a、3b 对 TN 的去除

Table 3 The removal of TN with added wood chips in unit 3a、3B

不同添加量的单元 Unit with different added amount	单元 3a Unit 3a		单元 3b Unit 3b	
	进水 Inflow water	出水 Effluent water	进水 Inflow water	出水 Effluent water
	COD/(mg/ L)	33.5	52.0	36.0
TN/(mg/ L)	36.1	12.9	35.1	18.0
COD/TN	0.93	—	1.03	—
添加木块后 COD/TN	1.85	—	1.50	—
TN 的去除率/%	64.3	48.7		

块可以使单元 3b 中的 COD/TN 从 1.03 上升到 1.50, 单元对 TN 的去除率为 48.7%。

分析可知, 木块中溶出的碳可以提高污水中的 C/N 比, 提高系统对污水中氮的去除, 在本试验中, 系统 I 中厌氧单元 3a(添加 62 kg 木块)的 COD/TN 提高到 1.85, 可以使整个系统对 TN 的去除率达到 71.4%。

根据高景峰等研究表明随着 COD/TN 的升高, 总氮去除率由 67%(COD/TN=1.63) 逐渐上升至 93.6%(COD/TN=8.43); 但是当 COD/TN 超过 8.43 后, 总氮去除率提高的并不明显^[32]。

从结果中也可以看出, 单元 3 的出水 COD 浓度有所增高是添加木块溶出的未被 N 反硝化利用的多余的 COD, 其在单元 4 中将进一步被处理。因此, 虽然 COD/TN 提高越多, 其反硝化效果还会提高, 从整个系统上看, 为保证出水的水质(尤其是 COD)也可以达到排放标准, 木块添加需要适量。根据肖蕾等研究也表明添加千屈菜植物材料为外加碳源可明显提高系统的脱氮效率, 最高可提升 30.85%, 但随着 C/N 比的增加, 硝态氮去除率逐渐降低。添加碳源量达到 C/N 比为 3 时系统能够发生最大程度反硝化, 而添加碳源量至 C/N 比为 5 和 8 时可能由于添加量过大而导致系统运行初期出水 COD 浓度升高, 达不到去除有机物的目的^[21]。

本试验结果表明, 在北方寒冷地区的人工湿地, 通过有利于氮元素去除条件的设计达到提高冬季没有植物参与的高效除 N 的人工湿地系统, 为人工湿地在我国北方的推广应用提供参考。

3 结 论

1) 试验初期, 竹子和木块的前 7 d 的 COD 浓度由较高数值迅速下降, 7 d 之后 C 的溶出趋于稳定; 木本泥炭呈现出与上述 2 种材料不同的变化趋势, 其 C 的溶出始终较低且稳定。

2) 在周期为 240 d 的试验中, 竹子的 C 溶出量最高, 均值为 577 mg/(kg·d); 其次是木块, 均值为 266 mg/(kg·d); 木本泥炭最低, 均值为 59 mg/(kg·d)。3 种材料均可溶出有机碳而作为人工湿地反硝化脱氮外加 C 源。

3) 湿地系统外加碳源脱氮单元添加 62 kg 木块时, 湿地系统对总氮和铵态氮的去除率明显高于添加 31 kg 木块作为外加碳源的湿地系统。溶出试验中木块作为人工湿地反硝化脱氮的外加碳源材料促

进了人工湿地对氮的去除, 木块作为外加碳源有应用作用。

参考文献 References

- [1] 梁康, 王启烁, 王飞华, 梁威. 人工湿地处理生活污水的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 422-428
Ling K, Wang Q S, Wang F H, Ling W. Research progresses in domestic wastewater treatment by constructed wetlands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 422-428 (in Chinese)
- [2] 王青颖. 中国农村生活污水处理技术应用现状及研究方向[J]. 污染防治技术, 2007, 20(5): 37-41
Wang Q Y. Presentsituation and prospect on rural sewage treatment in China[J]. *Pollution Control Technology*, 2007, 20(5): 37-41 (in Chinese)
- [3] 董贝, 刘杨, 杨平. 人工湿地处理农村生活污水研究与应用进展[J]. 水资源保护, 2011, 27(2): 80-86
Dong B, Liu Y, Yang P. Research and application progress of rural domestic wastewater treatment with constructed wetlands[J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27(2): 80-86 (in Chinese)
- [4] 成先雄, 严群. 农村生活污水土地处理技术[J]. 四川环境, 2005, 24(2): 9-43
Cheng X X, Yan Q. Land treatment techniques of rural domestic wastewater[J]. *Sichuan Environment*, 2005, 24(2): 9-43 (in Chinese)
- [5] Brix H. Use of constructed wetlands in water-pollution control historical development, present Status, and future perspectives [J]. *Water Science and Technology*, 1994, 30(8): 209-223
- [6] 聂志丹, 年跃刚, 金相灿, 宋英伟, 李林锋, 谢爱军. 3 种类型人工湿地处理富营养化水体中试比较研究[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1675-1680
Nie Z D, Nian Y G, Jin X C, Song Y W, Li L F, Xie A J. Pilot-Scale comparison research of different constructed wetland types to treat eutrophic lake water[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(8): 1675-1680 (in Chinese)
- [7] 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 X Q, Huang S L. 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 (in Chinese)
- [8] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006(8): 2670-2677
Lu S Y, Jin X C, Yu G. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2670-2677 (in Chinese)
- [9] Lu S Y, Zhang P Y, Jin X C, Xiang C S, Gui M, Zhang J, Li F M. Nitrogen removal from agricultural runoff by full-scale constructed wetland in China[J]. *Hydrobiologia*, 2009, 621(3): 115-126
- [10] P E Breen. A mass balance method for assessing the potential

- of artificial wetlands for wastewater treatment [J]. *Water Research*, 1990, 24(6): 689-697
- [11] Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(1): 61-69
- [12] 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 S H. *Theory and Technology for Constructed Wetland to Treat Wastewater* [M]. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese)
- [13] Laber J, Perfler R, Heberl R. Two strategies for advanced nitrogen e-elimination in vertical flow constructed wetland [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 71-77
- [14] 肖蕾, 贺锋, 黄丹萍, 梁雪, 徐栋, 吴振斌. 人工湿地反硝化外加碳源研究进展[J]. 水生生态学杂志, 2012, 33(1): 139-143
Xiao L, He F, Huang D P, Liang X, Xu D, Wu Z B. Research advances of adding extra carbon sources to denitrification for constructed wetlands[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(1): 139-143 (in Chinese)
- [15] 陆松柳, 胡洪营. 人工湿地的反硝化能力研究[J]. 中国给水排水, 2008(7): 63-65
Lu Song L, Hu H Y. Study on Denitrification capacity of constructed wetlands[J]. *China Water & Wastewater*, 2008(7): 63-65 (in Chinese)
- [16] 杨玉婷, 何小娟, 苏跃龙, 王欣泽. 外加植物碳源强化人工湿地脱氮的研究进展[J]. 水处理技术, 2015, 41(5): 1-4
Yang Y T, He X J, Su Y L, Wang X Z. Research progress in the enhancement of nitrogen removal using plant biomass as extra carbon source in constructed wetlands[J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(5): 1-4 (in Chinese)
- [17] 余丽华, 贺锋, 徐栋, 林济东, 吴振斌. 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): 3300-330
She L H, He F, Xu D, Lin J D, Wu Z B. Nitrogen removal under the condition of carbon source supplement in integrated vertical-flow constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11): 3300-3305 (in Chinese)
- [18] Lu S L, Hu H Y, Sun Y, Yang J. Effect of carbon source on the denitrification in constructed wetlands[J]. *Environmental Sciences*, 2009, 21(8): 1036-1043
- [19] Rustige H, Ndde E. Nitrogen elimination from land-fill leachates using an extra carbon source in subsurface flow constructed wetlands [J]. *Water Science and Technology*, 2007, 56(3): 125-133
- [20] Wen Y, Chen Y, Zheng N, yang D, Zhou Q. Effects of plant biomass on nitrate removal and transformation of carbon sources in subsurface-flow constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(19): 7286-7292
- [21] 肖蕾, 贺锋, 梁雪, 徐栋, 周巧红, 吴振斌. 不同碳源添加量对垂直流人工湿地污水处理效果的影响[J]. 环境工程学报, 2013, 7(6): 2074-2080
Xiao L, He F, Liang X, Xu D, Zhou Q H, Wu Z B. Impact of solid carbon sources supplement amount on performance of wastewater treatment effect in vertical-flow constructed wetland[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(6): 2074-2080 (in Chinese)
- [22] 赵秋菊, 陈昱奇. 潮汐流人工湿地不同位置脱氮效果及外加碳源对其影响[J]. 供水技术, 2015, 9(4): 32-37
Zhao Q J, Chen Y Q. Effects of denitrification in different points and external carbon source for tide and current constructed wetland[J]. *Water Technology*, 2015, 9(4): 32-37 (in Chinese)
- [23] Soares M I M, Abeliovich A. Wheat straw as substrate for water denitrification[J]. *Water Research*, 1998, 32(12): 3790-3794
- [24] 邵留, 徐祖信, 金伟, 尹海龙, 朱柏荣. 以稻草为碳源和生物膜载体去除水中的硝酸盐[J]. 环境科学, 2009, 30(5): 1414-1419
Shao L, Xu Z X, Jin W, Yin H L, Zhu B R. Nitrate removal from wastewater using rice straw as carbon source and biofilm carrier[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(5): 1414-1419 (in Chinese)
- [25] Volokita M, Abeliovich A, Soares M I M. Denitrification of ground water using cotton as energy source[J]. *Water Science and Technology*, 1996, 34(1): 3792-3805
- [26] Scott Wallace, Robert Knight. Feasibility, design criteria, and O&M requirements [C]. In: Small-scale constructed wetland treatment systems. London, IWA publishing. 2006: 22-23 (chapter 4)
- [27] United states environmental protection agency office of research and development. Design of constructed wetlands[C]. In: Design manual: constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal water treatment. EPA/625/1-88/022. 1998: 56-57
- [28] 金雪标, 阎宁. 三种反硝化工艺比较[J]. 给水排水, 2003, 29(1): 32-34
Jin X B, Yan D. Comparison of denitrification processes[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2003, 29(1): 32-34 (in Chinese)
- [29] 姜应和, 李超. 树皮填料补充碳源人工湿地脱氮初步实验研究[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 158-164
Jiang Y H, Li C. Preliminary study on denitrification capacity of constructed wetlands filled by bark [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1): 158-164 (in Chinese)
- [30] Baker L A. Design consideration and applications for wetland treatment of high-nitrate water [J]. *Water Science and Technology*, 1998, 38(1): 389-395
- [31] 王丽丽, 赵林, 谭欣, 闫博. 不同碳源及其碳氮比对反硝化过程的影响[J]. 环境保护科学, 2004, 2(30): 15-18
Wang L L, Zhao L, Tan X, Yan B. Influence of different carbon source and ratio of carbon and nitrogen for water denitrification [J]. *Environmental Protection Science*, 2004, 2(30): 15-18 (in Chinese)
- [32] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹. 有机碳源对低碳氮比生活污水好氧脱氮的影响[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(6): 11-15
Gao J F, Peng Y Z, Wang S Y. Effect of organic carbon on aerobic nitrogen removal in treatment of low COD/TN domestic wastewater[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(6): 11-15 (in Chinese)