

厌氧池-复合型人工湿地系统污水处理效果的季节变化

刘芬芬^{1,2} 王德建^{1*} 张刚¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 利用厌氧池-复合型人工湿地(AT-ICW)系统处理农村生活污水,探讨工艺系统不同季节对污水的处理效果。结果表明,该工艺系统春、夏、秋季对氨氮(NH_4^+-N)、总磷(TP)表现出稳定且较好的去除效果,去除率分别为92.8%~97.0%和56.4%~65.9%,冬季去除率相对较差,平均去除率分别为67.1%和42.5%。 NO_3^--N 的去除效果差,四季均出现积累,累积率达到71.5%~342.9%。系统春、夏季对总氮(TN)去除效果较好,去除率为57.3%~68.9%,秋、冬季去除效果相对较差,为24.5%~35.8%。系统夏季COD去除效果好,平均去除率达到78.3%,冬、春季去除效果较差,为37.8%~43.5%。各项污水排放指标均达到城镇污水处理厂污染物排放一级A类标准。AT-ICW系统不仅处理效果好,而且运行费用低,适用于农村分散型生活污水处理。

关键词 复合型人工湿地 生活污水 处理效果 季节变化

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)03-0823-06

Seasonal variation in performances of anaerobic tank-integrated constructed wetland system for sewage treatment

Liu Fenfen^{1,2} Wang Dejian¹ Zhang Gang¹

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Seasonal performances of anaerobic tank-integrated constructed wetland (AT-ICW) system for rural domestic sewage treatment were investigated. Results showed that the system in spring, summer, autumn played a great role on the removal efficiency of ammonium (NH_4^+-N), total phosphorus (TP), and average removal rates were 92.8%~97.0% and 56.4%~65.9%, respectively, in contrast the removal efficiency in winter was a little low, and the average removal rates were 67.1% and 42.5%, respectively. The NO_3^--N removal ability of the system was poor and appeared the accumulation with the average cumulative rate of 71.5%~342.9% during four seasons. The system could effectively reduce total nitrogen (TN) by 57.3%~68.9% in spring and summer and relatively low by 24.5%~35.8% in autumn and winter. The COD removal effect of the system in summer was good with the average removal rate of 78.3%, by contrast, winter and spring remove effect is poorer by 37.8%~43.5%. The effluent can meet Class A level one of national discharge standard of pollutant for municipal wastewater treatment plant. The AT-ICW system is not only effective on pollutant removal but also low cost of operation, so it is suitable for rural decentralized sewage treatment.

Key words integrated constructed wetland; domestic sewage; treatment effect; seasonal variation

随着农村经济发展、生活水平不断提高、城市化设施在农村的应用,农村生活污水水质、水量均发生较大变化,未经处理的生活污水肆意排放,严重污染了农村的生态环境,直接威胁广大农民群众的身体健康以及农村的经济发展^[1]。同时,农村污水造成饮用水源污染,湖泊、水库的富营养化现象也越来越突出^[2,3]。“十一五”规划提出了建设社会主义新农村的重大历史任务,并明确了“生产发展、生活宽

裕、乡风文明、村容整洁、管理民主”的建设目标。加强农村生活污水的处理,是村容整治的组成部分,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40871145);中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-440);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ24B06)

收稿日期:2010-11-09; **修订日期:**2011-02-23

作者简介:刘芬芬(1984~),女,硕士研究生,主要从事农村生活污水处理方面的研究。E-mail: 08flyingbird@163.com

* 通讯联系人, E-mail: djwang@issas.ac.cn

也是社会主义新农村建设的重要内容。

针对农村生活污水浓度低、性质相差不大、排放变化系数大、大多数无管网收集呈粗放型排放等特征以及农村村镇分布广泛且分散的地形地势,出现了较多的小型化、就地化、分散式处理工艺^[4]。国内研究较多的技术有:厌氧沼气池处理技术、人工湿地处理技术、小型二级污水处理装置技术(包括地理式无动力/微动力污水处理装置)、地下渗滤处理系统、蚯蚓生态滤池、生态厕所等^[5-7]。但这些单级工艺普遍存在有机负荷较低、处理过程缓慢、处理水量有限、气味大、土地占有面积大、处理效果受季节影响较大等缺陷^[6,8]。本课题组研究设计了厌氧池—复合型人工湿地的小型化组合工艺系统。该组合工艺系统采用厌氧池作为预处理设施,再利用环形水平潜流/垂直流复合型人工湿地对生活污水进行深度处理。本文将分别讨论分析 AT-ICW 系统中厌氧池、环形水平潜流人工湿地、垂直流人工湿地及整个组合工艺系统春、夏、秋、冬季节对污水中污染物的去除效果及处理机制,旨在为农村生活污水处理的工艺设计提供理论依据,试图提供一条适合中国国情的农村生活污水处理途径。

1 工艺流程及方法

1.1 实验系统

该污水处理系统建在江苏常熟农业生态国家实验站上,用于处理工作人员的生活污水。工艺组合为厌氧池-环形水平潜流/垂直流复合型人工湿地系统,原水先后经过粗格栅、细格栅去除固体废弃物后进入长×宽×深为 2 m×2 m×1 m 的厌氧池,经处理后的污水由水泵抽到环形水平潜流人工湿地,该部分由内径为 0.5 m 的中心布水池和外围半径为 1.5 m,基质填料为 0.7 m 深的水平环形潜流湿地构成,经过处理后由集水管收集再由水泵抽入高位水箱,最后由虹吸作用将水送入垂直流湿地进行处理后排放。垂直流湿地小区长×宽×深为 1.5 m×1.0 m×0.6 m,填料设置深 50 cm,从下往上依次为:0~20 cm 砾石,20~25 cm 细砂,25~40 cm 沸石+石灰石填料,40~50 cm 土壤。环形水平潜流湿地与垂直流湿地均种植美人蕉。

实验装置构建于 2009 年 3 月,于 5 月开始运行,采用全天间歇式进水,实际流入湿地的平均水量为 3 m³/d,水力负荷为 0.15 m³/(m²·d)。布水管比基质层面高 0.15 m,呈“丰”字型布设。实验工艺

流程如下:

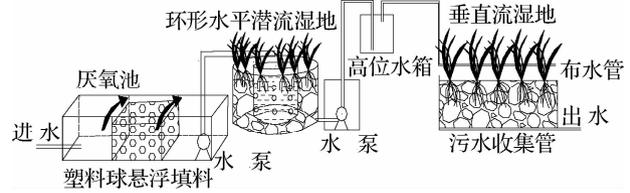


图1 组合工艺流程

Fig. 1 Flow chart of anaerobic tank-integrated constructed wetland (AT-ICW) system

1.2 供试污水水质

供试污水为实验站工作人员的生活污水。进水水质如表 1 所示:

表 1 进水水质

Table 1 Inflow sewage properties of

AT-ICW system

(mg/L)

季节	COD	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP
春季	86.7±8.4	23.2±2.6	20.7±6.9	1.64±0.1	0.81±0.15
夏季	67.4±17.9	18.6±8.6	14.6±6.8	1.82±0.7	1.04±0.27
秋季	77.9±11.4	20.7±1.4	18.7±2.0	2.33±0.9	1.14±0.37
冬季	73.7±9.3	19.6±5.0	11.9±2.2	2.21±1.0	0.73±0.06

1.3 测试指标及测试方法

分别于 2009 年 10 月(秋)、2010 年 1 月(冬)、4 月(春)、8 月(夏)的 4 个月份,每隔 5 d 采一次水样,测定其化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N。水样分析方法:COD 采用快速密闭催化消解法;TP 采用过硫酸钾消解—钼锑抗比色法;TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 利用流动分析仪(AA3-Bran + luebbe)测定。

2 实验结果与分析

2.1 AT-ICW 对氮的去除效果

2.1.1 AT-ICW 的 NH₄⁺-N 去除率

AT-ICW 系统及各单元对 NH₄⁺-N 的去除效率如图 2 所示。厌氧池 NH₄⁺-N 去除率春、秋季高于冬、夏季,其中夏季去除率最低为 16.8%,比秋季平均降低 34.6%。环形水平潜流湿地春、夏、秋季去除率基本相同,去除率在 26.8%~36.7%;冬季最差,平均去除率仅为 11.9%。垂直流湿地春、夏、秋季均表现出较好的 NH₄⁺-N 去除效果,其中夏季去除效果最好,平均去除率达到 92.3%;冬季 NH₄⁺-N

去除率最低,比夏季平均下降43.6%。系统总体春、夏、秋、冬季对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别为92.8%、97.0%、92.8%和67.1%。可见AT-ICW系统表现出非常好的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果,春、夏、秋季去除效果相近,冬季去除效果相对较差,比夏季 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率下降29.9%。同时由图2可见, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要是在垂直流湿地中被去除。

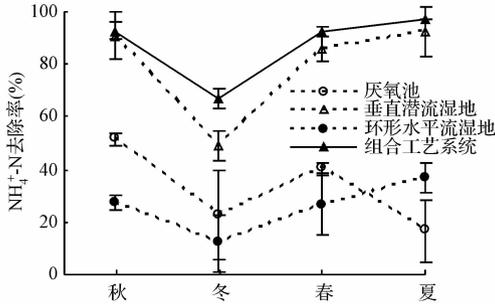


图2 组合工艺系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果

Fig.2 Removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ by AT-ICW system

2.1.2 AT-ICW的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除率

AT-ICW系统及各单元对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除效率如图3所示。厌氧池夏季 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除效果最好,平均达到28.2%;春、秋去除效果基本相同;冬季为最差,平均去除率比夏季降低25.5%。环形水平潜流湿地除了在春季达到25.7%的去除效果以外,其他3季均出现了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的积累,积累程度为:秋>冬>夏。垂直流湿地系统4季均出现了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的积累,夏季累积率最大,平均累积率达到290.1%;春、秋基本相同;冬季累积率最小,平均累积率为84.3%。系统总体春、夏、秋、冬季对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率分别为-71.5%、-265.3%、-342.9%和-205.4%。可以看出AT-ICW系统对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除效果差,四季均出现积累,秋季累积率最大,

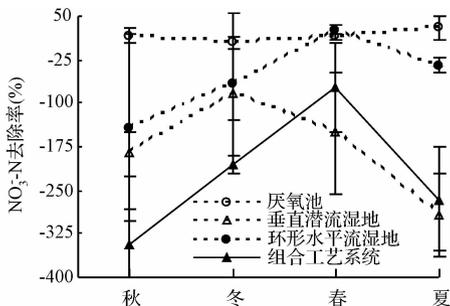


图3 AT-ICW系统对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除效果

Fig.3 Removal rate of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ by AT-ICW system

其次为夏、冬季,春季累积率最小。同时由图3可见,夏、秋、冬季 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 主要是在厌氧池中被去除,春季主要是在环形水平潜流湿地及厌氧池中被去除。

2.1.3 AT-ICW的TN去除率

AT-ICW系统及各单元对TN的去除效率如图4所示。厌氧池春、夏、秋、冬季的TN去除率分别为23.0%、20.0%、25.4%和20.3%,可以看出厌氧池对TN的去除效果季节性变化不大。环形水平潜流湿地春季TN去除效果最好,平均去除率达到20.5%;夏季TN的平均去除率为16.5%;秋、冬季的平均去除率为4.8%~8.5%。垂直流湿地TN去除效果春、夏季好于秋、冬季,春季去除效果最好,平均去除率达到60.6%;冬季最差,比春季低57.3%。AT-ICW系统总体春、夏、秋、冬季对TN的去除率分别为68.9%、57.3%、35.8%、24.5%,可见系统春、夏表现出较好的TN去除率,冬季去除率最低,比春季降低44.4%。由图4还可以看出,秋、冬季TN主要在厌氧池中被去除,春、夏季TN主要是在垂直流湿地中被去除。

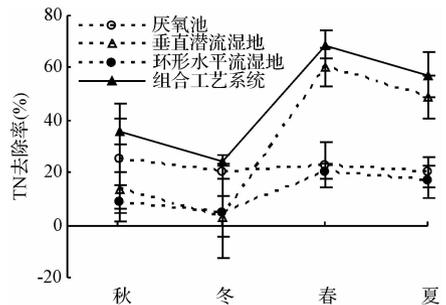


图4 组合工艺系统对TN去除效果

Fig.4 Removal rate of TN by AT-ICW system

2.2 AT-ICW的TP去除率

AT-ICW系统及各单元对TP的去除效果如图5所示。厌氧池春、夏、秋、冬季对TP的去除率分别为47.3%、30.0%、53.9%和43.4%,表现出较好的去除率,其中春季的去除率最高,冬季最低,夏、秋季去除率基本相同。环形水平潜流湿地春、秋季TP去除效果基本相同,分别为14.5%和19.7%;夏季平均去除率为4.5%;冬季去除效果差,出现磷积累现象,平均累积率达到7.1%。垂直流湿地夏季TP去除效果最好,平均去除率达到47.8%,比春、秋季去除率平均提高20%左右;冬季垂直流湿地和环形水平潜流湿地一样,出现磷积累现象,平均累积率为

1.4%。系统春、夏、秋、冬季对 TP 的去除率分别为 65.9%、58.6%、56.4% 和 42.5%。可见 AT-ICW 系统对 TP 达到了较好的去除率,其中春季效果最好,夏、秋季次之,冬季为最低。从图 5 还可以看出,春、秋、冬季的 TP 主要是在厌氧池中被去除,夏季主要在垂直流湿地中被去除。

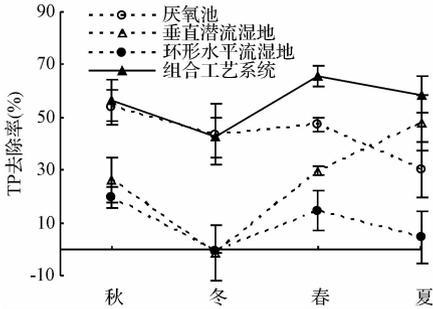


图 5 组合工艺系统对 TP 去除效果

Fig. 5 Removal rate of TP by AT-ICW system

2.3 AT-ICW 的 COD 去除率

AT-ICW 系统及各单元对 COD 的去除率如图 6 所示。厌氧池在夏、秋季 COD 去除率比较高,分别达到 51.6% 和 44.8%;冬、春季相对较低,分别为 19.1% 和 17.6%。环形水平潜流湿地春、夏、秋、冬季的 COD 去除率分别为 14.0%、28.7%、20.0% 和 11.7%,冬季去除率最低。垂直流湿地春、夏、秋、冬季的 COD 去除率分别为 20.2%、48.7%、24.6% 和 12.9%,夏季 COD 的去除效果最好,冬季最差,夏季 COD 去除率平均比冬季提高 35.8%;春、秋季 COD 去除率基本相同。AT-ICW 系统春、夏、秋、冬季的 COD 去除率分别为 43.5%、78.3%、60.7% 和 37.8%,可见 AT-ICW 系统夏季对污水 COD 去除效果好,其次为秋、春季,冬季去除率最低。图 6 结果还表明,夏、秋季 COD 主要在厌氧池中被去除,春、冬季各处理工艺之间相差不大。

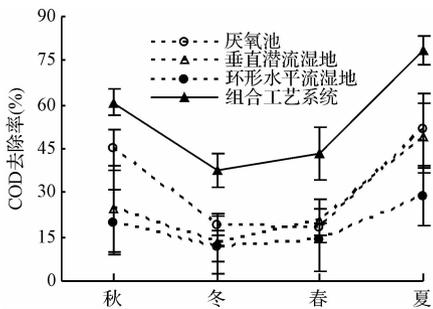


图 6 组合工艺系统对 COD 去除效果

Fig. 6 Removal rate of COD by AT-ICW system

2.4 排放污水水质

各季节系统排水的水质如表 2 所示。结果表明,排水中各项污染物浓度季节间存在差异,但各项污水排放指标基本均达到城镇污水处理厂污染物排放一级 A 类标准(GB 18918-2002),组合工艺系统表现出理想的污水处理效果。

表 2 组合工艺系统出水水质

季节	COD	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP
春季	41.9 ± 7.5	7.4 ± 3.7	1.5 ± 0.2	2.7 ± 1.3	0.33 ± 0.03
夏季	13.6 ± 7.9	8.0 ± 2.8	0.5 ± 0.1	6.5 ± 0.9	0.41 ± 0.05
秋季	28.2 ± 3.9	13.3 ± 2.4	1.8 ± 0.2	9.8 ± 1.8	0.40 ± 0.09
冬季	43.0 ± 5.8	13.4 ± 1.4	3.6 ± 0.1	6.7 ± 1.2	0.41 ± 0.08
一级 A 标准	50	15	5(冬季 8)	—	0.5

3 讨论

3.1 氮的去除效果分析

在 AT-ICW 系统的 3 个单元中,厌氧池夏、冬季 NH₄⁺-N 去除率低,其原因可能是夏季高温有利于氨化作用,而冬季低温厌氧微生物繁殖速率低,吸收 NH₄⁺-N 量低,导致夏、冬季厌氧池的去除率低。许多研究表明^[9-11],微生物的硝化作用是一个最具温度敏感性的过程,最佳温度是 30 ~ 35℃。本实验水平潜流和垂直流湿地中均发现了类似的情况,在进水浓度基本相同情况下,NH₄⁺-N 去除率的季节性波动大,夏季去除率最高,冬季最低。垂直流湿地对 NH₄⁺-N 去除效果最好(图 2),主要原因是厌氧池、水平潜流湿地内部均为厌氧环境,不利于硝化作用,而垂直流湿地由于进水携带溶解氧、大气复氧等形式在湿地床体内形成许多好氧区域,具有更好的 NH₄⁺-N 的去除效果^[12]。

在厌氧池中,NO₃⁻-N 的去除机理除了微生物生长利用外,更主要的原因是厌氧池的浮球填料表面,硝态氮发生了反硝化作用^[13]。NO₃⁻-N 去除率随季节变化表现出一定的波动性,可能与反硝化作用受温度的影响较大有关^[14]。环形水平潜流湿地夏、秋、冬 3 季均出现了 NO₃⁻-N 的积累,主要原因可能是本实验中水平潜流湿地为落差式进水,导致进水携氧,在湿地内部发生硝化反应,而反硝化作用未有效发生,但春季仍达到 25.6% 的 NO₃⁻-N 去除率,可

能与春季美人蕉快速生长过程中吸收氮有关。垂直流人工湿地4季均出现了 NO_3^- -N的积累,尤其是夏季,表明以好氧为主的垂直流湿地反硝化能力差,系统总体上对 NO_3^- -N去除效果差,具体原因还有待进一步研究。

厌氧池中TN的去除主要为微生物生长消耗水中的氨氮、硝酸盐发生反硝化作用及厌氧池中填料及填料膜面吸附而得以去除^[15]。厌氧池对TN的去除效果随季节性变化不大,表现出稳定的脱氮能力。环形水平潜流湿地与垂直流湿地对TN的去除效果均表现出春、夏好于秋、冬,这可能是温度和植物的交互作用引起的。AT-ICW系统秋、冬季TN主要在厌氧池中被去除,春、夏季主要在垂直流湿地中被去除,系统之间相互协调互补达到一定的TN去除效果。

3.2 TP的去除效果分析

厌氧池对TP去除率较高,这与传统的生物地球化学理论中厌氧环境下释放磷,好氧条件下磷积累的生物脱磷原理不相符合。但周康群等研究表明^[16,17],一些无机磷和有机磷能被厌氧微生物转化为磷化氢而去除。另外,厌氧池内的浮球填料及其表面的生物膜可有效地吸附、截留与有利于微生物吸收污水中的磷。人工湿地对于磷的去除,主要取决于植物吸收、基质的吸附过滤和微生物转化三者的共同作用,其中基质对磷的吸附被认为是最有效的机制^[18]。许多研究表明^[14,19],湿地除磷效果受季节和温度影响较大,一般在春、秋、夏季的去除率较高,而在冬季温度较低时去除率较低。这与本实验水平潜流湿地与垂直流湿地对磷的去除效果相似。另外水平潜流湿地与垂直流湿地冬季出现磷的积累,其主要原因可能为:冬季植物枯死,根系中部分磷被溶解到水体中,导致出水中磷含量增加。

3.3 COD的去除效果分析

厌氧池夏、秋季COD去除率高于春、冬季,这可能是厌氧池对COD的去除受温度的影响较大有关。温度高时,微生物代谢能力强,繁殖速度快,分解的有机底物就越多,达到较高的COD去除效果;相反,温度降低,微生物的活性迅速下降。本实验中水平潜流湿地与垂直流湿地对COD的去除效果均表现出:夏>春、秋>冬,其主要原因可能是不同季节间的温度差异会影响系统中植物和微生物的生长和生理生化活性,从而对净化效果产生影响^[20]。冬季植物地上部分枯萎,致使根际微生物增殖活性减低,从而

降低了微生物对有机物的降解能力,但由于基质的吸附、过滤等作用以及湿地中植物根系与微生物的共同作用,整个系统仍然对有机物有一定的去除效果。

4 结论

(1)AT-ICW系统春、夏、秋季对 NH_4^+ -N去除效果很好,平均去除率为92.8%~97.0%,冬季相对较差,平均去除率为67.1%。系统对 NO_3^- -N的去除效果差,四季均出现了积累。系统春、夏季对TN的去除效果较好,平均去除率为57.3%~68.9%,冬季去除效率最低;系统中春、夏季TN主要在垂直流湿地中被去除,秋、冬季TN主要在厌氧池中被去除。

(2)系统春、夏、秋季TP平均去除率为56.4%~65.9%,冬季去除率为42.5%;春、秋、冬季污水中的TP主要是在厌氧池中被去除,夏季主要在垂直流湿地中被去除。

(3)系统夏、秋季对污水COD去除效果较好,平均去除率超过60.7%,春、冬季效果较差,平均去除率只有37.8%~43.5%;污水中COD夏、秋季主要是在厌氧池中被去除,春、冬季各处理工艺之间相差不大。

(4)全年各项污水排放指标均达到城镇污水处理厂污染物排放一级A类标准,系统污水处理效果理想且稳定。

参考文献

- [1] 李海明. 农村生活污水分散式处理系统与实用技术研究. 环境科学与技术, 2009, 32(9): 177-181
Li Haiming. Distributed rural sewage treatment system and practical technology. Environmental Science and Technology, 2009, 32(9): 177-181 (in Chinese)
- [2] 刘兆德, 虞孝感, 王志宪. 太湖流域水环境污染现状与治理的新建议. 自然资源学报, 2003, 18(4): 467-474
Liu Zhaode, Yu Xiaogan, Wang Zhixuan. The current water pollution of Taihu drainage basin and the new management proposals. Journal of Natural Resources, 2003, 18(4): 467-474 (in Chinese)
- [3] 苏东辉, 郑正, 王勇, 等. 农村生活污水处理技术探讨. 环境科学与技术, 2005, 28(1): 79-81
Su Donghui, Zhengzheng, Wang Yong, et al. Discussions on treatment technology of rural domestic wastewater. Environmental Science and Technology, 2005, 28(1): 79-81 (in Chinese)
- [4] 陈和平, 张慎, 朱建林, 等. 厌氧接触氧化池/垂直流人工湿地处理农村生活污水. 宁波大学学报: 理工版,

- 2008**, 21(4): 568-570
Chen Heping, Zhang Shen, Zhu Jian, et al. Treatment of rural domestic wastewater by anaerobic-contact oxidation and vertical flow man-made wetland. *Journal of Ningbo University (NSEE)*, **2008**, 21(4): 568-570 (in Chinese)
- [5] 蒋岚岚, 刘晋, 钱朝阳, 等. MBR/人工湿地工艺处理农村生活污水. *中国给水排水*, **2010**, 26(4): 29-31
Jiang Lanlan, Liu Jin, Qian Zhaoyang, et al. Treatment of rural domestic sewage by MBR/constructed wetland process. *China Water & Wastewater*, **2010**, 26(4): 29-31 (in Chinese)
- [6] 沈东升, 贺永华, 冯华军, 等. 农村生活污水埋地式无动力厌氧处理技术研究. *农业工程学报*, **2005**, 21(7): 111-115
Shen Dongsheng, He Yonghua, Feng Huajun, et al. Underground unpowered anaerobic reactor for rural domestic sewage treatment. *Transactions the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **2005**, 21(7): 111-115 (in Chinese)
- [7] 郝前进, 张莘. 农村生活污水治理示范工程的成本有效性研究——以上海和苏南地区为例. *中国人口资源与环境*, **2010**, (1): 108-111
Hao Qianjin, Zhang Ping. Cost effectiveness analysis of rural domestic sewage treatment projects: A case study in Shanghai and southern Jiangsu Province. *China Population, Resources and Environment*, **2010**, (1): 108-111 (in Chinese)
- [8] 程炜, 范建伟. 我国南方地区农村生活污水处理技术探讨. *中国资源综合利用*, **2009**, 27(10): 35-37
Cheng Wei, Fan Jianwei. Study of the technologies for rural areas domestic wastewater treatment in southern region of China. *China Resources Comprehensive Utilization*, **2009**, 27(10): 35-37 (in Chinese)
- [9] 张政, 付融冰, 顾国维, 等. 人工湿地脱氮途径及其影响因素分析. *生态环境*, **2006**, 15(6): 1385-1390
Zhang Zheng, Fu Rongbing, Gu Guowei, et al. Analyse of nitrogen removal pathways and their effect factors in constructed wetland. *Ecology and Environment*, **2006**, 15(6): 1385-1390 (in Chinese)
- [10] Matheson F. E., Sukias J. P. Nitrate removal processes in a constructed wetland treating drainage from dairy pasture. *Ecological Engineering*, **2010**, 36(10): 1260-1265
- [11] Tanner C. C., Kadlec R. H., Gibbs M. M., et al. Nitrogen processing gradients in subsurface-flow treatment wetlands-influence of wastewater characteristics. *Ecological Engineering*, **2002**, 18(4): 499-520
- [12] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, **2007**, 380(1-3Sp. Iss. SI): 48-65
- [13] 李杰, 钟成华, 邓春光. 厌氧池/人工湿地/生物塘系统处理奶牛养殖场废水. *中国给水排水*, **2008**, 24(9): 83-85
Li Jie, Zhong Chenghua, Deng Chunguang. Application of anaerobic tank/constructed wetland/biological pond system for treatment of cows farm wastewater. *China Water & Wastewater*, **2008**, 24(9): 83-85 (in Chinese)
- [14] Kadlec R. H., Reddy K. R. Temperature effects in treatment wetlands. *Water Environment Research*, **2001**, 73(5): 543-557
- [15] 梁威, 吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展. *环境科学动态*, **2000**, (3): 32-37
Liang Wei, Wu Zhengbing. Research advances in phosphorus removal and nitrogen elinination of sewage in constructed wetland system. *Environmental Science Trends*, **2000**, (3): 32-37 (in Chinese)
- [16] 刘晖, 孙彦富, 周康群, 等. 厌氧除磷同步脱氮及影响因素研究. *生态环境学报*, **2009**, 18(5): 1708-1714
Liu Hui, Sun Yanfu, Zhou Kangqun, et al. Anaerobic phosphorus removal and simultaneously nitrogen elinination and influencing factors. *Ecology and Environmnet*, **2009**, 18(5): 1708-1714 (in Chinese)
- [17] 何志茹, 霍玉龙, 张文胜. 生物脱氮除磷技术的新动向. *环境科学与管理*, **2007**, 32(10): 97-99
He Zhiru, Huo Yulong, Zhang Wensheng. New trends of biological nitrogen removal processe. *Environmental Science and Management*, **2007**, 32(10): 97-99 (in Chinese)
- [18] 刘波, 陈玉成, 王莉玮. 人工湿地基质除磷研究进展. *四川环境*, **2008**, 27(6): 41-45
Liu Bo, Chen Yucheng, Wang Liwei. Research advances in phosphorus removal by substrates of constructed wetland system. *Sichuan Environment*, **2008**, 27(6): 41-45 (in Chinese)
- [19] 薛重华, 闻岳, 张倩. 不同因素对人工湿地基质除磷效果的影响. *安徽农业科学*, **2009**, 37(36): 18122-18125
Xue Chonghua, Wen Yue, Zhang Qian. Influences of different factors on removal effect of phosphorus in substrate of constructed wetlands. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, **2009**, 37(36): 18122-18125 (in Chinese)
- [20] 雒维国, 王世和, 黄娟, 等. 潜流型人工湿地冬季污水净化效果. *中国环境科学*, **2006**, 26(B07): 32-35
Luo Weiguo, Wang Shihe, Huang Juan, et al. The purification effect of underflow type constructed wetland in winter. *China Environmental Science*, **2006**, 26(B07): 32-35 (in Chinese)