

两级潜流人工湿地在中国东北高寒地区的应用研究

海热提, 范立维, 谢涛, 张祺, 卓峰, 林爱军

(北京化工大学环境科学与工程技术中心, 北京 100029)

摘要:以吉林省四平市郊区的两级潜流人工湿地生活污水处理系统为例, 考察了隔离保温、特殊活性人工介质等加强化措施后的两级湿地系统在东北高寒地区运行的适应性及其效能与特征, 分析了潜流人工湿地的两级组合工艺在污染物去除方面的优势. 结果表明, 通过特殊活性人工介质的选用和一定的隔离保温措施, 两级潜流人工湿地系统能在高寒地区高效运行, 其对 COD 、 BOD_5 、 SS 、 NH_4^+-N 、 TP 具有稳定的去除效果, 整个运行期间, 出水 COD 、 BOD_5 和 SS 平均浓度分别为 16.01、4.27 和 4.01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 并且可以使出水 NH_4^+-N 和 TP 浓度分别在 9.72 和 0.45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 均达到中水水质标准; 潜流人工湿地的两级组合系统, 可以弥补单级人工湿地 NH_4^+-N 去除效率不高的缺点, 提高污染物的去除效率.

关键词: 两级潜流人工湿地; 生物降解; 污水处理; 去除效果

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)11-2442-06

Application of Two Stage Subsurface Constructed Wetland Technology in Cold Area of Northeast China

HAI Re-ti, FAN Li-wei, XIE Tao, ZHANG Qi, ZHUO Feng, LIN Ai-jun

(Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Base on the two stage subsurface constructed wetland system running at the suburb of Siping city in Jilin province, the applicability and characteristics of the two stage system which had especial active media and measurements of isolation for temperature protection were studied and the advantages of the two stage system in the pollution removal were analyzed. The results showed that, the choice of especial active media and the measurements of isolation for temperature protection of the system made the two stage subsurface constructed wetland run efficiently in cold area and the system had very stable effects of the COD , BOD_5 , SS , NH_4^+-N and TP removal. In the whole process, the concentration of COD , BOD_5 and SS in the outflow was about 16.01, 4.27 and 4.01 mg/L respectively and the concentration of NH_4^+-N and TP in the outflow was below 9.72 and 0.45 mg/L respectively. The subsurface wetland with two stages can overcome the disadvantage of the single system and improve the pollution removal efficiency.

Key words: two stage subsurface constructed wetland; biodegradation; wastewater treatment; removal efficiency

人工湿地污水处理技术设备简单、投资少、操作管理方便、能耗低、净化效果好, 具有广阔的应用前景^[1~3]. 然而由于人工湿地是人工的半自然生态处理系统, 受气候影响比较大, 致使人工湿地污水处理技术在寒冷地区的应用受到一定的限制^[4]. 潜流人工湿地的特点是污水在处理过程中被表层土覆盖, 使之因蒸发和流动造成的能量损失减小, 受环境温度变化影响相对较小, 因而相对于其它湿地形式而言, 其更适宜在高寒地区运行^[5~7]. 但是潜流湿地技术引入我国的时间不长, 由于在技术上存在的局限性和在寒冷地区污染物去除效率不高等原因, 目前在我国高寒地区的应用并不广泛, 有关其在我国寒冷地区的运行数据也不充分. 张建等研究了有无地膜覆盖的潜流人工湿地系统, 结果显示, 通过覆盖地膜能有效提高系统对污染物的去除效果, 但氨氮和有机物的平均转化率最高只能达到 67.6% 和 46.6%^[8]; 刘学燕等研究了潜流湿地的空气层加秸

秆等隔离物和空气层加冰层这 2 种隔离保温措施, 结果表明前者效果较好, 但氨氮的去除率也只在 50% 左右^[9]. 为了提高潜流湿地在高寒地区的处理效果, 本文以吉林省四平市郊区的两级潜流人工湿地生活污水处理系统为例, 研究采用两级组合工艺的潜流人工湿地系统在采取隔离保温、特殊活性人工介质等加强化措施后在东北高寒地区运行的适应性及其效能与特征, 以期优化我国东北高寒地区人工湿地污水处理技术的工艺和设计, 得到相应的运行规律, 提高人工湿地在高寒地区的污染物去除效果, 使其更好地应用于我国高寒地区的污水处理.

1 材料与方法

1.1 人工湿地系统

收稿日期: 2006-10-17; 修订日期: 2007-05-10

作者简介: 海热提 (1959 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为人工湿地和环境管理与规划, E-mail: hjzhx@mail.buct.edu.cn

本研究所考察的潜流人工湿地占地面积3 400 m³, 湿地底部坡度为 0.172°; 人工湿地周围衬有防渗膜, 并有堤坝作为外围保护圈, 以防止在暴雨情况下地表径流水进入系统; 内部有给排水管道和碎石、活性介质、草性物质填料; 湿地最上面种有芦苇. 潜流人工湿地系统结构如图 1 所示.

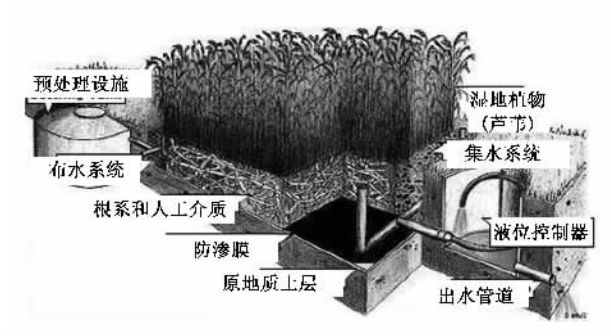


图 1 潜流人工湿地系统结构

Figure 1 Configuration of the subsurface constructed wetland system

人工湿地填料床是湿地系统主要组成部分, 其结构如图 2 所示. 填料共 6 层: 最下面是细沙, 往上依次是粒径为 24 mm 的含钙石灰石层、粒径为 24 mm 的石子层、粒径为 13 mm 的石子层、人工介质层、草性物质层. 湿地床内的给排水管设有护管层, 由内到外分别是粒径为 13 mm 和 24 mm 的碎石. 虽然人工湿地填料床内护管层的增设以及填料层的细化在一定程度上增加了施工量, 但有利于污水在人工湿地床内的合理分布, 提高系统处理效果.

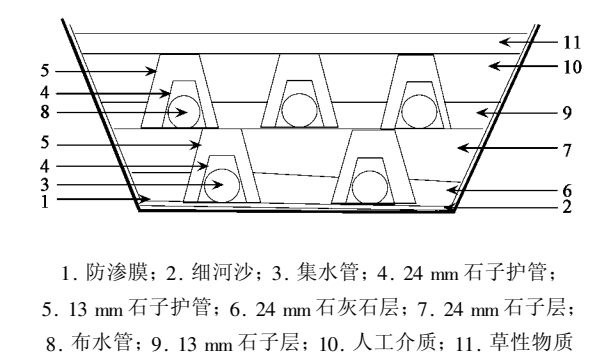


图 2 潜流人工湿地填料床结构

Figure 2 Construct of the subsurface constructed wetland

另外, 该潜流人工湿地系统所采用的人工介质填料是自行开发的有别于其它人工湿地的生物活性介质, 主要成分如表 1 所示.

1.2 工艺流程与运行方式

人工湿地系统工艺流程如图 3 所示. 污水在进入人工湿地之前, 采用隔栅除去大部分固体悬浮物, 然后由调节池进入厌氧罐进行厌氧处理. 经这 2 种

预处理后的污水经布水管进入两级潜流人工湿地, 出水经集水管收集后进行中水回用.

表 1 活性介质主要成分

Table 1 Main components of active medium of the subsurface constructed wetland

序号	人工介质名称	备注
1	铁矿粉	品位 > 60%
2	石灰石	φ16 ~ 32 mm
3	堆肥	农用堆肥, 粒径 < 3 cm
4	草炭	长丝草炭(长度 > 3 cm), 含碳量 > 95%
5	木屑	长度 > 3 cm
6	污泥饼	污水处理厂
7	活性污泥	污水处理厂

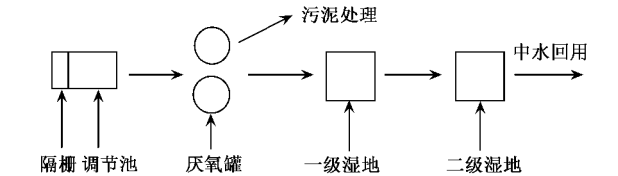


图 3 工艺流程

Figure 3 Process flow of the subsurface constructed wetland system

实验设计进水量为 500 m³/d, 水质监测时间为 7 ~ 12 月, 连续半年的检测中, 外界最高气温 29℃, 最低气温 - 10℃. 潜流人工湿地系统分夏季和冬季运行, 其运行期分别为 07-15 ~ 10-15 和 10-20 ~ 12-25.

1.3 分析方法

取样口分别设在一级湿地进、出水和二级湿地出口处, 同一时间进行周期性的采样分析. 测定水样的 COD、BOD₅、SS、NH₄⁺-N、TP, 测定方法采用文献 [10] 的分析方法.

2 结果与分析

2.1 NH₄⁺-N 的去除

人工湿地系统中的 NH₄⁺-N 可以通过氨的挥发和植物的吸收利用得到部分去除, 但主要是通过微生物的硝化、反硝化作用来完成的 [11, 12]. 该两级人工湿地系统 NH₄⁺-N 去除效果见表 2 和图 4.

由表 2 和图 4 可知, 一级湿地和二级湿地对 NH₄⁺-N 的平均去除效率分别为 39.55% 和 76.12%, NH₄⁺-N 在二级湿地中的去除率高于一级湿地. 由此, 两级人工湿地系统 NH₄⁺-N 去除能力并非 2 个单级人工湿地的简单叠加, 而是通过工艺优化组合提高了 NH₄⁺-N 去除效率.

通常, 在氧化过程中硝化细菌所释放的能量大

表 2 人工湿地系统NH₄⁺-N去除效果

Table 2 Removal effects of NH ₄ ⁺ -N in subsurface constructed wetland system				
时间	进水/mg•L ⁻¹	一级湿地出水 /mg•L ⁻¹	二级湿地出水 /mg•L ⁻¹	两级湿地系统 平均去除率/%
07-15 ~ 10-15	30.78 ~ 68.66	20.04 ~ 30.16	3.78 ~ 8.42	87.44
10-20 ~ 12-25	31.3 ~ 64.36	25.66 ~ 35.90	4.90 ~ 9.72	83.86

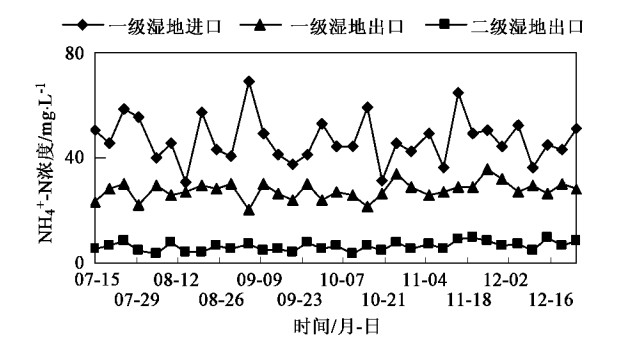


图 4 人工湿地系统NH₄⁺-N去除效果

Fig.4 Removal effects of NH₄⁺-N in subsurface constructed wetland system

于异养菌所释放的,与异养菌相比较硝化细菌生长缓慢^[13],所以在人工湿地的进水端,有机物浓度高,异养菌生长快是优势菌;在出水端时,由于有机物浓度降低,异养菌生长受到限制,对氧的竞争减弱,此时自养硝化细菌就能占优势,氨氮被硝化^[14,15].由于单级人工湿地系统同时去除有机物和含氮化合物,存在自养菌和异养菌对空间和氧气的竞争,当进水有机物负荷和含氮化合物浓度较高时,由于在进水端附近有机物的降解消耗了大量的氧,导致在出水端氧气的不足,并成为好氧的硝化细菌形成优势菌实现氨氮硝化的制约性因素(只有氧供应量充足时,硝化细菌才能氧化含氮化合物)^[16,17].这样,在单级潜流人工湿地中难以实现含氮化合物的有效去除.本研究采用的两级人工湿地系统,由于一级湿地出水端紧接二级湿地进水端,利用二级湿地进水端丰富的氧含量^[18-20]很好地解决了硝化细菌的氧气问题.通过第二级湿地的引入,在二级湿地进水端营造低浓度有机物、高浓度溶解氧的环境来强化系统的硝化作用.这样,使异养菌和自养菌在适合自己的最佳环境下充分发挥其去除污染物的能力,大

表 3 人工湿地系统有机物去除效果

Table 3 Removal effects of organic matter in subsurface constructed wetland system					
时间	项目	进水/mg•L ⁻¹	一级湿地出水/mg•L ⁻¹	二级湿地出水/mg•L ⁻¹	两级湿地系统平均去除率/%
07-15 ~ 10-15	COD	152.91 ~ 300.42	30.37 ~ 87.82	8.43 ~ 20.89	93.00
	BOD ₅	94.21 ~ 147.51	11.07 ~ 39.58	2.07 ~ 6.14	96.53
10-20 ~ 12-25	COD	159.82 ~ 276.49	47.35 ~ 94.57	10.82 ~ 20.41	91.18
	BOD ₅	96.81 ~ 132.31	19.14 ~ 39.14	2.09 ~ 6.03	95.64

大提高了系统的NH₄⁺-N去除效率.

整个观测期间两级潜流人工湿地系统NH₄⁺-N去除效率在 78.50% 以上,二级湿地出水NH₄⁺-N浓度小于 9.72 mg/L,即使在寒冷的冬天也能有很好的NH₄⁺-N去除效果.其原因除了上面所分析的工艺的优化以外可能还与系统所采取的隔离保温等强化措施有关.

该人工湿地系统的进出水管道采用暗沟埋地形式;泵房及出水井均用厚墙保护,并加厚顶覆盖,盖板下方采用苯板进行保温;人工湿地床有草性物质层和高松散度的耐冻活性介质层保温.因此,进水温度为 10℃ 左右的生活污水即使在寒冷的冬天也能在该保温隔离人工湿地系统中保持稳定运行的热量.在冬天,尽管地表上面绿色植物(20%)停止了生长,但由于加入了新的污水,占植物总重量 80% 的植物根系的生长仍在继续,所以可以保证一定的供氧能力;此外,由于活性介质中含有大量堆肥、草炭和木屑等成分(如表 1),不仅提供了良好的微生物生长空间,增强了湿地防冻能力,同时提高了湿地系统的通透性,增加了湿地氧气的供给.所以即使在寒冷的冬天,该人工湿地系统NH₄⁺-N平均去除率也能达到 87.44%,比夏季运行期间只下降 3.68%.国外也有相关文献报道过人工湿地NH₄⁺-N去除效率不受季节变化影响^[21].Mander 等监测氮的去除效率发现其在冬季没有下降^[22];Borner 等也报道其研究的湿地在冬夏季脱氮效率差别不到 10%^[23].

2.2 有机物的去除

在人工湿地中,不溶性有机物通过湿地的沉淀、过滤可以很快从废水中截留下来,并被微生物加以利用;可溶性有机物则可通过生物膜的吸附及微生物的代谢过程被去除^[24,25].该两级人工湿地系统有机物去除效果见表 3、图 5 和图 6.

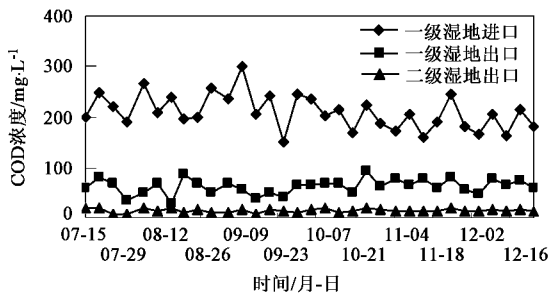


图 5 人工湿地系统 COD 去除效果

Fig.5 Removal effects of COD in subsurface constructed wetland system

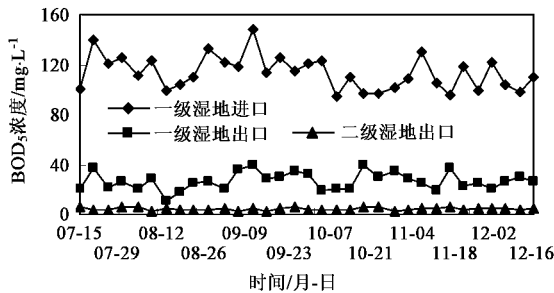


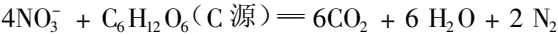
图 6 人工湿地系统 BOD₅ 去除效果

Fig.6 Removal effects of BOD₅ in subsurface constructed wetland system

由表 3, 图 5 和图 6 可知, 进水 COD 浓度在 152.91 ~ 300.42 mg/L, BOD₅ 浓度在 94.21 ~ 147.51 mg/L 时, COD 和 BOD₅ 平均去除率分别为 92.23% 和

96.16%; 出水 COD 和 BOD₅ 浓度远远低于常规二级污水处理厂出水, 分别小于 20.89 mg/L 和 6.14 mg/L, 达到中水水质标准. 从监测数据还可以看出, 系统在冬季也能保持良好的 COD 和 BOD₅ 去除效果. 冬季运行期间 COD 和 BOD₅ 平均去除率分别为 91.18% 和 95.64%, 与夏季运行期间的 93.00% 和 96.53% 相比较, 去除效率只分别降低 1.82% 和 0.89%, 而且出水 COD 和 BOD₅ 浓度仍能达到中水回用标准.

与单级人工湿地相比较, 两级人工湿地系统运行效果稳定, 全年有机物去除效果保持在 90% 以上. 如前所述, 通过合理的工艺优化组合, 在二级湿地中增强了含氮化合物的硝化作用, 这样在二级湿地中 NO₃⁻ 增加, 由于 NO₃⁻ 的反硝化要消耗一定量的有机物(如下反应方程所示), 所以二级湿地在提高 NH₄⁺-N 去除效率的同时加强了有机物的去除.



2.3 SS 的去除

污水经预处理去除了大颗粒 SS, 避免了人工湿地的堵塞问题, 降低了潜流人工湿地的负荷, 有利于充分发挥人工湿地系统的功效. 该系统 SS 去除效果见表 4 和图 7.

由表 4 和图 7 可知, 人工湿地系统进水 SS 浓度

表 4 人工湿地系统 SS 去除效果

Table 4 Removal effects of SS in subsurface constructed wetland system

时间	进水/mg·L ⁻¹	一级湿地出水/mg·L ⁻¹	二级湿地出水/mg·L ⁻¹	两级湿地系统平均去除率/%
07-15 ~ 10-15	58.31 ~ 114.69	6.03 ~ 19.03	2.15 ~ 5.48	95.12
10-20 ~ 12-25	51.48 ~ 109.38	8.04 ~ 11.20	2.28 ~ 5.69	95.25

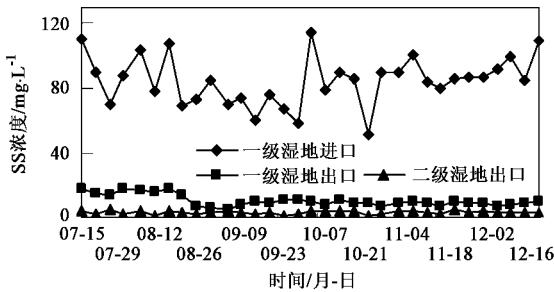


图 7 人工湿地系统 SS 去除效果

Fig.7 Removal effects of SS in subsurface constructed wetland system

在 51.48 ~ 114.69 mg/L 之间, 出水 SS 浓度小于 5.69 mg/L, 平均去除效率为 95.22%. 由于有植物根脉和

人工介质构成的“生物浮渣层”和石子构成的“过滤层”的存在, 大大增强了湿地系统对 SS 去除效率.

从表 4 可以看出, 在整个观测期内系统 SS 去除效果稳定, 其原因在于人工湿地中, SS 主要是通过过滤和吸附的途径得到去除, 而这 2 种方式基本不受人工湿地内温度波动的影响^[1].

2.4 TP 的去除

人工湿地中对磷的去除途径有: 植物的吸收, 基质的吸附、络合及与 Ca、Al、Fe 和土壤颗粒的沉淀反应, 微生物吸收利用^[25]. 该两级人工湿地系统 TP 去除效果见表 5 和图 8.

如表 5 和图 8 所示, 当进水 TP 浓度在 3.93 ~ 6.99 mg/L 时, 系统平均去除效率为 93.50%, 出水 TP

表 5 人工湿地系统 TP 去除效果

Table 5 Removal effects of TP in subsurface constructed wetland system

时间	进水/mg·L ⁻¹	一级湿地出水/mg·L ⁻¹	二级湿地出水/mg·L ⁻¹	两级湿地系统 平均去除率/%
07-15 ~ 10-15	3.93 ~ 7.21	0.90 ~ 1.65	0.22 ~ 0.45	93.37
10-20 ~ 12-25	4.29 ~ 6.99	0.93 ~ 1.67	0.25 ~ 0.42	93.56

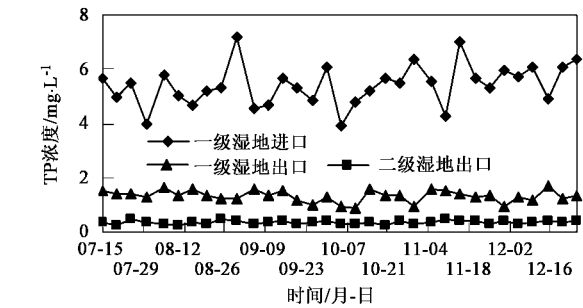


图 8 人工湿地系统 TP 去除效果

Fig.8 Removal effects of TP in subsurface constructed wetland system

浓度稳定,可以达到 0.45 mg/L 以下。

整个观测期间系统能够保持较高的 TP 去除效率,这不仅由于在湿地环境中好氧、厌氧的交替出现,实现了微生物对磷的过量积累,提高了人工湿地的除磷效果^[26,27],更主要在于人工湿地活性介质中添加了石灰石及铁矿粉等可以与 PO₄³⁻ 发生沉淀反应的物质,从而提高了 TP 去除效率^[28]。

3 结论

根据污染物在人工湿地系统中的去除机理和沿程变化,在吉林省四平市郊区构建的两级潜流人工湿地系统,可以弥补单级人工湿地 NH₄⁺-N 去除效率不高的缺点,通过使异养菌和自养菌在适合自己的最佳环境条件下充分发挥其去除污染物的能力,提高了污染物的去除效率,从而使其去污能力远大于 2 个单级人工湿地。结果表明,通过特殊活性人工介质的选用和一定的隔离保温措施,两级潜流人工湿地系统能在高寒地区高效运行,其对 COD、BOD₅、SS、NH₄⁺-N、TP 具有稳定的去除效果。整个运行期间,出水 COD、BOD₅ 和 SS 平均浓度分别为 16.01、4.27 和 4.01 mg/L,并且可以使出水 NH₄⁺-N 和 TP 浓度分别在 9.72 和 0.45 mg/L 以下,均达到中水水质标准。

参考文献:

[1] Chen T Y, Kao C M, Yeh T Y, *et al.* Application of a constructed wetland for industrial wastewater treatment: A pilot-scale study[J]. Chemosphere, 2006, **64** (3): 497 ~ 502.

[2] Vymazal J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience[J]. Ecological Engineering, 2002, **18**: 633 ~ 646.

[3] Siracusa G, La Rosa A D. Design of a constructed wetland for wastewater treatment in a Sicilian town and environmental evaluation using the emergy analysis[J]. Ecological Modeling, 2006, **197** (3-4): 490 ~ 497.

[4] Pete Muñoz, Aleksandra D, Hession C W. Flow patterns of dairy wastewater constructed wetlands in a cold climate [J]. Water Research, 2006, **40**(17): 3209 ~ 3218.

[5] Plamondon C O, Chazarenc F, Comeau Y, *et al.* Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate[J]. Ecological Engineering, 2006, **27**(3): 258 ~ 264.

[6] 维维国,王世和,黄娟,等.潜流型人工湿地低温域脱氮效果研究[J].中国给水排水,2005, **21**(8): 37 ~ 40.

[7] 李亚峰,刘佳,王晓东,等.垂直流人工湿地在寒冷地区的应用[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2006, **22**(2): 281 ~ 284.

[8] 张建,邵文生,何苗,等.潜流人工湿地处理污染河流冬季运行及升温强化处理研究[J].环境科学,2006, **27**(8): 1560 ~ 1564.

[9] 刘学燕,代明利,刘培斌.人工湿地在我国北方地区冬季应用的研究[J].农业环境科学学报,2004, **23**(6): 1077 ~ 1081.

[10] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法[M].(第三版).北京:中国环境科学出版社,2002. 210 ~ 252.

[11] Del Bubba M, Lepri L, Tabani F, *et al.* Nitrogen removal in a pilot scale subsurface horizontal flow constructed wetland [J]. Annual Chim, 2000, **90**: 513 ~ 524.

[12] 刘超翔,董春宏,李峰民,等.潜流式人工湿地污水处理系统硝化能力研究[J].环境科学,2003, **24**(1): 80 ~ 83.

[13] 顾夏声.废水生物处理数学模式[M].(第二版).北京:清华大学出版社,1993. 192 ~ 209.

[14] 贺锋,吴振斌,陶菁,等.复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用[J].环境科学,2005, **26**(1): 47 ~ 50.

[15] Schmidt I, Slickers O, Schmid M, *et al.* Aerobic and anaerobic ammonia oxidizing bacteria-competitors or natural partners[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2002, **39**(3): 175 ~ 181.

[16] 何连生,刘鸿亮,席北斗,等.人工湿地氮转化与氧关系研究 [J]. 环境科学,2006, **27**(6): 1083 ~ 1087.

[17] Sirivedhin T, Gray K A. Factors affecting denitrification rates in experimental wetlands: Field and laboratory studies[J]. Ecological Engineering, 2006, **26**(2): 167 ~ 181.

[18] Tanner C C, Kadlec R H. Oxygen flux implication of observed nitrogen removal rates in subsurface-flow treatment wetlands [J]. Water Science Technology, 2003, **48**(5): 191 ~ 198.

[19] 鄢璐, 王世和, 雒维国, 等. 运行条件下潜流型人工湿地溶氧状态研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 2009 ~ 2013.

[20] 肖海文, 邓荣森, 翟俊, 等. 溶解氧对人工湿地处理受污染城市河流水体效果的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2426 ~ 2431.

[21] Maehlum T, Stalnacke P. Removal efficiency of three cold-climate constructed wetlands treating domestic wastewater: effects of temperature, seasons, loading rates and input concentration[J]. Water Sci Technol, 1999, **40**(3): 273 ~ 281.

[22] Mander U, Kuusemets V, Oovel M, *et al.* Experimentally constructed wetlands for wastewater treatment in Estonia[J]. Environ Sci Health Part A, 2000, **35**: 1389 ~ 1401.

[23] Borner T. Factors influencing the efficiency of constructed wetlands [M]. German WAR, 1992.

[24] Maine M A, Suñe N, Hadad H, *et al.* Nutrient and metal removal in a constructed wetland for wastewater treatment from a metallurgic industry[J]. Ecological Engineering, 2006, **26**(4): 341 ~ 347.

[25] Xu D F, Xu J M, Wu J J, *et al.* Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems [J]. Chemosphere, 2006, **63**(2): 344 ~ 352.

[26] Pant H K, Reddy K R. Potential internal loading of phosphorus in a wetland constructed in agricultural land[J]. Water Research, 2003, **37**(5): 965 ~ 972.

[27] 袁东海, 景丽洁, 高士祥, 等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析[J]. 环境科学, 2005, **26**(1): 51 ~ 55.

[28] Prochaska C A, Zouboulis A I. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate[J]. Ecological Engineering, 2006, **26**(3): 293 ~ 303.