

# 石佛寺人工湿地对水体中富营养物质去除效果分析

周林飞<sup>1</sup>, 钟倩<sup>2</sup>, 王鹤翔<sup>3</sup>, 张静<sup>1</sup>

(1. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866; 2. 抚顺市水利勘测设计研究院,  
辽宁 抚顺 113000; 3. 辽宁省供水局, 沈阳 110003)

**摘要:**以石佛寺人工湿地为研究对象,通过对湿地内各项水体富营养指标监测数据的分析,研究人工湿地对辽河水中富营养物质的去除效果。结果表明:2009 年石佛寺人工湿地建成以来,水库出口处水体富营养情况明显好于湿地建成前,其中 DO 含量明显增加,有机物 COD<sub>Mn</sub>, BOD<sub>5</sub> 及营养盐 NH<sub>3</sub>-N, TN 和 TP 的含量有显著降低。辽河水流经湿地内部,部分时段水体中 DO 含量的变化率出现负值,但湿地出口处 DO 含量均达到 7.0 mg/L 以上;湿地对有机物及营养盐具有良好的去除效果,且去除效果在汛期好于非汛期,2009—2011 年的去除率均达到正值,对有机物 COD<sub>Mn</sub>, BOD<sub>5</sub> 的最大去除率分别可达到 48.3%, 65.8%, 对营养盐 NH<sub>3</sub>-N, TN 和 TP 的最大去除率分别可达到 78.1%, 88.2% 和 72.0%; 2012—2013 年部分时段的去除率出现了负值,说明随着湿地运行时间的延长,植物死亡后的腐烂分解会导致富营养物质的二次释放。

**关键词:**石佛寺人工湿地; 富营养物质; 去除率

中图分类号: X52; X173

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)06-0312-05

## Analysis on the Removal Efficiency of Eutrophic Materials in Shifosi Constructed Wetland

ZHOU Linfei<sup>1</sup>, ZHONG Qian<sup>2</sup>, WANG Hexiang<sup>3</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China; 2. Fushun Institute of Water Conservancy Survey and Design, Fushun, Liaoning 113000, China; 3. Water Supply Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

**Abstract:** We took the Shifosi constructed wetland as research site and examined the removal efficiency of eutrophic materials in this constructed wetland in Liao River by long-term monitoring of wetland water body eutrophic indexes. The result showed that the eutrophication condition of the water of the reservoir outlet was much better than that before the construction of the wetland since the construction of Shifoshi constructed wetland in 2009. Therein, the DO content increased obviously while the contents of organism COD<sub>Mn</sub>, BOD<sub>5</sub> and nutrients(NH<sub>3</sub>-N, TN and TP) decreased significantly. Liao River flows through the wetland and the change rate of DO content of the water body at some stages appeared negative but the DO content of the wetland outlets reached above 7.0 mg/L. Wetland has good removal efficiency of organism and nutrients, and the removal efficiency of flood season is better than that of non-flood season with the removal rate reaching positive value during the period from 2009 to 2011. The maximum removal rates of wetland on organism COD<sub>Mn</sub>, and BOD<sub>5</sub> reached up to 48.3% and 65.8%, respectively, and maximum removal rates of nutrients such as NH<sub>3</sub>-N, TN and TP reached up to 78.1%, 88.2% and 72.0%, respectively. The removal rates at some stages appeared negative in 2012 and 2013, which indicated that the decomposition of dead plants could lead to the secondary release of eutrophic matter with the extension of the runtime of wetland.

**Keywords:** Shifoshi constructed wetland; eutrophica substance; removal rate

水资源是人类生存和社会发展的重要自然资源之一。目前由于工业废水及生活污水的排放、农业生产中化肥农药的使用等因素,使氮、磷等营养物质在水体中不断累积,引起我国部分河流湖泊出现严重富营养化现象。水体富营养化的出现会使溶解氧量降低,水体透明度降低,严重时会导致水质恶化,水体功能丧失,鱼类及其他水生生物大量死亡,所以对水体富营养化的治理已刻不容缓。人工湿地污水处理技术开始发展于20世纪70年代,其对水体中富营养物质的去除主要依靠植物修复作用,具有低投资、低耗能等优点,近年来已经受到国内外学术界的高度重视<sup>[1-2]</sup>。人工湿地通常可分为:表面流人工湿地、潜流人工湿地以及分段布置的垂直流和水平流混合系统,其中表流人工湿地水流直接与大气接触,具有更加良好的好氧环境,对水体中富营养物质具有较好的去除效果<sup>[3]</sup>。

水体中氮、磷等营养物质的输入以及富集是导致水体富营养现象的主要因素,其来源分为外源与内源。外源氮、磷主要通过点、面源污染进入水体;内源主要是指底泥及沉积物含有一定量的氮、磷物质,可以通过溶解进入水体。水体中的有机物含量多少可用 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , $\text{BOD}_5$ 表示, $\text{BOD}_5$ 代表污水中容易生化降解的指标,它们的值越高,说明水体受有机物的污染越严重,水体的富营养现象也就越严重。而水体中的溶解氧水平会改变水中的氧化还原环境,从而影响到某些富营养物质的去除效果<sup>[4-5]</sup>,进而影响到水体的富营养化程度,因此,在研究水体中的富营养物质变化时,对溶解氧也要进行研究。

石佛寺人工湿地水的主要来源为辽河的上游来水,它汇集了周边地区排放的大量生活污水及工业废水,富集了氮、磷以及有机质等富营养物质。本文通过在湿地入口、中间、出口等处设置水质监测点,研究湿地对富营养物质的修复效果,为湿地建设与健康发展提供依据。

## 1 研究区概况与基础数据

### 1.1 研究区概况

石佛寺水库是辽河干流上唯一的大型控制性水利工程,位于辽宁省沈阳市沈北新区黄家乡和法库县依牛堡乡。石佛寺人工湿地于2009年5月建成,位于水库库区内辽河的左岸,属辽河冲积平原北部,栽植的水生植物选择易成活的荷花、芦苇和蒲草,是东北地区大型的表面流人工湿地。经过近5a的生态建设与湿地的生态自我修复及演变,湿地内生态环境不断改善,经调查水生植物种类逐年增加,鸟类也在此聚集,一个较为完善的湿地生态系统已经形成。

### 1.2 基础数据

监测点的布设:湿地内部共设4个水质监测点。监测点1是2009年湿地建成前设立的,位于湿地末端泄洪闸处;监测点2,3,4是湿地建成后设立的,分别位于湿地的进口、中部及出口。

水体富营养指标与监测频次:结合湿地内部的实际情况,选取的富营养监测指标包括溶解氧( $\text{DO}$ )、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、五日生化需氧量( $\text{BOD}_5$ )、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、总氮( $\text{TN}$ )和总磷( $\text{TP}$ )。各点的监测频次为每月1次。具体分析时将数据划分为汛期及非汛期,其中汛期为每年6—9月,非汛期为1—5月和10—12月。监测点1数据的时间序列为2005—2013年,监测点2,3,4数据的时间序列为2009—2013年。

## 2 结果与分析

### 2.1 湿地水体中富营养物质变化分析

对比分析监测点1湿地建成后(2009—2013年)与湿地建成前(2005—2008年)的监测数据,分析湿地建成前后水体中富营养物质的变化情况。图1—6为2005—2013年监测点1湿地水体中 $\text{DO}$ , $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , $\text{BOD}_5$ , $\text{NH}_3\text{-N}$ , $\text{TN}$ 和 $\text{TP}$ 的浓度变化曲线。

2.1.1  $\text{DO}$ 的变化趋势分析 从图1可以看出,在汛期及非汛期 $\text{DO}$ 的含量整体均呈上升趋势,2009年湿地建成后 $\text{DO}$ 的含量明显高于湿地建成前。说明由于水生植物量的增加,茎叶的输氧作用以及植物的光合作用等向水体中输送大量氧,使湿地水体中溶解氧浓度明显提高。2009年后汛期 $\text{DO}$ 变化范围为6.8~7.3 mg/L,非汛期为7.3~9.6 mg/L, $\text{DO}$ 含量非汛期大于汛期,一方面是由于水体中 $\text{DO}$ 的含量与气温、水温有关,在气温低的非汛期在水中的溶解量更高;另一方面说明非汛期挺水植物开始衰退,水面受植物遮挡面积减小,湿地中大量沉水植物的光合作用加强,另外在冬季水面结冰时,有的沉水植物(如菹草)也不死亡,均可使水中氧含量增加。

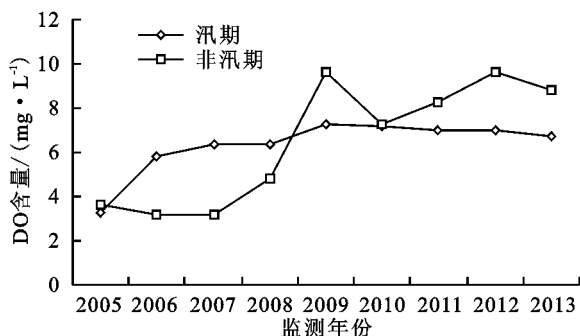


图1 监测点1的 $\text{DO}$ 浓度变化曲线

2.1.2  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , $\text{BOD}_5$ 变化趋势分析 根据图2和图3可以看出,相比于湿地建设前2005—2008年的

监测数据,湿地建设后 2009—2013 年  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  及  $\text{BOD}_5$  的含量明显降低,说明由于水生植物的恢复使湿地对有机物降解能力增强。2005—2013 年  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  及  $\text{BOD}_5$  的含量在非汛期基本都高于汛期,一是由于汛期水生植物生长旺盛,对有机物具有更好的吸收效果;二是汛期水量大,湿地内水体更新速度快,自净能力增强。石佛寺人工湿地的修建对辽河水中的有机物具有良好的修复作用。但对于汛期大水量的稀释作用,水生植物对有机物的降解作用,这两者对有机物的影响,各自所占的比重有多大,还需进行更详细与更深入的研究。

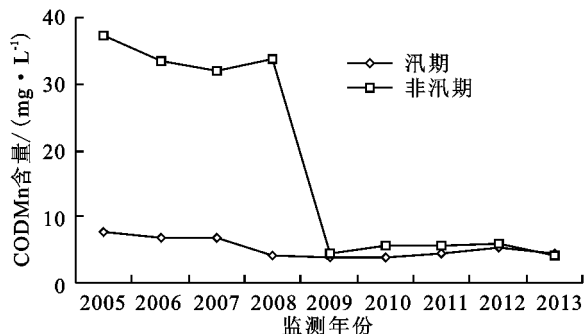


图 2 监测点 1 的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度变化曲线

由图 3 可以看出,2005—2011 年  $\text{BOD}_5$  一直呈下降趋势,但之后又有一个缓慢的上升趋势。这种上升可能是因为湿地内水生植物繁茂,腐烂分解所引起的。

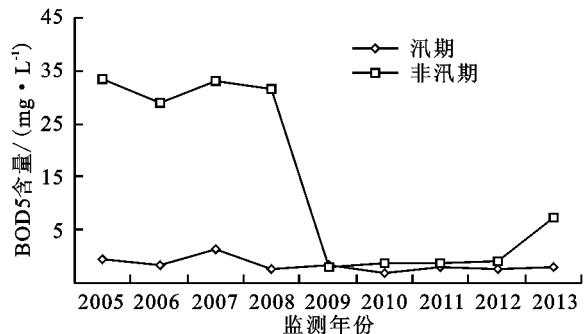


图 3 监测点 1 的  $\text{BOD}_5$  浓度变化曲线

2.1.3  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{TN}$  和  $\text{TP}$  变化趋势分析 由图 4, 图 5, 图 6 可知,2009 年湿地建成后相比于湿地建成前  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{TN}$  和  $\text{TP}$  的浓度在汛期及非汛期基本都呈降低趋势,说明湿地对此三种富营养物质具有良好的去除效果。湿地建成后的 2009—2013 年,  $\text{NH}_3\text{-N}$  的浓度在汛期及 2009—2012 年非汛期无明显变化,在 2013 年非汛期有明显升高;  $\text{TN}$  的浓度在 2009—2011 年汛期及非汛期时段呈波动变化,在 2011—2013 年呈明显上升趋势;  $\text{TP}$  的浓度在汛期及非汛期时段虽然变化趋势较小,但在 2011—2013 年略有上升趋势。石佛寺人工湿地建成后,湿地内部的挺水植物、沉水植物等对营养因子具有良好的吸附作用以及

对辽河水质的严格管理,使水体富营养现象得到改善,但随着水生植物年复一年的死亡腐烂,会释放出含氮含磷物质,已出现了二次污染现象。

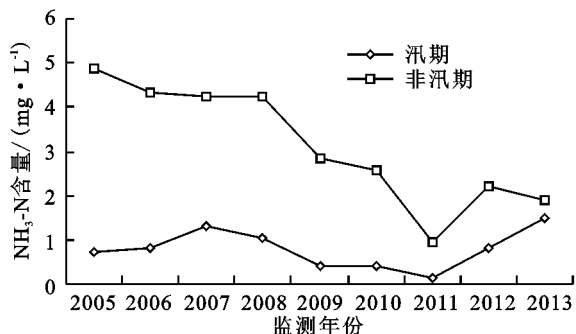


图 4 监测点 1 的  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度变化曲线

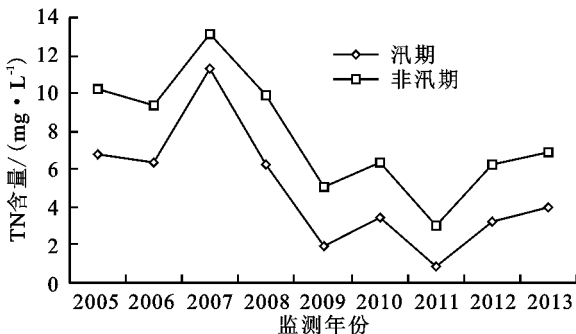


图 5 监测点 1 的  $\text{TN}$  浓度变化曲线

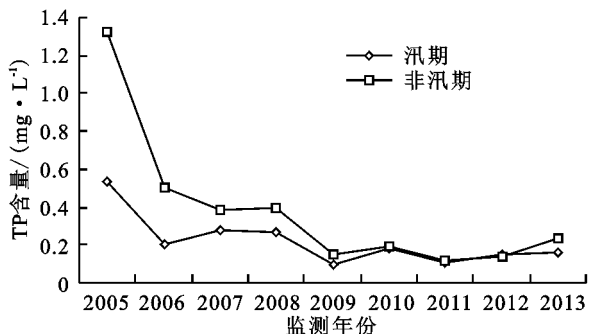


图 6 监测点 1 的  $\text{TP}$  浓度变化曲线

## 2.2 湿地对水体中富营养物质去除效果分析

为进一步分析辽河水流经湿地内部时其中富营养物质的变化情况,对湿地建成后 2009—2013 年湿地进口、中间和出口的水体富营养监测数据进行分析,监测数据及去除率见表 1。

2.2.1 水体  $\text{DO}$  的变化  $\text{DO}$  浓度的增加,可以使水体富营养化的级别降低。从表 1 可以看出,汛期  $\text{DO}$  的变化率除在 2011 年为正值,其余年份都为负值,说明从入口到出口,除 2011 年外  $\text{DO}$  浓度均降低了;非汛期 2011 年、2012 年和 2013 年变化率为正值,其余年份为负值。水体中溶解氧含量主要受到以下两方面影响:一方面为水生生物的呼吸作用及好氧有机物的降解使  $\text{DO}$  含量下降的耗氧作用,另一方面为水生植物的光合作用及空气中氧气在水中溶解量增加的复氧作用,这两方面因素互相消长,使水中溶

解氧含量产生变化。当富含有机物的辽河水流经湿地内部时,微生物对有机物的降解会消耗氧,当耗氧速度超过氧的补给速度时,水中的 DO 含量降低,因此湿地出口部分时段含氧量降低。从表 1 可以看出

湿地出口 DO 变化范围为 4.7~9.6 mg/L,水体富营养情况可达到中营养水平。水体流经过湿地后,流速增加,植被覆盖减少,复氧能力的加强,水中溶解氧的浓度也会逐渐增加。

表 1 2009—2013 年石佛寺人工湿地水体富营养监测指标变化情况

年份	监测位置	DO		COD <sub>Mn</sub>		BOD <sub>5</sub>		NH <sub>3</sub> -N		TN		TP	
		浓度	变化率	浓度	变化率	浓度	变化率	浓度	变化率	浓度	变化率	浓度	变化率
2009	湿地进口	8.9	—	5.1	—	6.8	—	0.73	—	1.7	—	0.49	—
	汛期 湿地中部	7.5	—15.7	4.5	11.8	4.3	36.8	0.61	16.4	1.2	29.4	0.41	16.3
	湿地出口	7.4	—16.9	3.1	39.2	3.6	47.1	0.16	78.1	0.2	88.2	0.14	71.4
	非汛期 湿地进口	6.4	—	15.1	—	7.7	—	3.68	—	8.5	—	0.34	—
	湿地中部	5.5	—14.1	14.6	3.3	7.5	2.6	2.88	21.7	8.4	1.2	0.28	17.6
	湿地出口	4.7	—26.6	14.4	4.6	3.6	53.2	2.79	24.2	8.2	3.5	0.24	29.4
2010	湿地进口	8.8	—	6.1	—	8.9	—	0.14	—	2.5	—	0.25	—
	汛期 湿地中部	8.5	—3.4	5.6	8.2	7.7	13.5	0.06	57.1	1.6	3.6	0.13	4.8
	湿地出口	8.3	—5.7	4.8	21.3	4.5	49.4	0.04	71.4	1.2	52	0.07	7.2
	非汛期 湿地进口	10.2	—	24.2	—	11.4	—	2.87	—	5.8	—	0.18	—
	湿地中部	9.8	—3.9	15.7	35.1	5.5	51.8	2.78	3.1	3.3	43.1	0.16	11.1
	湿地出口	8.9	—12.7	12.5	48.3	3.9	65.8	1.88	34.5	2.8	51.7	0.13	27.8
2011	湿地进口	6.2	—	5.8	—	4.7	—	0.39	—	2.8	—	0.16	—
	汛期 湿地中部	7.5	22.2	5.4	6.9	3.6	23.4	0.3	23.1	2.1	25	0.14	12.5
	湿地出口	7.0	13.5	4.5	22.4	2.8	40.4	0.12	69.2	0.9	67.9	0.11	31.3
	非汛期 湿地进口	8.9	—	6.0	—	5.1	—	1.68	—	4.4	—	0.15	—
	湿地中部	9	0.7	5.6	6.7	4.7	7.8	1.17	30.4	3.7	15.9	0.13	13.3
	湿地出口	9.3	4.1	5.5	8.3	3.9	23.5	0.96	42.9	3.0	31.8	0.12	20.0
2012	湿地进口	7.5	—	4.5	—	3.5	—	0.67	—	3.27	—	0.2	—
	汛期 湿地中部	6.9	—7.7	5.8	—28.9	2.6	27	0.52	21.5	1.67	49.1	0.13	34.2
	湿地出口	7.0	—6.3	5.4	—19.4	2.7	24.8	0.8	—20.2	3.17	3.1	0.1	45.6
	非汛期 湿地进口	9.3	—	5.1	—	3.5	—	1.7	—	6.25	—	0.12	—
	湿地中部	9.5	2.6	6.7	—32.1	4.7	—35.6	1.44	15.1	5.47	12.5	0.09	20.4
	湿地出口	9.6	3.8	5.9	—17.1	4.1	—18.6	2.2	—30.2	6.27	—3	0.14	—21.5
2013	湿地进口	7.3	—	4.5	—	3.4	—	0.63	—	3.13	—	0.11	—
	汛期 湿地中部	5.6	—22.7	5.4	19.9	3.2	—5.9	0.51	—19	2.91	—7	0.13	18.2
	湿地出口	6.8	—7.3	4.6	0.4	3	—12.7	0.36	—42.9	2.99	—4.5	0.13	18.2
	非汛期 湿地进口	8.4	—	4.4	—	2.8	—	1.61	—	6.49	—	0.13	—
	湿地中部	8.4	0.1	4.5	0.5	2.7	—1.8	1.31	—18.6	5.09	—21.6	0.12	—7.7
	湿地出口	8.8	5.5	4.2	—4.5	2.6	—5	1.38	—14.3	5.7	—12.2	0.14	7.7

注:表中浓度的单位为 mg/L,变化率的单位为 %。

2.2.2 湿地对 COD<sub>Mn</sub>,BOD<sub>5</sub> 的去除效果 从表 1 可以看出,汛期时段,COD<sub>Mn</sub>从湿地的进口到中部、进口到出口的去除率(除 2012 年外),均为正值;非汛期时段,COD<sub>Mn</sub>的去除率(除 2012 年和 2013 年外),均为正值。汛期时段,BOD<sub>5</sub> 从湿地的进口到中部、进口到出口的去除率(除 2013 年外),均为正值;非汛期时段,BOD<sub>5</sub> 去除率(除 2012 年和 2013 年外),均为正值。

湿地中有机物的去除主要是依靠植物吸收、微生物

物代谢以及植物根部的微环境物理截流沉淀作用。从以上数据可以看出 2009—2011 年,石佛寺人工湿地对有机物 COD<sub>Mn</sub>,BOD<sub>5</sub> 的去除效果在汛期及非汛期都十分明显,部分时段的去除率可达到 30%以上,且整体上汛期时段的去除效果好于非汛期时段。一方面说明非汛期仍有部分沉水植物不会死亡,使湿地在非汛期对有机物同样具有良好的去除效果,另一方面说明北方地区汛期为植物的生长期,且温度高雨量大,发达的植物根系具有更好的吸附、吸收作用,微生物

物的活性高也会加强生物的代谢降解作用,因此相比于非汛期,湿地在汛期对有机物的去除效果更好。

在2012年和2013年 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 及 $\text{BOD}_5$ 的去除率出现负值,这两年间 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的浓度值处于4.2~6.7 mg/L, $\text{BOD}_5$ 的浓度值处于2.6~4.7 mg/L,与2011年相比略有降低,说明近年来对辽河水的治理使水体富营养现象得到明显改善,同时也可以看出,随着湿地运行时间的延长,内源污染的产生使水体自净能力减弱,若不能加强对湿地内部植物的管理,会影响湿地对有机物的去除效果。

**2.2.3 湿地对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP的去除效果** 根据表1知, $\text{NH}_3\text{-N}$ 从湿地的进口到中部、进口到出口的去除率(除2012年和2013年外),均为正值。TN从湿地的进口到中部、进口到出口,汛期时段(除2013年外),均为正值;非汛期时段(除2012年和2013年外),均为正值。TP从湿地的进口到中部、进口到出口,去除率均为正值;非汛期时段(除2012年和2013年外),均为正值。

湿地对营养盐的去除主要通过植物的吸收、硝化与反硝化作用、微生物降解和挥发作用、基质的吸附过滤等物理化学作用等几方面协同完成的。从以上数据可以看出,湿地内部营养盐在同年非汛期时段的浓度均高于汛期时段的浓度,而且在汛期具有更高的去除率。主要原因是汛期为植物的生长期且温度较高,水体中的营养盐不仅可以作为植物及微生物的营养成分被直接吸收,而且硝化及反硝化作用的增强也会加强对营养盐的去除效果。

在2012年和2013年湿地内部 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP的去除率出现了负值,说明石佛寺人工湿地自建成以来已稳定运行了5 a,随着水生植物年复一年的生长凋落,湿地中积累了大量的营养物质,这些营养物质不仅会消耗水中的溶解氧含量,降低湿地对营养盐的去除效果,而且会造成营养物质向水体再释放,造成二次污染。因此要加强水生植物腐败后的管理,做到及时收割并定期去除湿地表层植被凋落物,防止二次污染。

### 3 结论

自2009年石佛寺人工湿地建成以来,水库出口

处水体富营养情况明显好于湿地建成前。 $\text{DO}$ 含量明显增加,有机物 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 及营养盐 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP的含量有显著降低,说明石佛寺人工湿地对水体中的富营养物质具有一定的净化效果,使水库水质得到明显改善。

石佛寺人工湿地建成后2009—2013年,虽然部分时段水体中 $\text{DO}$ 含量的变化率出现负值,但湿地出口处 $\text{DO}$ 含量均达到了7.0 mg/L以上。石佛寺人工湿地对有机物及营养盐具有良好的去除效果,且去除效果在汛期好于非汛期,2009—2011年的去除率均达到正值,对有机物 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 的最大去除率分别可达到48.3%,65.8%,对营养盐 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP的最大去除率分别可达到78.1%,88.2%和72.0%;2012年、2013年部分时段的去除了负值,说明二次污染现象已经出现。

湿地中的水生植物能有效去除湿地水体中的富营养物质,提高湿地内部的自净能力,然而北方地区冬季寒冷,多数植物死亡后腐烂分解,会导致富营养物质向水和底泥中再释放。因此,如何控制内源性污染,如何采取措施增强人工湿地对富营养物质的去除效果是今后研究的重点。

#### 参考文献:

- [1] 闫然,冯雨顺,岑澎. 水体富营养化污染现状及防治对策[J]. 企业导报,2013(2):266-267.
- [2] 何娜,张玉龙,孙占祥,等. 水生植物修复氮磷污染水体研究进展[J]. 环境污染与防治,2012,34(3):73-78.
- [3] 卢少勇,金相灿,余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报,2006,26(8):2670-2677.
- [4] 程丽巍,许海,陈铭达,等. 水体富营养化成因及其防治措施研究进展[J]. 环境保护科学,2007,33(1):18-21.
- [5] 崔丽娟,张曼胤,李伟,等. 人工湿地处理富营养化水体的效果研究[J]. 生态环境学报,2010,19(9):2142-2148.
- [6] 林文周,李莹莹. 人工湿地在水体富营养化治理中的应用[J]. 市政技术,2012(4):98-111.
- [7] 金卫红,付融冰,顾国维. 人工湿地中植物生长特性及其对TN和TP的吸收[J]. 环境科学研究,2007,20(3):75-80.
- [8] 马井泉,周怀东,董哲仁. 水生植物对氮和磷去除效果的试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,3(2):130-134.