

# 石佛寺人工湿地水体富营养化评价与分析

周林飞<sup>1</sup>, 钟倩<sup>1</sup>, 董福君<sup>2</sup>

(1. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866; 2. 辽宁石佛寺水库管理局, 沈阳 120003)

**摘要:**采用灰色聚类法并选定 DO, COD<sub>Mn</sub>, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>3</sub>-N, TN 和 TP 为聚类指标, 对石佛寺人工湿地水体富营养化进行综合评价。结果表明:石佛寺人工湿地水质状况较好, 对供水无影响, 可保证安全供水。建湿地后与建湿地前相比水体富营养化程度有所降低, 但并不明显。汛期水体富营养级别高于非汛期, 这主要是因为汛期来水量大, 所带入的营养物质多, 加上农作物生长季节化肥、农药等的施用, 使流域内大量的氮、磷等营养盐随地表径流汇入湿地内, 提高了湿地内氮、磷等的含量。防止水体富营养化的主要措施为:及时收割水生植物, 防止二次污染;控制流域内点源和面源污染。

**关键词:**灰色聚类法; 水体富营养化; 评价; 石佛寺人工湿地

**中图分类号:** X824

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2015)01-0299-06

## Evaluation and Analysis on the Eutrophication of Shifosi Constructed Wetland

ZHOU Linfei<sup>1</sup>, ZHONG Qian<sup>1</sup>, DONG Fujun<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources, Shenyang Agricultural University,

Shenyang 110866, China; 2. Shifosi Reservoir Management Bureau of Liaoning, Shenyang 120003, China)

**Abstract:** The grey clustering method was used, and DO, COD<sub>Mn</sub>, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>3</sub>-N, TN and TP were selected as clustering indicators, the comprehensive evaluation on Shifosi Constructed Wetland eutrophication was carried out. The results show that the water quality status of Shifosi constructed wetland is good and has no effect on water supply, the safety of water quality can be ensured. The degree of the eutrophication after construction of wetland is lower than the that before construction of wetland, but the difference is not significant. The water eutrophication level in flood season is higher than that in non-flood season because the inflow rate is larger in flood season, more nutrients are brought into the wetland, and application of chemical fertilizer and pesticide in the crop growth season makes a large amount of N, P and other nutrients within basins move into the wetland along with the surface runoff, increasing the contents of N, P and other nutrients of the wetland. So harvesting the aquatic plants timely to prevent the secondary pollution and control of point source pollution and non-point source pollution should be regarded as the main measures to prevent eutrophication.

**Keywords:** grey clustering method; water eutrophication; evaluation; Shifosi Constructed Wetland

湿地是位于陆生和水生生态系统之间的过渡性地带, 是地球生态环境的重要组成部分, 具有强大的沉积和净化作用, 因此被誉为“地球之肾”。当水流入湿地之后, 水中的部分污染物会随着泥沙的沉积而沉积, 湿地植物也能有效吸收水中的污染物质, 达到净化水质的目的。人工湿地是人工建造并控制其运行的湿地, 与天然湿地相比, 更有利于管理和控制。人工湿地不仅对有机物有较强的降解能力, 对水中的富

营养物质也有一定的去除效果<sup>[1]</sup>。但由于人工湿地内部水流缓慢、输入水流营养盐过剩、沉积到底泥中的营养盐向水体中的再释放、水生植物不适当管理以致腐解后释放营养盐等原因, 容易引起湿地内水体富营养化, 使其各种功能下降。因此, 对人工湿地内水体富营养化状况进行监测、评价至关重要。水体富营养化评价是建立在对水质监测基础上的, 目前水体富营养化的主要评价方法有:单一参数法、综合指数法、

收稿日期: 2014-03-13

修回日期: 2014-04-08

资助项目: 辽宁省水利科技指导性计划项目(2012); 国家自然科学基金面上项目(50979012)

第一作者: 周林飞(1971—)女, 吉林长春人, 副教授, 博士, 主要从事河流及湿地水环境研究。E-mail: zlf924@163.com

通信作者: 钟倩(1989—), 女, 辽宁抚顺人, 硕士研究生, 研究方向: 河流及湿地水环境研究。E-mail: 1012244574@qq.com

普通概率统计法、主成分分析法、模糊评价法、灰色评价法和热力学分析法等<sup>[2]</sup>。由于水质监测数据都是在有限的时间和空间范围内得到的,具有不完全性和不确定性,符合灰色系统的特征<sup>[3-4]</sup>,因此本文采用灰色聚类法对石佛寺人工湿地进行水体富营养化评价。

## 1 研究区概况

石佛寺水库位于沈阳市沈北新区黄家乡和法库县依牛堡乡境内,距沈阳市区 47 km,是辽河干流上唯一的一座大型控制水利工程。石佛寺人工湿地建于 2009 年 5 月,位于库区内辽河的左岸,种植的水生植物主要包括芦苇、蒲草和荷花。经过几年的发展,新的水生植物不断出现,已经形成了一个较为完善的湿地生态系统,水生植物与整个库区水面共同构成了东北地区大型的表面流人工湿地,总面积 25.05 km<sup>2</sup>。石佛寺人工湿地处于辽河冲积平原北部,其主要来水为上游的辽河水,由于辽河汇集了周边地区排放的大量生活用水及工业废水,当河水流经水库后,易导致污染物在湿地内富集,造成水体富营养化。而且水生植物年复一年的腐解、释放氮、磷等营养物质,也有可能引起水体的富营养化。

## 2 研究方法

### 2.1 监测点的布设与监测指标

湿地内共布设 4 个监测点,监测点 1 位于湿地末端的控制性建筑物泄洪闸处,属于湿地的末端,是 2009 年人工湿地修建前设立的;监测点 2,3,4 是 2009 年人工湿地建成后,为监测湿地内的水质变化而设立的,分别位于湿地的进口、中间和出口,如图 1 所示。监测指标包括溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TN)和总氮(TP)等。



图 1 石佛寺人工湿地水质监测点布置

### 2.2 按聚类指标所属灰类确定白化权函数

本文将水体富营养化程度划分为 6 个等级,则有 6 个灰类。记函数  $f_j^k$  为第  $j$  个污染指标对于第  $k$  个灰类的白化权函数,  $f_j^k(x) \in [0, 1]$ ;  $x$  为各水体富营养化指标的实测值;  $\lambda_j^k$  为白化权函数的阈值,由各级

水体富营养化标准值确定。则第  $j$  个污染指标对第 1 级水的白化函数  $f_j^1(x)$  见式(1),第  $j$  个污染指标对第  $k$  级水的白化函数  $f_j^k(x)$  见式(2),第  $j$  个污染指标对第 6 级水的白化函数  $f_j^6(x)$  见式(3)。由于 DO 与其他富营养指标不同,数值越大,水体富营养化程度越低。其白化函数见式(4)~(6)。

$$f_j^1 = \begin{cases} 1 & x \in [0, \lambda_j^1] \\ \frac{\lambda_j^2 - x}{\lambda_j^2 - \lambda_j^1} & x \in (\lambda_j^1, \lambda_j^2) \\ 0 & x \in [\lambda_j^2, \infty) \end{cases} \quad (1)$$

$$f_j^k = \begin{cases} \frac{x - \lambda_j^{k-1}}{\lambda_j^k - \lambda_j^{k-1}} & x \in (\lambda_j^{k-1}, \lambda_j^k] \\ \frac{\lambda_j^{k+1} - x}{\lambda_j^{k+1} - \lambda_j^k} & x \in (\lambda_j^k, \lambda_j^{k+1}) \\ 0 & x \in [0, \lambda_j^{k-1}] \cup [\lambda_j^{k+1}, \infty) \end{cases} \quad (2)$$

$$f_j^6 = \begin{cases} 0 & x \in [0, \lambda_j^5] \\ \frac{x - \lambda_j^5}{\lambda_j^6 - \lambda_j^5} & x \in (\lambda_j^5, \lambda_j^6) \\ 1 & x \in [\lambda_j^6, \infty) \end{cases} \quad (3)$$

$$f_j^1 = \begin{cases} 1 & x \in [\lambda_j^1, \infty) \\ \frac{\lambda_j^2 - x}{\lambda_j^2 - \lambda_j^1} & x \in (\lambda_j^2, \lambda_j^1) \\ 0 & x \in [0, \lambda_j^2] \end{cases} \quad (4)$$

$$f_j^k = \begin{cases} \frac{\lambda_j^{k+1} - x}{\lambda_j^{k+1} - \lambda_j^k} & x \in (\lambda_j^{k+1}, \lambda_j^k] \\ \frac{x - \lambda_j^{k-1}}{\lambda_j^k - \lambda_j^{k-1}} & x \in (\lambda_j^k, \lambda_j^{k-1}) \\ 0 & x \in [0, \lambda_j^{k+1}] \cup [\lambda_j^{k-1}, \infty) \end{cases} \quad (5)$$

$$f_j^6 = \begin{cases} 1 & x \in [0, \lambda_j^6] \\ \frac{x - \lambda_j^5}{\lambda_j^6 - \lambda_j^5} & x \in (\lambda_j^6, \lambda_j^5) \\ 0 & x \in [\lambda_j^5, \infty) \end{cases} \quad (6)$$

### 2.3 数据的量纲一化处理

在水质富营养化评价中,由于各聚类指标量级不同,单位不同,因此不能直接进行计算,必须事先对其进行量纲一化处理<sup>[5]</sup>。设  $r_j^k$  为第  $j$  个污染指标对第  $k$  个灰类的无量纲数,其计算公式为:

$$r_j^k = \frac{S_j^k}{S_j^0} \quad (7)$$

### 2.4 确定聚类权

聚类权是衡量各聚类指标对同一灰类的权重。本文采用倒数法计算聚类权<sup>[6]</sup>。设  $\eta_j^k$  为第  $j$  个污染指标对第  $k$  个灰类的权重,  $r_j^k$  为第  $j$  个污染指标对第  $k$  个灰类的阈值,其计算公式为:

$$\eta_j^k = \frac{\lambda_j^k}{\sum \lambda_j^k} \quad (8)$$

2.5 确定聚类系数

聚类系数是由白化函数生成得到的,反映了聚类样本与灰类间的相关程度<sup>[7]</sup>。设  $\sigma_j^k$  为第  $i$  个聚类样本对第  $k$  个灰类的聚类系数,其计算公式为:

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \cdot \eta_j^k \tag{9}$$

2.6 构造聚类向量并确定所属灰类

设聚类向量  $\sigma_i = (\sigma_i^1, \sigma_i^2, \dots, \sigma_i^k)$ 。采用陈守煜<sup>[8]</sup>提出的级别特征值作为判定所属灰类的标准。设  $c$  为水体富营养化分的级数,  $H$  为级别特征值,级别特征值见式(10)。

$$H = (1, 2, \dots, c) \cdot (\sigma_i^1, \sigma_i^2, \dots, \sigma_i^k) \tag{10}$$

3 人工湿地水体富营养化评价

3.1 监测数据与富营养化分级标准

监测点 1 位于整个湿地的末端,将其 2005—2008 年的评价结果与 2009—2012 年的评价结果进行对比,分析湿地建成前后水体富营养化的变化情况。监测点 2,3,4 分别位于湿地的进口、中间和出口处,对 2009—2012 年湿地进口、中间、出口的水质进行富营养化评价,为湿地的管理与建设提供科学的依据。

选取的水体富营养监测指标有溶解氧(DO)、高

锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TN)和总氮(TP)。参考湖泊富营养化分级标准<sup>[9]</sup>并结合湿地实际情况,将水体富营养化程度分为 6 个等级,具体见表 1。各级的用水障碍情况如下:1 级为贫营养,2 级为贫中营养,3 级为中营养,此三种营养状态不会引起用水障碍情况的出现;4 级为中富营养,此营养状态下局部出现水花,对供水产生影响;5 级为富营养,此营养状态下会出现大面积水花,导致供水障碍,鱼类缺氧死亡,严重影响观瞻;6 级为重富营养,此营养状态下全水面出现水花,大量死鱼出现,严重影响养殖,以及观瞻。

3.2 数据的量纲一化处理

为了消除量纲对评价结果的影响,利用公式(7)对各项分级标准及各项监测结果进行量纲一化处理,结果见表 2—4。

3.3 确定聚类权

在灰色聚类评价中,考虑到各指标的高低不同,以及在总评价中所起到的作用不同,因此需要对各评价指标给予聚类权重<sup>[10]</sup>。本文所采用的方法是倒数法,该方法所确定的聚类权为变权重,即不同的营养级别对应不同的聚类权。将表 2 中数据代入式(8),计算得到各指标所对应的各级的聚类权,如表 5 所示。

表 1 石佛寺人工湿地富营养化分级标准

评价指标	1 级(贫营养)	2 级(贫中营养)	3 级(中营养)	4 级(中富营养)	5 级(富营养)	6 级(重富营养)
DO/(mg · L <sup>-1</sup> )	30	16.5	10	4	3	1
COD <sub>Mn</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	0.3	0.4	2	4	10	25
BOD <sub>5</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	0.3	1.2	2.8	6.6	12	30
NH <sub>3</sub> -N/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.015	0.055	0.2	0.65	1.5	5
TN/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.03	0.05	0.3	0.5	2	6
TP/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.0025	0.005	0.025	0.05	0.2	0.6

表 2 量纲一化石佛寺人工湿地富营养化分级标准

评价指标	1 级(贫营养)	2 级(贫中营养)	3 级(中营养)	4 级(中富营养)	5 级(富营养)	6 级(重富营养)
DO/(mg · L <sup>-1</sup> )	2.791	1.535	0.930	0.372	0.279	0.093
COD <sub>Mn</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	0.043	0.058	0.288	0.576	1.439	3.597
BOD <sub>5</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	0.034	0.136	0.318	0.749	1.361	3.403
NH <sub>3</sub> -N/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.012	0.044	0.162	0.526	1.213	4.043
TN/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.020	0.034	0.203	0.338	1.351	4.054
TP/(mg · L <sup>-1</sup> )	0.017	0.034	0.170	0.340	1.360	4.079

表 3 2005—2012 年监测点 1 量纲一化富营养化监测数据

聚类指标	2005 年		2006 年		2007 年		2008 年		2009 年		2010 年		2011 年		2012 年	
	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期
DO	0.307	0.335	0.540	0.298	0.595	0.298	0.595	0.447	0.679	0.893	0.670	0.679	0.651	0.772	0.651	0.893
COD <sub>Mn</sub>	1.108	5.381	0.978	4.806	0.964	4.619	0.604	4.878	0.576	0.619	0.561	0.791	0.647	0.791	0.777	0.849
BOD <sub>5</sub>	0.510	4.355	0.397	3.834	0.726	4.333	0.284	4.140	0.363	0.340	0.204	0.442	0.318	0.442	0.306	0.465
NH <sub>3</sub> -N	0.598	3.930	0.655	3.493	1.067	3.429	0.857	3.412	0.315	2.288	0.340	2.062	0.097	0.776	0.647	1.787
TN/	4.595	6.892	4.324	6.351	7.635	8.851	4.189	6.689	1.284	3.446	2.297	4.324	0.608	2.027	2.162	4.257
TP	3.603	8.975	1.360	3.399	1.904	2.584	1.836	2.720	0.680	1.020	1.224	1.292	0.748	0.816	1.020	0.952

表 4 2009—2012 年监测点 2,3,4 量纲一化富营养化监测数据

								mg/L
时间	聚类对象	DO	COD <sub>Mn</sub>	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> —N	TN	TP	
2009 年	进口		0.828	0.734	0.771	0.590	1.149	3.331
	汛期	中部	0.698	0.647	0.488	0.493	0.811	2.788
		出口	0.688	0.446	0.408	0.129	0.135	0.952
	非汛期	进口	0.595	2.173	0.873	2.976	5.743	2.312
		中部	0.512	2.101	0.851	2.329	5.676	1.904
		出口	0.437	2.072	0.408	2.256	5.541	1.632
2010 年	进口		0.819	0.878	1.009	0.113	1.689	1.700
	汛期	中部	0.791	0.806	0.873	0.049	1.081	0.884
		出口	0.772	0.691	0.510	0.032	0.811	0.476
	非汛期	进口	0.949	3.482	1.293	2.321	3.919	1.224
		中部	0.912	2.259	0.624	2.248	2.230	1.088
		出口	0.828	1.799	0.442	1.52	1.892	0.884
2011 年	进口		0.577	0.835	0.533	0.315	1.892	1.088
	汛期	中部	0.698	0.777	0.408	0.243	1.419	0.952
		出口	0.651	0.647	0.318	0.097	0.608	0.748
	非汛期	进口	0.828	0.863	0.578	1.358	2.973	1.020
		中部	0.837	0.806	0.533	0.946	2.500	0.844
		出口	0.865	0.791	0.442	0.776	2.027	0.816
2012 年	进口		0.698	0.647	0.397	0.542	2.209	1.360
	汛期	中部	0.642	0.835	0.295	0.42	1.128	0.884
		出口	0.651	0.777	0.306	0.647	2.142	0.68
	非汛期	进口	0.865	0.734	0.397	1.375	4.223	0.186
		中部	0.884	0.964	0.533	1.164	3.696	0.612
		出口	0.893	0.849	0.465	1.779	4.236	0.952

表 5 各灰类中各项评价指标的聚类权(η<sup>k</sup>)

评价指标	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级
DO	0.001	0.006	0.044	0.198	0.490	0.891
COD <sub>Mn</sub>	0.095	0.163	0.141	0.128	0.095	0.023
BOD <sub>5</sub>	0.121	0.069	0.127	0.098	0.100	0.024
NH <sub>3</sub> -N	0.339	0.210	0.250	0.140	0.113	0.021
TN	0.203	0.277	0.200	0.218	0.101	0.020
TP	0.242	0.275	0.238	0.217	0.101	0.020

3.4 确定聚类系数

将表 3 和表 4 中量纲一化后的富营养化监测数据代入各自的白化函数中,得出白化函数值。将表 5 中各项评价指标的聚类权以及得出的白化函数值代入公式(9) 得出聚类系数。由于最大隶属原则存在不适用性,因此利用式(10)分别计算级别特征值  $H$ ,根据级别特征值,确定各评价对象所属的评价级别,并对各评价对象水体是否存在用水障碍进行判定,如表 6 和表 7 所示。

4 评价结果分析

4.1 湿地水体整体富营养化状况分析

由表 6 可以看出,监测点 1 的最终评价结果除 2005 年和 2011 年汛期级别特征值分别为 3.699 和 3.414,属于中偏中富营养之外,其余均为 2 级(贫中

营养)和 3 级(中营养),以及 1 级(贫营养)和 2 级(贫中营养)之间、2 级(贫中营养)和 3 级(中营养)之间;由表 7 可以看出,监测点 2,3,4 的最终评价结果,除 2011 年汛期出口处级别特征值为 3.414,属于中偏中富营养之外,其余均为 1 级(贫营养)—3 级(中营养)。由此看来,石佛寺人工湿地水质状况较好,对供水无影响,可保证安全供水,对生存于其中的鱼类亦无影响,这与石佛寺人工湿地的实地调查结果及以往相关资料是一致的。

4.2 湿地对水体富营养化的影响分析

从表 6 监测点 1 的评价结果来看,湿地建成后与湿地建成前相比水体富营养化程度有所降低,但并不明显。从监测点 2(湿地进口)、监测点 3(湿地中部)、监测点 4(湿地出口)的水体富营养化评价结果来看,差别并不大,一方面说明水体富营养化程度低,另一方面说明这种综合评价方法反映的是水体富营养化的综合情况,并不能反映对单个营养物质的去除程度。要想明确石佛寺人工湿地对各营养盐的去除效果,还须对其进行具体分析。

4.3 汛期与非汛期水体富营养化状况比较

从 4 个监测点的评价结果总体看来,汛期的水体富营养级别高于非汛期,一方面是因为汛期来水量

大,所带入的营养物质多,另一方面是因为汛期也是量的氮、磷等营养盐随地表径流汇入湿地内,提高了农作物生长的季节,化肥、农药等的施用使流域内大湿地内氮、磷等的含量。

表 6 2005—2012 年监测点 1 水体富营养化评价结果

评价时间	1 级 (贫营养)	2 级 (贫中营养)	3 级 (中营养)	4 级 (中富营养)	5 级 (富营养)	6 级 (重富营养)	特征值 (H)	评价结果	用水障 碍情况	
2005 年	汛期	0	0	0.07	0.278	0.431	0.037	3.699	中偏中富营养	无
	非汛期	0	0	0	0.119	0.2	0.107	2.118	贫中营养	无
2006 年	汛期	0	0	0.117	0.338	0.167	0.02	2.658	贫中偏中营养	无
	非汛期	0	0	0	0.04	0.437	0.099	2.939	中营养	无
2007 年	汛期	0	0	0.024	0.312	0.212	0.024	2.524	贫中偏中营养	无
	非汛期	0	0	0	0.04	0.47	0.092	3.062	中营养	无
2008 年	汛期	0	0.013	0.121	0.315	0.141	0.024	2.498	贫中偏中营养	无
	非汛期	0	0	0.006	0.171	0.076	0.093	1.64	贫偏贫中营养	无
2009 年	汛期	0	0	0.283	0.445	0.128	0	3.269	中营养	无
	非汛期	0	0	0.162	0.212	0.165	0.023	2.297	贫中营养	无
2010 年	汛期	0	0.043	0.206	0.311	0.153	0.007	2.755	中营养	无
	非汛期	0	0	0.115	0.228	0.197	0.026	2.398	贫中营养	无
2011 年	汛期	0	0.116	0.261	0.506	0.075	0	3.414	中偏中富营养	无
	非汛期	0	0	0.122	0.385	0.188	0.005	2.876	中营养	无
2012 年	汛期	0	0.005	0.141	0.385	0.18	0.006	2.909	中营养	无
	非汛期	0	0	0.125	0.221	0.181	0.024	2.308	贫中营养	无

表 7 2009—2012 年监测点 2,3,4 水体富营养化评价结果

评价时间	1 级 (贫营养)	2 级 (贫中营养)	3 级 (中营养)	4 级 (中富营养)	5 级 (富营养)	6 级 (重富营养)	特征值 (H)	评价结果	用水障 碍情况	
2009 年	汛期进口	0	0	0.036	0.406	0.14	0.015	2.522	贫中偏中营养	无
	汛期中部	0	0	0.125	0.482	0.103	0.011	2.884	中营养	无
	汛期出口	0	0.17	0.489	0.263	0.061	0	3.164	中营养	无
	非汛期进口	0	0	0.018	0.197	0.191	0.048	2.085	贫中营养	无
	非汛期中部	0	0	0.011	0.23	0.232	0.039	2.347	贫中营养	无
	非汛期出口	0	0	0.106	0.196	0.229	0.036	2.463	贫中偏中营养	无
2010 年	汛期进口	0	0.087	0.181	0.179	0.253	0.005	2.728	中营养	无
	汛期中部	0	0.201	0.044	0.381	0.174	0	2.928	中营养	无
	汛期出口	0.127	0.131	0.102	0.515	0.073	0	3.120	中营养	无
	非汛期进口	0	0	0.043	0.04	0.255	0.049	1.858	贫中营养	无
	非汛期中部	0	0	0.079	0.134	0.273	0.023	2.276	贫中营养	无
	非汛期出口	0	0	0.126	0.166	0.315	0.01	2.677	贫中偏中营养	无
2011 年	汛期进口	0	0.035	0.225	0.332	0.183	0.004	3.012	中营养	无
	汛期中部	0	0	0.32	0.319	0.181	0.001	3.147	中营养	无
	汛期出口	0	0.116	0.261	0.506	0.075	0	3.414	中偏中富营养	无
	非汛期进口	0	0	0.086	0.253	0.247	0.013	2.583	贫中偏中营养	无
	非汛期中部	0	0	0.1	0.332	0.206	0.009	2.712	中营养	无
	非汛期出口	0	0	0.129	0.352	0.188	0.005	2.765	中营养	无
2012 年	汛期进口	0	0	0.129	0.355	0.18	0.006	2.743	中营养	无
	汛期中部	0	0.009	0.205	0.44	0.161	0	3.198	中营养	无
	汛期出口	0	0.005	0.141	0.457	0.147	0.006	3.032	中营养	无
	非汛期进口	0	0	0.143	0.261	0.171	0.021	2.454	贫中偏中营养	无
	非汛期中部	0	0	0.104	0.305	0.188	0.017	2.574	贫中偏中营养	无
	非汛期出口	0	0	0.125	0.221	0.181	0.024	2.308	贫中营养	无

#### 4.4 水体富营养化防治分析

在监测点1的评价结果中,处于中偏中富营养的有2个,处于3级(中营养)的有6个;在监测点2,3,4的评价结果中,处于中偏中富营养的有1个,处于3级(中营养)的有12个。虽然整体水质较好,不会出现供水障碍、影响鱼类生存等现象,但也应密切关注湿地内水体营养盐的变化情况,防止其富营养等级向4级(中营养)过渡,以确保用水安全,保证湿地生态系统的健康发展。

人工湿地对营养盐具有去除效果,主要是因为湿地内水生植物对营养物质的吸附作用,但水生植物生长长期过后腐解也会导致营养物质的再释放,即二次污染。如表7所示,2011年汛期出口处营养级别比进口处稍有提高,可能是由二次污染引起的。因此应加强对水生植物的管理,秋季要对其进行收割,带走营养物质。此外,要控制点源污染及面源污染。

## 5 结论

合理的水体富营养化评价是对石佛寺人工湿地进行管理与治理的前提条件。将灰色聚类法应用于湿地水体富营养化评价中,建立湿地水环境综合评价模型,不仅考虑到了水体富营养化程度的灰色性,也考虑到了系统的白化性。评价结果科学、客观地反映了石佛寺人工湿地水体富营养化程度。

从监测点1,2,3,4的评价结果来看,除有3个处于中偏中富营养之外,其他均处于1—3级,说明水质状况良好,不影响供水及鱼类生存。灰色聚类法反映的是水体富营养化的综合情况,并不能反映湿地对

氮、磷等营养盐去除效果的细节,明晰细节变化还需对各指标做单独分析。对于汛期水体富营养级别高于非汛期,是因为农田施肥后,营养物质随径流进入湿地内部引起的。防止石佛寺人工湿地水体富营养化措施:及时对水生植物进行收割防止二次污染;控制流域内面源及点源污染。

#### 参考文献:

- [1] 熊飞,李文朝,潘继征,等.人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展[J].湿地科学,2005,3(3):228-234.
- [2] 周林飞,谢立群,周林林,等.灰色聚类法在湿地水体富营养化评价中的应用[J].沈阳农业大学学报,2005,36(5):594-598.
- [3] 王辉,周林飞,康萍萍,等.基于灰色聚类法的大凌河水环境质量综合评价[J].人民黄河,2011,33(9):74-76.
- [4] 胡丽慧,潘安,李铁松,等.灰色聚类法在升钟水库水体富营养化评价中的应用[J].农业环境科学学报,2008,27(6):2407-2412.
- [5] 慕金波,侯克复.灰色聚类在水环境质量评价中的应用[J].环境科学,1990,12(2):86-90.
- [6] 庞博,李玉霞,童玲.基于灰色聚类法和模糊综合法的水质评价[J].环境科学与技术,2011,34(11):185-188.
- [7] 付利华,朱百鸣.用灰色聚类法评价大气环境质量[J].环境与开发,1994,9(4):358-361.
- [8] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998:24-31.
- [9] 李祚泳,汪嘉杨,金相灿,等.基于进化算法的湖泊富营养化投影追踪回归预测模型[J].四川大学学报:工程科学版,2007,39(2):1-8.
- [10] 周林飞,高云彪,许士国.模糊数学在湿地水质评价中应用的研究[J].水利水电技术,2005,36(1):35-38.

(上接第298页)

- [9] Gerbens-Leenes P W, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The water footprint of poultry, pork and beef: a comparative study in different countries and production systems[J]. Water Resources and Industry,2013,1:25-36.
- [10] Vanham D, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The water footprint of the EU for different diets[J]. Ecological Indicators,2013,32:1-8.
- [11] 秦丽杰,靳英华,段佩利,等.吉林省西部玉米生产水足迹研究[J].地理科学,2012,32(8):1020-1024.
- [12] 邢海虹.基于GIS的陕南水源区农产品虚拟水空间差异分析[J].水土保持研究,2013,20(5):301-304.
- [13] 邵帅.基于水足迹模型的水资源补偿策略研究[J].科技进步与对策,2013,30(14):116-119.
- [14] 邓晓军,谢世友,崔天顺,等.南疆棉花消费水足迹及其对生态环境影响研究[J].水土保持研究,2009,16(2):176-185.
- [15] 龙爱华,张志强,徐中民,等.甘肃省水资源足迹与消费模式分析[J].水科学进展,2005,16(3):419-424.
- [16] 孙才志,刘玉玉,陈丽新,等.基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局[J].生态学报,2010,30(5):1312-1321.
- [17] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water footprints of nations[C]. Delft, the Netherlands: Value of Water Research Report Series: No. 16. IHE,2004.
- [18] 雷玉桃,陈瑾渐,王凤棠.基于虚拟水的河南省农作物结构优化研究[J].农业技术经济,2011,(11):118.
- [19] 河南省统计局.河南统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2001—2010.
- [20] 河南省水资源公报[Z].河南省:河南省水利厅,2001-2010.