

# 宁夏太阳山湿地水生生态系统健康评价

欧阳虹<sup>1</sup>, 孙旭杨<sup>1</sup>, 邱小琮<sup>2\*</sup>, 王世强<sup>1</sup>, 赵增锋<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏大学生命科学学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**通过在太阳山湿地设置11个采样点,监测水质及生物等17个指标,采用层次分析法、熵值法确定指标权重,运用灰色关联法、模糊综合评价法对研究区水生生态系统的健康状况进行评价。结果表明:在层次分析法赋权下,经灰色关联法评价得南湖为亚健康,其余湖为不健康;经模糊综合评价法得4个湖为病态。在熵值法赋权下,经灰色关联法评价得南湖为很健康,其余湖为不健康;经模糊综合评价法得西湖为不健康,南湖为很健康,其余湖为病态。结合两种评价方法的计算过程及研究区实际情况,模糊综合评价结果较灰色关联法更符合实际。

**关键词:**水生生态系统;健康评价;灰色关联法;模糊综合评价法;太阳山湿地

中图分类号:X524;X826 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2022)04-0038-05

## Health Evaluation of Aquatic Ecosystem in Taiyangshan Wetland in Ningxia

OUYANG Hong<sup>1</sup>, SUN Xu-yang<sup>1</sup>, QIU Xiao-cong<sup>2\*</sup>, WANG Shi-qiang<sup>1</sup>, ZHAO Zeng-feng<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. School of Life Science, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** 17 water quality and biological indicators of the samples from 11 sampling sites in Taiyangshan Wetland were monitored, the index weights were determined by analytic hierarchy process and entropy method, and the health status of aquatic ecosystem in the study area was evaluated by gray correlation method and fuzzy comprehensive evaluation. The results showed that under the weight of AHP, according to grey correlation method, the South Lake was sub-health and the other lakes were unhealthy, while according to fuzzy comprehensive evaluation, the four lakes were morbid. Under the weight of entropy method, the evaluation by grey correlation method showed that the South Lake as very healthy, and the others were unhealthy, while by fuzzy comprehensive evaluation, the West Lake was unhealthy, the South Lake was very healthy, and the others were morbid. Combined with the calculation process of the two evaluation methods and the actual situation of the study area, the result by fuzzy comprehensive evaluation was more realistic than that by grey correlation method.

**Key words:** Aquatic ecosystem; Health evaluation; Grey correlation method; Fuzzy comprehensive evaluation method; Taiyangshan Wetland

湿地是一种独特的生态系统,形成于水生和陆生系统之间,在维持生态系统的平衡、保护珍稀物种资源和净化污水等方面具有独特的生态功能<sup>[1]</sup>。生态系统失衡造成的水体污染、生物多样性减少等水生态问题<sup>[2]</sup>,使得湿地水生生态系统健康受到严重威胁。因此,亟需对湿地进行准确诊断,评价水生生态系统的健康状况,分析其水环境问题及形成机理,进而科学地对水生生态系统进行修复、治理。

目前,在生态系统健康评价中没有统一的指标体系构建和评价方法。郭荣中等<sup>[3]</sup>以长株潭地区为研

收稿日期:2021-05-29;修订日期:2022-05-18

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划基金资助项目(2019BFG02014);宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)基金资助项目(NXYLXK2017A03)

作者简介:欧阳虹(1996—),女,江西南昌人,硕士,研究方向为水资源与水环境调控。

\*通信作者:邱小琮 E-mail: qxc7175@126.com

研究对象,基于改进的PSR模型构建指标体系,运用组合赋权法确定指标权重,对该区域生态系统健康进行定量分析和评价;秦趣等<sup>[4]</sup>基于PSR模型构建评价体系,采用熵权法和模糊数学法对草海湿地生态系统健康进行了评价。然而,缺乏从主客观角度对各指标进行赋权,将不同赋权、评价方法的结果进行适用性分析。今以宁夏太阳山湿地为研究区,通过主成分分析法对水生态环境因子进行筛选,构建指标体系,并采用层次分析法、熵值法确定指标权重,运用灰色关联法、模糊综合评价法对水生生态系统健康状况进行评价,以期对太阳山湿地水生生态系统的保护及科学治理提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

太阳山湿地位于宁夏吴忠市太阳山开发区,地理范围 E106°32′01″ ~ E106°40′58″, N37°23′59″ ~ N37°29′17″,总面积 2 447.5 hm<sup>2</sup>。其中,湿地面积 1 492.7 hm<sup>2</sup>,湿地率 60.99%,水域面积 654.8 hm<sup>2</sup>,占湿地面积的 43.87%。年平均降水量为 244 mm,降雨多集中在 7—9 月;年蒸发量为 1 863 mm,约为降水量的 8 倍。除大气降水外,小南湖补水来源为苦水河(系属黄河支流),分别设有两个闸门流至东湖、西湖;东湖无出水,仅靠蒸发渗漏及小南湖补水作为水循环;南湖为温泉湖,依靠地下泉涌补水;西湖补水来源为南湖及小南湖,设有闸门不定期向苦水河排水。经实地调查发现,在研究区南侧、靠近小南湖处有煤化工工厂,西湖下游设有生活污水处理厂。

根据研究区的水文规律和湖泊分布情况,布设 11 个采样点(S1—S11),点位具体分布见图 1。分别于 2019 年 4 月(春季)、7 月(夏季)、10 月(秋季)及 2020 年 1 月(冬季)进行采样。

### 1.2 样品采集与分析

(1)水质指标。使用 5.0 L 采水器采集水样,采集得到的样品放入冷藏包中带回实验室,并按照相关标准当天测定 DO、BOD<sub>5</sub>、TN、TP、NH<sub>3</sub>-N、COD、I<sub>Mn</sub>、Chl-a、Cu、Zn 和 Hg 等指标。

(2)生物指标。浮游植物样本用 1 L 采水器采集,鲁哥氏液当场固定,经 48 h 沉淀后用虹吸管吸去上层清液,收集沉淀下来的浓缩液;浮游动物样本用采水器取 10 L 水,用 25 号过滤网过滤浓缩后加入 5% 甲醛现场固定;底栖动物标本用 1/16 m<sup>2</sup> 的改良式彼得生采泥器采集定量样品,10% 甲醛保

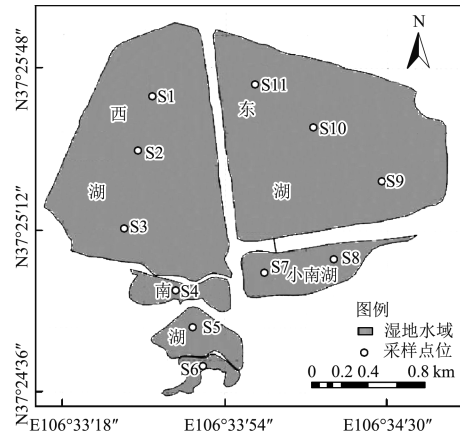


图 1 太阳山湿地采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Taiyangshan Wetland

存,实验室内分选和镜检。

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 评价指标体系的构建

参考文献<sup>[5-8]</sup>确定 DO、BOD<sub>5</sub>、TN、TP、NH<sub>3</sub>-N、COD、I<sub>Mn</sub>、Chl-a、Hg、Cu、Zn 为水质指标,浮游植物生物量(S)、浮游动物 S、底栖动物 S、浮游植物 Shannon-Wiener 指数(H)、浮游动物 H、底栖动物 H 为生物指标。采用杨谦等<sup>[9]</sup>使用的方法对指标进行无量纲标准化处理,并对各指标作主成分分析<sup>[6]</sup>,构建研究区水生生态系统健康评价指标体系目标层:太阳山湿地水生生态系统健康评价;准则层:水质指标,生物指标;指标层:BOD<sub>5</sub>、TN、TP、NH<sub>3</sub>-N、COD、I<sub>Mn</sub>、Chl-a、Hg、Cu、Zn,浮游植物 S、浮游动物 S、底栖动物 S、浮游植物 H、底栖动物 H。

#### 1.3.2 层次分析法

层次分析法指将目标分解为多个目标或准则,分解为多指标的若干层次,通过定性指标模糊量化方法算出层次单排序和总排序。今根据专家打分,并参照相关学者研究结果<sup>[10-11]</sup>,构建各层次判断矩阵,从而确定层次分析法下的各指标权重 W:

$$W = [BOD_5, Chl-a, NH_3-N, TN, TP, I_{Mn}, COD, Hg, Cu, Zn, \text{浮游植物 } S, \text{浮游植物 } H, \text{浮游动物 } S, \text{底栖动物 } S, \text{底栖动物 } H] = [0.083, 0.053, 0.080, 0.071, 0.043, 0.028, 0.090, 0.029, 0.011, 0.011, 0.094, 0.173, 0.060, 0.058, 0.115]$$

#### 1.3.3 熵值法

熵值法是根据各项指标提供的信息量大小确定权重值,能尽量消除各评价因素权重的主观性<sup>[12]</sup>。确定的各指标权重 W:

$W = [BOD_5, Chl-a, NH_3-N, TN, TP, I_{Mn}, COD, Hg, Cu, Zn, \text{浮游植物 } S, \text{浮游植物 } H, \text{浮游动物 } S, \text{底栖动物 } S, \text{底栖动物 } H] = [0.048, 0.050, 0.057, 0.054, 0.049, 0.049, 0.257, 0.056, 0.049, 0.048, 0.051, 0.059, 0.052, 0.051, 0.070]$ 。

#### 1.4 水生生态系统健康等级评价

通过灰色关联法,以健康评价标准分级为比较数列,各指标实测值为参考数列,计算各月及年均值分别与各健康评价标准级别的关联度,由关联度

的大小判断各时间段水体的健康评价等级<sup>[7]</sup>。使用模糊综合评价法来判定健康等级,由指标实测值建立各评价因子对各级水质标准的隶属度集,形成隶属度矩阵,将因子的权重集与隶属度矩阵相乘,获得一个综合评判集,从而可得健康评价结果<sup>[13]</sup>。参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和文献<sup>[14-15]</sup>确定水生生态系统健康评价标准体系,分为很健康、健康、亚健康、不健康和病态5个评价等级,见表1。

表1 水生生态系统健康评价标准  
Table 1 Health evaluation criteria of aquatic ecosystem

指标	分级标准限值				
	很健康	健康	亚健康	不健康	病态
$BOD_5 \rho / (mg \cdot L^{-1})$	$\leq 3$	3	4	6	10
$Chl-a \rho / (\mu g \cdot L^{-1})$	$\leq 1$	2	4	10	26
$NH_3-N \rho / (mg \cdot L^{-1})$	$\leq 0.15$	0.5	1	1.5	2
$TN \rho / (mg \cdot L^{-1})$	$\leq 0.2$	0.5	1	1.5	2
$TP \rho / (mg \cdot L^{-1})$	$\leq 0.01$	0.025	0.05	0.1	0.2
$I_{Mn} \rho / (mg \cdot L^{-1})$	$\leq 2$	4	6	10	15
$COD \rho / (mg \cdot L^{-1})$	$\leq 15$	15	20	30	40
$Hg \rho / (\mu g \cdot L^{-1})$	$\leq 0.000\ 05$	0.000\ 05	0.000\ 1	0.001	0.001
$Cu \rho / (\mu g \cdot L^{-1})$	$\leq 0.01$	1	1	1	1
$Zn \rho / (\mu g \cdot L^{-1})$	$\leq 0.05$	1	1	2	2
浮游植物 $S \rho / (mg \cdot L^{-1})$	$\leq 3$	$\leq 3$	5	10	$\geq 10$
浮游植物 $H$	$\geq 4$	3	2	1	$\leq 1$
浮游动物 $S \rho / (mg \cdot L^{-1})$	$< 1$	3.4	5.5	8	$\geq 8$
底栖动物 $S \rho / (mg \cdot L^{-1})$	$< 1.5$	3	6	12	$> 12$
底栖动物 $H$	$\geq 4$	3	2	1	$\leq 1$

## 2 结果与讨论

### 2.1 基于灰色关联法的水生生态系统健康评价

根据层次分析法、熵值法进行赋权,基于灰色关联法计算其各月份及年平均值与评价标准等级的关联度,再根据最大隶属度原则得出评价结果,计算及评价结果见表2。

### 2.2 基于模糊综合评价法的水生生态系统健康评价

分别根据层次分析法、熵值法进行赋权,基于模糊综合评价法计算其各月份及年平均值与评价标准等级的关联度,再根据最大隶属度原则得出评价结果,计算及评价结果见表3。

### 2.3 讨论

#### 2.3.1 水生生态健康评价

根据灰色关联法评价,南湖水生生态系统健康状况最好,西湖、小南湖及东湖健康状况差;根据模

糊综合评价法评价,南湖水生生态系统健康状况最好,其余3个湖均为病态。研究区属于干旱区,受干旱区典型特征影响较大。南湖水生生态系统健康状况最好,与其补水来源有关。南湖为温泉湖,主要补水来源为地下泉涌,水质较好,且水体流动循环性较好,其出水流向西湖。西湖健康状况与南湖相比较差,由于其补水来源有南湖及小南湖,小南湖健康状况较差,水体营养盐等含量较高,小南湖对西湖健康造成不利影响。东湖水生生态系统健康最差,其湖水只进不出,由于干旱少雨,蒸发强烈,水体循环较差,使得其自净能力不足,不利于水生动植物生长,水生生态系统稳定性差<sup>[16]</sup>。

研究区的水生生态健康状态呈现明显的季节性特点,即7月(夏季)和10月(秋季)健康程度普遍要优于4月(春季)和1月(冬季)。这一方面是由于2019年的7月、10月降水充沛,降水量分别

表 2 基于灰色关联法的水生生态系统健康评价结果

Table 2 Health evaluation results of aquatic ecosystem based on grey correlation method

月份	区域	层次分析法					结果	熵值法					结果
		很健康	健康	亚健康	不健康	病态		很健康	健康	亚健康	不健康	病态	
4 月	西湖	0.654	0.697	0.725	0.761	0.739	不健康	0.636	0.620	0.676	0.731	0.757	病态
	南湖	0.587	0.621	0.846	0.754	0.681	亚健康	0.679	0.656	0.841	0.703	0.601	亚健康
	小南湖	0.617	0.735	0.680	0.784	0.791	病态	0.689	0.714	0.703	0.760	0.789	病态
	东湖	0.614	0.753	0.716	0.808	0.777	不健康	0.727	0.756	0.748	0.828	0.808	不健康
	全湖	0.574	0.698	0.725	0.786	0.763	不健康	0.663	0.684	0.745	0.784	0.785	病态
7 月	西湖	0.728	0.645	0.737	0.742	0.639	不健康	0.668	0.593	0.686	0.781	0.598	不健康
	南湖	0.728	0.783	0.749	0.687	0.628	健康	0.829	0.793	0.751	0.657	0.591	很健康
	小南湖	0.704	0.672	0.759	0.719	0.648	亚健康	0.693	0.654	0.759	0.763	0.616	不健康
	东湖	0.743	0.774	0.776	0.732	0.691	亚健康	0.739	0.732	0.764	0.735	0.710	亚健康
	全湖	0.678	0.708	0.715	0.785	0.760	不健康	0.655	0.653	0.690	0.809	0.785	不健康
10 月	西湖	0.763	0.777	0.816	0.702	0.585	亚健康	0.764	0.735	0.848	0.657	0.523	亚健康
	南湖	0.776	0.768	0.707	0.658	0.560	很健康	0.867	0.782	0.716	0.629	0.523	很健康
	小南湖	0.694	0.720	0.756	0.681	0.653	亚健康	0.759	0.707	0.776	0.620	0.572	亚健康
	东湖	0.622	0.725	0.746	0.745	0.666	亚健康	0.664	0.675	0.732	0.745	0.715	不健康
	全湖	0.617	0.693	0.765	0.730	0.597	亚健康	0.628	0.621	0.751	0.775	0.561	不健康
1 月	西湖	0.557	0.635	0.713	0.691	0.714	病态	0.591	0.579	0.682	0.698	0.763	病态
	南湖	0.726	0.708	0.837	0.682	0.577	亚健康	0.848	0.770	0.775	0.632	0.520	很健康
	小南湖	0.618	0.707	0.842	0.682	0.650	亚健康	0.696	0.704	0.822	0.643	0.585	亚健康
	东湖	0.633	0.722	0.823	0.733	0.658	亚健康	0.707	0.709	0.774	0.765	0.717	亚健康
	全湖	0.494	0.573	0.787	0.725	0.648	亚健康	0.530	0.528	0.681	0.699	0.704	病态
年度	西湖	0.656	0.656	0.727	0.817	0.662	不健康	0.636	0.597	0.693	0.832	0.670	不健康
	南湖	0.724	0.772	0.815	0.719	0.641	亚健康	0.834	0.793	0.760	0.647	0.567	很健康
	小南湖	0.576	0.723	0.685	0.778	0.703	不健康	0.614	0.655	0.668	0.800	0.738	不健康
	东湖	0.623	0.764	0.717	0.779	0.734	不健康	0.706	0.737	0.741	0.806	0.776	不健康
	全湖	0.546	0.659	0.706	0.778	0.740	不健康	0.587	0.599	0.684	0.754	0.781	病态

为 30.7 mm、36.9 mm,此时湖泊入水量大,使得湖内水质指标因子被稀释;另一方面,水生生物的种类组成、群落结构和丰度变化受温度、光照等影响程度较大<sup>[17]</sup>,夏季和秋初水温高,使得水生生物多样性较为丰富,生物指标优于其他季节,湿地湖泊健康程度评价结果要好于 4 月和 1 月。

### 2.3.2 赋权方法的差异分析

结果显示,不同赋权方法下,同种评价方法结果差异不大;同种赋权、不同评价方法下,虽然各湖健康等级及时空变化趋势大致相同,但在各时间段各湖评价等级略有不同。燕琳等<sup>[18]</sup>在进行自然性评价过程中、王楠琪等<sup>[19]</sup>在进行李植株形态学评价过程中均得出相同结论。熵值法能尽量消除各因素赋权的主观性。对于某项指标,指标的离散程度越大,该指标信息熵就越小,被赋予的权重值就越高,表明该指标在综合评价中所起的作用越大<sup>[20]</sup>。由于 COD 指标数值之间差异过大,使得该指标用熵权法计算所得的权重为 0.257,在所有指标中权重最大,对健康评价计算的结果影响也最

大。如 7 月南湖 COD 指标 8.40 mg/L,评价标准中为很健康等级,熵值法评价结果为很健康,而剩余 14 个指标中 9 个指标处于评价标准中亚健康、不健康、病态等级,此时 COD 的熵权并不表示该指标在生态系统中的实际重要性系数,而是各指标在竞争意义上的相对激烈程度<sup>[21]</sup>。层次分析法是用一定标度把人的主观判断进行客观量化的赋权过程,根据各指标层间、各指标要素间构建判断矩阵,并经过一致性检验,使得各指标层间、各指标要素间权重结果更加贴合客观情况。

### 2.3.3 评价方法的差异分析

同种赋权方法下,两种评价方法对于 4 月、10 月及 1 月各湖健康评价结果差异不大,整体上在 1 个健康等级间波动,7 月各湖评价结果差异较明显。根据灰色关联法、模糊综合评价法计算原理,灰色关联法所计算的隶属度矩阵由指标与评价标准的差值数构成,其受超标指标的影响较大,而相比模糊综合评价法,其在构建模糊关系矩阵 **R** 过程中,区分了效益型因子(数值越大,健康状态越

表3 基于模糊综合评价法的水生生态系统健康评价结果

Table 3 Health evaluation results of aquatic ecosystem based on fuzzy comprehensive evaluation

月份	区域	层次分析法					结果	熵值法					结果
		很健康	健康	亚健康	不健康	病态		很健康	健康	亚健康	不健康	病态	
4月	西湖	0.108	0.216	0.095	0.139	0.444	病态	0.172	0.138	0.090	0.149	0.451	病态
	南湖	0.055	0.158	0.359	0.133	0.295	亚健康	0.159	0.148	0.369	0.133	0.190	亚健康
	小南湖	0.092	0.188	0.032	0.134	0.553	病态	0.174	0.109	0.036	0.074	0.606	病态
	东湖	0.109	0.138	0.078	0.127	0.548	病态	0.204	0.061	0.047	0.105	0.582	病态
	全湖	0.052	0.157	0.136	0.140	0.514	病态	0.153	0.067	0.130	0.098	0.552	病态
7月	西湖	0.207	0.157	0.169	0.150	0.318	病态	0.178	0.150	0.148	0.303	0.221	不健康
	南湖	0.210	0.318	0.110	0.041	0.320	病态	0.485	0.186	0.075	0.031	0.223	很健康
	小南湖	0.188	0.128	0.234	0.058	0.391	病态	0.168	0.147	0.242	0.167	0.276	病态
	东湖	0.205	0.091	0.173	0.065	0.466	病态	0.237	0.041	0.139	0.080	0.503	病态
	全湖	0.161	0.128	0.108	0.158	0.445	病态	0.190	0.098	0.086	0.220	0.406	病态
10月	西湖	0.133	0.237	0.278	0.083	0.270	亚健康	0.148	0.162	0.426	0.092	0.173	亚健康
	南湖	0.383	0.197	0.118	0.093	0.209	很健康	0.612	0.098	0.091	0.079	0.121	很健康
	小南湖	0.158	0.210	0.202	0.081	0.349	病态	0.238	0.174	0.274	0.071	0.243	亚健康
	东湖	0.119	0.163	0.172	0.160	0.385	病态	0.207	0.055	0.131	0.148	0.458	病态
	全湖	0.036	0.264	0.251	0.178	0.270	病态	0.102	0.132	0.307	0.291	0.169	亚健康
1月	西湖	0.035	0.198	0.186	0.135	0.446	病态	0.101	0.083	0.154	0.108	0.554	病态
	南湖	0.248	0.117	0.347	0.115	0.173	亚健康	0.490	0.099	0.210	0.078	0.122	很健康
	小南湖	0.083	0.089	0.436	0.119	0.272	亚健康	0.149	0.064	0.480	0.112	0.196	亚健康
	东湖	0.080	0.131	0.298	0.167	0.323	病态	0.148	0.075	0.164	0.152	0.461	病态
	全湖	0.023	0.064	0.368	0.169	0.377	病态	0.097	0.027	0.234	0.140	0.502	病态
年度	西湖	0.101	0.178	0.115	0.274	0.332	病态	0.124	0.111	0.123	0.353	0.289	不健康
	南湖	0.188	0.240	0.210	0.061	0.301	病态	0.435	0.180	0.138	0.043	0.205	很健康
	小南湖	0.024	0.255	0.123	0.165	0.433	病态	0.098	0.154	0.132	0.221	0.395	病态
	东湖	0.080	0.160	0.114	0.177	0.468	病态	0.148	0.056	0.096	0.187	0.512	病态
	全湖	0.023	0.172	0.180	0.163	0.463	病态	0.097	0.065	0.187	0.136	0.516	病态

好,如  $H$ ) 及成本型因子(数值越大,健康状态越差,如  $BOD_5$ 、 $Chl-a$ 、 $NH_3-N$  等),当指标超过最差或最优评价等级阈值时,分别取向量(0,0,0,0,1)或(1,0,0,0,0),降低超标倍数的影响。如浮游植物  $S$  为成本型因子,7月东湖浮游植物  $S$  质量浓度为 30.494 mg/L,根据评价标准可得浮游植物  $S \geq 10$  mg/L 为病态,模糊综合评价法中取向量(0,0,0,0,1),此时计算过程更注重评价指标在评价体系中的重要性,减小了超标倍数和权重的叠加影响<sup>[22]</sup>,故结果中的模糊综合评价结果较为稳定。

### 3 结论

(1)在层次分析法赋权下,研究区水生生态系统健康状况经灰色关联法评价得南湖为亚健康,西湖、小南湖、东湖为不健康,全湖结果为不健康;经模糊综合评价法评价得4个湖区均为病态,全湖结果为病态。

(2)在熵值法赋权下,经灰色关联法评价得南湖为很健康,西湖、小南湖、东湖为不健康,全湖结果

为病态;经模糊综合评价法评价得西湖为不健康,南湖为很健康,小南湖、东湖为病态,全湖结果为病态。

(3)综合两种评价方法的计算过程及研究区水体实际情况,本研究认为模糊综合评价法评价结果更稳定、更准确。总体来说,研究区水生生态系统健康状况为病态,东湖健康状况最差,其次为小南湖,虽然南湖及西湖健康状况较东湖及小南湖好,但健康状况同样不容乐观,亟须采取科学有效的措施进行治理。

### [参考文献]

- [1] 吕菝. 湿地:地球之肾[J]. 旅游纵览,2013(9):90-91.
- [2] 陈宇顺. 多重人类干扰下长江流域的水生态系统健康修复[J]. 人民长江,2019,50(2):19-23.
- [3] 郭荣中,申海建,杨敏华. 基于改进PSR模型的长株潭地区土地生态系统健康评价研究[J]. 环境监测管理与技术,2021,33(3):29-34.
- [4] 秦趣,黄艳,崔小平. 基于PSR模型的云贵高原湿地生态系统健康评价[J]. 水生态学杂志,2019,40(5):26-31.

(下转第48页)