

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0061

李世龙,雷兴碧,邱小琮,等.银川阅海湖水生生态系统健康评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):168-173,200. LI S L, LEI X B, QIU X C, et al. Health assessment of aquatic ecosystem of Yuehai Lake in Yinchuan[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 168-173, 200. (in Chinese)

# 银川阅海湖水生生态系统健康评价

李世龙<sup>1</sup>,雷兴碧<sup>1</sup>,邱小琮<sup>2</sup>,郭琦<sup>1</sup>,吴岳玲<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院,银川 750021;2. 宁夏大学 生命科学学院,银川 750021)

**摘要:**为探明银川阅海湖水生生态系统健康状况,在2015—2017年冬(1月)、春(4月)、夏(7月)、秋(10月)对阅海湖水生态和水环境因子进行采样,通过主成分分析法筛选出叶绿素(Chl.a)、综合营养状态指数(TLI( $\Sigma$ ))、浮游植物生物量(D)、底栖动物 Shannon-Wiener 指数( $H'$ <sub>底栖动物</sub>)、水生植物 Shannon-Wiener 指数( $H'$ <sub>水生植物</sub>)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、总氮(TN)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)等9个因子构成阅海湖水生生态系统健康评价指标体系,运用主成分分析法确定了指标权重,运用灰关联法对水生生态系统健康等级进行评价。结果表明,阅海湖2015—2017年春季、夏季和秋季水生生态系统健康评价等级均为亚健康,冬季均为健康状态。氮磷营养盐超标是导致阅海湖2015—2017年处于亚健康的主要原因。

**关键词:**阅海湖;水生生态系统;健康评价;主成分分析;灰关联

中图分类号:TV213;X174 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## Health assessment of aquatic ecosystem of Yuehai Lake in Yinchuan

LI Shilong<sup>1</sup>, LEI Xingbi<sup>1</sup>, QIU Xiaocong<sup>2</sup>, GUO Qi<sup>1</sup>, WU Yueling<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** The water ecological and water environmental factors were sampled to ascertain the health status of the aquatic ecosystem of Yuehai Lake in YinChuan in winter (January), spring (April), summer (July) and autumn (October) from 2015 to 2017. Nine factors such as chlorophyll (Chl. a), comprehensive nutritional status index (TLI( $\Sigma$ )), phytoplankton biomass (D), benthic Shannon-Wiener index( $H'$ <sub>Aquatic plant</sub>), and aquatic plant Shannon-Wiener index( $H'$ <sub>Benthic</sub>), permanganate index (COD<sub>Mn</sub>), total nitrogen(TN), ammonia nitrogen (NH<sub>3</sub>-N), total phosphorus (TP) were selected to establish evaluation index system using principal component analysis (PCA) for the health assessment of the aquatic ecosystem in Yuehai Lake. The PCA method was used to determine the weight of the index, while the gray relational method was used to evaluate the health level of the aquatic ecosystem. The results showed that the health assessment grades of the aquatic ecosystems in the spring, summer and autumn were all sub-health from 2015-2017, whereas in winter, the status was healthy. The extreme level of nitrogen and phosphorus nutrients were the main cause of sub-health in Lake Yuehai from 2015-2017.

**Key words:** Yuehai Lake; aquatic ecosystem; health evaluation; principal component analysis; grey relational

收稿日期:2019-02-24 修回日期:2019-10-31 网络出版时间:2019-11-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191122.1124.008.html>

基金项目:宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)(NXYLXK2017A03)

作者简介:李世龙(1995—),男,山西晋城人,主要从事水资源与水环境调控方面研究。E-mail:63335823@qq.com

通信作者:邱小琮(1971—),男,浙江湖州人,教授,主要从事水域生态学及水环境调控方面的教学与研究工作。E-mail:qxc7175@126.com

生态系统具有服务和价值功能,是维持人类环境的最基本单元<sup>[1]</sup>。生态系统健康指的是生态系统具有结构的完整性和功能的稳定性,具备自我维持和自我修复的能力<sup>[2]</sup>,健康的水生生态系统对于保护水环境和维持水环境的各项正常功能起着重要作用,在水资源短缺和水环境日益恶化的形势下,了解水生生态系统现状,准确诊断和评价水生生态系统的健康状况,对于水环境问题及其形成机理、水生生态系统修复、水体污染防控等,均具有重要的理论和实践意义<sup>[3]</sup>,目前水生生态系统的健康评价已经引起越来越多国内外学者的重视<sup>[4-5]</sup>。

水生生态系统是一个复杂的大系统,单一方法很难对水生生态系统的健康状况做出准确地诊断和评价。美国 1972 年颁布的“清洁水法令”认为,维持河流水生生态系统结构和功能的物理、化学、生物的完整性状态是河流健康评价的重要原则<sup>[6]</sup>。水生生态系统健康评价的方法主要有综合指数法、生态系统健康指数法、模糊综合评价法、灰色评价法<sup>[7-10]</sup>、指示物种法和指标体系法等<sup>[11]</sup>。大量的研究成果为我们进行水生生态健康评价提供了参考依据,但也存在一些问题,比如评价指标的选取缺乏科学性,研究者往往选取一些易于测量的指标进行湖泊生态系统健康评价。如何选取合理的指标构建评价指标体系,目前尚未形成公认的理论体系与方法。

阅海湖位于宁夏银川金凤区偏北,由天然湖泊经人工改造而成,总面积占地 2 000 hm<sup>2</sup>,是目前银川市面积最大、地貌保持最完整的一块生态湿地,也是我国西部地区鸟类迁徙的中转站之一<sup>[12]</sup>。随着社会经济的快速发展,阅海湖水环境状况日趋恶化,富营养化程度逐渐加重,水生生态系统功能退化。目前,仅有李斌等<sup>[13]</sup>对阅海湖水环境质量进行过评价,并未有阅海湖水生生态系统健康状况进行评价的报道。本文运用主成分分析法对阅海湖水生生态系统健康评价候选指标进行筛选,构建评价指标体系,确定指标的权重,采用灰关联法评价阅海湖水生生态系统的健康状况,旨在为阅海湖水生生态系统保护与水环境质量改善提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 采样设计

根据湖区形状,在阅海湖选择了 4 个采样点, S01、S02 为湖的深水区, S03、S04 为湖的浅水区,见图 1。

采样时间分别为 2015—2017 年的冬(1 月)、春(4 月)、夏(7 月)、秋(10 月)。



图 1 阅海湖水样采集点分布

Fig. 1 Location of sampling sites in Yuehai lake

使用 5.0L 采水器采集水样并保存,带回实验室测定高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、总氮(TN)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、生物耗氧量(BOD<sub>5</sub>)、叶绿素(Chl. a)、总磷(TP)指标。高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)采用酸性高锰酸钾法测定(GB 11892—92)、总氮(TN)指标采取碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定(GB 11894—89)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)指标采用纳氏试剂分光光度法(GB 7479—87)、生物耗氧量(BOD<sub>5</sub>)采用稀释接种法(GB/T 7488—1987)、叶绿素(Chl. a)采用丙酮萃取分光光度法测定、总磷(TP)指标采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)、透明度 SD 采用赛氏圆盘法现场测定<sup>[14]</sup>。

生态指标主要选取浮游植物生物量、 $H'$ <sub>底栖动物</sub>、 $H'$ <sub>水生植物</sub>、 $H'$ <sub>浮游植物</sub>和  $H'$ <sub>浮游动物</sub>,同时选取综合营养状态指数(TLI(Σ)),共同构成水生生态系统健康评价指标体系候选指标。

Shannon-Wiener 物种多样性指数( $H'$ )

$$H' = -\sum (n_i/N) \log(n_i/N) \quad (1)$$

式中: $n_i$  为第  $i$  种生物的个体数; $N$  为生物总个数。

综合营养状态指数为<sup>[15]</sup>

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI(j) \quad (2)$$

式中:TLI(Σ)为综合营养状态指数; $W_j$  为第  $j$  种参数的营养状态指数的相关权重;TLI( $j$ )为代表第  $j$  种参数的营养状态指数。

### 1.2 分析方法

#### 1.2.1 水生生态系统健康评价指标筛选

将阅海湖 2015—2017 年 1、4、7、10 月各项指标值进行主成分分析。采用方差最大正交旋转法对因子载荷矩阵进行旋转,提取出累积方差贡献率为 85%的主成分。选取旋转后载荷值大于 0.6 的指标

作为判定阅海湖健康属性的指标<sup>[16]</sup>。

### 1.2.2 评价指标权重的确定

将以上选定的指标作为判定阅海湖健康属性的指标体系,进行主成分分析。按照累积方差贡献率为 85%的提取出主成分,得出主成分的特征值、方差贡献率和旋转后因子载荷值。依据主成分对应的特征值、方差贡献率计算出各评价指标的权重值<sup>[17-18]</sup>。计算公式为

$$W_i = \sum_{j=1}^k |a_{ij}| \times E_j \quad (3)$$

式中: $a_{ij}$ 为因子*i*在第*j*个主成分中的因子得分系数(特征值),即第*i*个因子对第*j*个主成分的贡献; $E_j$ 为该主成分对应方差的贡献率; $W_i$ 为第*i*个评价因子的权重值。

最终,对 $W_i$ 进行归一化处理,以获得每个评价

因子的权重。

### 1.2.3 水生生态系统健康等级评价

采用灰关联法对阅海湖健康等级进行评价。以健康标准分级为比较数列,各指标实测值为参考数列,计算各时间段与各健康级别的关联度,由关联度的大小判断各时间段水体的健康等级<sup>[19-20]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 阅海湖水生生态系统健康评价指标的选定

阅海湖 2015—2017 年候选指标特征值及主成分贡献率与累积贡献率,旋转后因子载荷值见表 1,确定  $H'_{\text{浮游植物}}$ 、浮游植物生物量、 $H'_{\text{水生植物}}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TLI( $\Sigma$ )、Chl. a、TN 9 个因子作为阅海湖 2015—2017 年水生生态系统健康评价的指标。

表 1 旋转后因子载荷值  
Tab. 1 Rotated factor matrix

指标	2015 年		2016 年		2017 年	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
SD	-0.928 3	-0.243 4	-0.862 6	0.012 0	-0.895 9	-0.123 6
Chl. a	0.939 1	0.274 3	0.861 6	0.490 5	0.329 8	0.933 8
$\text{COD}_{\text{Mn}}$	0.680 1	0.676 4	0.470 4	0.782 8	0.847 8	0.336 4
$\text{BOD}_5$	0.562 6	0.354 4	0.456 3	0.481 6	0.291 2	0.897 1
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.891 3	-0.110 2	0.868 0	0.470 1	0.868 3	0.382 5
TN	0.934 9	0.163 6	0.816 5	0.550 5	0.878 1	0.459 8
TP	0.932 7	-0.039 4	0.965 8	0.099 6	0.838 0	0.372 1
TLI( $\Sigma$ )	0.885 9	0.448 8	0.833 6	0.543 5	0.811 1	0.576 2
浮游植物生物量	0.872 4	0.420 0	0.789 7	0.573 2	0.939 9	0.262 7
$H'_{\text{浮游植物}}$	-0.734 2	-0.512 3	-0.510 7	-0.773 9	-0.535 5	-0.765 0
$H'_{\text{浮游动物}}$	0.149 3	-0.924 2	0.327 6	-0.823 1	-0.055 7	-0.163 3
$H'_{\text{底栖动物}}$	0.677 4	0.613 4	0.478 7	0.790 0	0.725 4	0.411 3
$H'_{\text{水生植物}}$	0.849 9	0.512 5	0.705 0	0.691 8	0.849 3	0.476 9

### 2.2 阅海湖水生生态系统健康评价指标体系的构成及权重

将筛选出的  $H'_{\text{底栖动物}}$ 、浮游植物生物量、 $H'_{\text{水生植物}}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TLI( $\Sigma$ )、Chl. a、TN 9 个因子进行主成分分析,由分析结果,计算各指标的权重,对指标权重求和,单项指标权重除以权重和即可得到各指标归一化权重。

阅海湖 2015—2017 年水生生态系统健康评价指标特征值及主成分贡献率与各评价指标的权重及归一化权重见表 2。

### 2.3 阅海湖水生生态系统健康评价结果

参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和文献<sup>[21-23]</sup>,以确定阅海湖水生生态系统健康评

价标准分为 5 个评价等级,分别为健康、很健康、亚健康、不健康和病态。水生生态系统健康评价标准体系见表 3。

分别计算阅海湖 2015—2017 年各季节及年平均均值与评价标准等级的关联度见表 4。

由表 4 可知,2015—2017 年阅海湖春季、夏季、秋季均为亚健康状态;冬季均为健康状态。阅海湖水生生态系统的健康状况总体为亚健康。

### 2.4 讨论

本文筛选出来的评价指标主要由四部分构成:第一部分包含的因子为浮游植物生物量、 $H'_{\text{底栖动物}}$ 、 $H'_{\text{水生植物}}$ ,是水生生态系统结构多样性和完整性的综合反映,也是水生生态系统健康评价指标

表 2 评价指标的权重和归一化权重

Tab. 2 Weight and normalized weight of evaluation indicators

指标	2015 年		2016 年		2017 年	
	权重	归一化权重	权重	归一化权重	权重	归一化权重
Chl. a	0.307 6	0.126 3	0.307 0	0.115 8	0.214 6	0.078 5
COD <sub>Mn</sub>	0.314 0	0.128 9	0.270 6	0.102 1	0.255 3	0.093 3
NH <sub>3</sub> -N	0.294 1	0.120 8	0.305 3	0.115 2	0.277 2	0.101 4
TN	0.301 6	0.123 8	0.307 0	0.115 8	0.273 2	0.099 9
TP	0.298 0	0.122 4	0.263 1	0.099 3	0.274 9	0.100 5
TLI(Σ)	0.313 0	0.128 5	0.311 7	0.117 6	0.264 0	0.096 5
浮游植物生物量	0.305 1	0.125 3	0.307 4	0.116 0	0.252 9	0.092 5
H' <sub>底栖动物</sub>	0.302 1	0.124 1	0.269 9	0.101 8	0.255 6	0.093 4
H' <sub>水生植物</sub>	0.315 1	0.129 4	0.308 0	0.116 2	0.265 8	0.097 2

表 3 水生生态系统健康评价标准体系

Tab. 3 Health assessment standard system of Aiyi River aquatic ecosystem

指标	健康等级				
	很健康	健康	亚健康	不健康	病态
Chl. a/(μg · L <sup>-1</sup> )	≤1.0	(1.0,2.0]	(2.0,4.0]	(4.0,10.0]	(10.0,26.0]
COD <sub>Mn</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	≤2	(2,4]	(4,6]	(6,10]	(10,15]
BOD <sub>5</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	≤3.0	≤3.0	(3.0,4.0]	(4.0,6.0]	(6.0,10.0]
NH <sub>3</sub> -N/(mg · L <sup>-1</sup> )	≤0.15	(0.15,0.50]	(0.50,1.0]	(1.0,1.5]	(1.5,2.0]
TN/(mg · L <sup>-1</sup> )	≤0.2	(0.2,0.5]	(0.5,1.0]	(1.0,1.5]	(1.5,2.0]
TP/(mg · L <sup>-1</sup> )	≤0.02	(0.02,0.10]	(0.10,0.20]	(0.20,0.30]	(0.30,0.40]
TLI(Σ)	≤30	(30,50]	(50,60]	(60,70]	>70
浮游植物生物量	≤3.0	≤3.0	[3.0,5.0)	[5.0,10.0)	≥10.0
H' <sub>浮游植物</sub>	≥4.0	[3.0,4.0)	[2.0,3.0)	[1.0,2.0)	≤1.0
H' <sub>浮游动物</sub>	≥3.0	[2.0,3.0)	[1.0,2.0)	[0.5,1.0)	≤0.5
H' <sub>底栖动物</sub>	≥3.0	[2.0,3.0)	[1.0,2.0)	[0.5,1.0)	≤0.5
H' <sub>水生植物</sub>	≥3.0	[2.0,3.0)	[1.0,2.0)	[0.5,1.0)	≤0.5

表 4 阅海湖各季节指标与健康等级关联度计算结果

Tab. 4 Calculation of grey relational degree

年份	季节	很健康	健康	亚健康	不健康	病态	结果
2015 年	春季	0.823 4	0.892 5	0.974 8	0.628 3	0.415 1	亚健康
	夏季	0.711 3	0.806 1	0.850 3	0.845 5	0.512 3	亚健康
	秋季	0.764 4	0.861 4	0.957 6	0.780 4	0.455 9	亚健康
	冬季	0.934 8	0.966 5	0.918 3	0.643 3	0.435 0	健康
	平均	0.785 5	0.878 6	0.994 3	0.714 6	0.439 6	亚健康
2016 年	春季	0.726 6	0.773 1	0.828 0	0.560 2	0.363 5	亚健康
	夏季	0.576 3	0.680 4	0.802 7	0.779 3	0.491 6	亚健康
	秋季	0.611 7	0.718 1	0.821 2	0.727 9	0.403 2	亚健康
	冬季	0.824 4	0.865 4	0.801 7	0.587 5	0.390 7	健康
	平均	0.672 4	0.784 0	0.882 0	0.668 7	0.401 5	亚健康
2016 年	春季	0.762 8	0.801 0	0.819 6	0.578 7	0.375 8	亚健康
	夏季	0.621 7	0.7161 9	0.819 8	0.750 9	0.522 2	亚健康
	秋季	0.611 1	0.719 6	0.822 9	0.662 7	0.447 8	亚健康
	冬季	0.855 5	0.872 3	0.785 6	0.620 9	0.406 5	健康
	平均	0.664 9	0.775 4	0.837 3	0.637 2	0.390 0	亚健康

中最重要的部分;第二部分包含的因子为 Chl. a、TLI( $\Sigma$ ),主要描述水体悬浮物、溶解盐类等的含量;第三部分包含的因子为 TN、NH<sub>3</sub>-N、TP,主要描述水体氮、磷营养盐的构成和含量;第四部分包含的因子为 COD<sub>Mn</sub>,主要描述水体有机物的含量。以上指标包含了水体悬浮物、溶解盐类、营养盐和有机物等水质主要因子,能够充分反映阅海湖的水环境质量;生物指标包括浮游植物生物量、 $H'_{\text{底栖动物}}$ 、 $H'_{\text{水生植物}}$ ,是水生生态系统结构多样性的综合反映。

阅海湖 2015—2017 年的夏季的 TP、Chl. a、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN 高于春季、秋季和冬季。说明夏季水体污染比较严重,原因主要是大量有机物和营养盐进入水体,蓝藻大量繁殖,抑制了其他浮游植物生长,导致其多样性下降,对阅海湖水生生态系统造成严重影响,因此,2015—2017 年夏季水生生态系统健康状况比春季、秋季和冬季健康状况要差。TLI( $\Sigma$ )体现了水体的富营养化程度,在 2015—2017 年夏季明显高于春季、秋季和冬季,这表明阅海湖处于中度污染且处于中富营养状态,健康状况正在逐渐下降。此外,阅海湖水生植物群落结构不均衡,多样性比较低,其自然演替速度不能适应目前阅海湖外源污染物的压力胁迫,对氮磷营养盐的降解能力不足,也是导致阅海湖水生生态系统处于亚健康状态的主要原因。李斌等<sup>[13]</sup>对阅海湖水体研究也得出相似结论,认为氮磷营养盐是污染阅海湖水体的主要原因。

阅海湖补水来源主要为农灌退水,氮磷营养盐严重超标,是阅海湖水质污染的主要原因,整个水生生态系统结构不稳定,其功能受外界胁迫因子的影响较大,造成阅海湖水生生态系统的总体健康状况为亚健康,综合评价的结果也较为全面地反映了阅海湖水生生态系统的水环境特征。根据水生生态系统健康评价结果,阅海湖水体污染防治主要应以降低外源性氮的含量为主,重建和恢复水生生态系统,保证其结构的完整性和功能的稳定性。

### 3 结 论

(1)本文在选取阅海湖水生生态系统健康评价候选指标,通过主成分分析法筛选出 COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 等 9 项指标构成阅海湖水生生态系统健康评价的指标体系,运用主成分法确定指标权重,有效地降低了指标筛选和指标赋权过程中主观因素的影响。构建的评价指标体系涵盖了水体悬浮物、溶解盐类、营养盐和有机物等各主要水质因子以及浮游植物生物量、 $H'_{\text{底栖动物}}$ 、 $H'_{\text{水生植物}}$  等生物指标,充

分反映了阅海湖的水环境质量和水生生态系统结构的多样性,可揭示阅海湖水生生态系统的现状和演替方向,能够反映外界胁迫因子的构成和强度。其健康状况可作为表征和描述阅海湖水生生态系统结构完整性以及功能稳定性的指标之一,评价结果与阅海湖水环境特征、水生生物及其多样性的实际情况相吻合。

(2)阅海湖 2015—2017 年水生生态系统的健康状况总体评价为亚健康状态。氮磷营养盐严重超标是阅海湖水质污染的主要原因,整个水生生态系统结构不均衡,多样性较低,其功能受外界胁迫因子的影响较大,对氮磷营养盐的降解能力不足,是导致阅海湖水生生态系统处于亚健康状态的重要原因。

#### 参考文献(References):

- [1] 孔红梅,赵景柱,马克明,等. 生态系统健康评价方法初探[J]. 应用生态学报,2002,1(4):486-490. (KONG H M, ZHAO J Z, MA K M, et al. Study on the evaluation method of ecosystem health[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 1(4): 486-490. (in Chinese)) DOI:10.13287/j.1001-9332.2002.0116.
- [2] VUGTEVEEN P, LEUVEN R S E W, HUIJBREGTS M A J, et al. Redefinition and elaboration of river ecosystem health: perspective for river management[J]. Hydrobiologia, 2006, 565(1): 289-308. DOI: 10.1007/s10750-005-1920-8.
- [3] 张光生,谢锋,梁小虎,等. 水生生态系统健康的评价指标和评价方法[J]. 中国农学通报,2010,26(24):334-337. (ZHANG G S, XIE F, LIANG X H, et al. Evaluation index and evaluation method of aquatic ecosystem health[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(24): 334-337. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: ZNTB. 0. 2010-24-066.
- [4] 彭涛,陈晓宏. 海河流域典型河口生态系统健康评价[J]. 武汉大学学报(工学版),2009,42(5):631-634,639. (PENG T, CHEN X H. Health assessment of typical estuarine ecosystem in Haihe River basin[J]. Journal of Wuhan University(Engineering edition), 2009, 42(5): 631-634, 639. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: WSDD. 0. 2009-05-018.
- [5] 张远,徐成斌,马溪平,等. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准[J]. 环境科学学报,2007,27(6):919-927. (ZHANG Y, XU C B, MA X P, et al. Integration indicators and criteria for benthic integrity of rivers in the Liaohe River basin[J]. Journal of Environmental Science, 2007, 27(6): 919-927. (in Chinese)) DOI:10.13671/j. hjkxxb. 2007. 06. 005.
- [6] 杨文慧,严忠民,吴建华. 河流健康评价的研究进展

- [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(6): 607-611. (YANG W H, YAN Z M, WU J H. Research progress in river health assessment[J]. Journal of Hohai University, 2005, 33(6): 607-611. (in Chinese))
- [7] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态系统健康评价初探[J]. 中国环境科学, 2002, 22(6): 525-529. (GUO X R, YANG J R, MAO X Q. Preliminary study on urban ecosystem health assessment[J]. China Environmental Science, 2002, 22(6): 525-529. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZGHJ. 0. 2002-06-011.
- [8] 武兰芳, 欧阳竹, 唐登银. 区域农业生态系统健康定量评价[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2740-2748. (WU L F, OUYANG Z, TANG D Y. Quantitative evaluation of regional agricultural ecosystem health [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 24(12): 2740-2748. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0933. 2004. 12. 010.
- [9] 高占国, 朱坚, 翁燕波, 等. 多尺度生态系统健康综合评价: 以宁波市为例[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1706-1717. (GAO Z G, ZHU J, WENG Y B, et al. Comprehensive evaluation of multi-scale ecosystem health: taking Ningbo City as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1706-1717. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; STXB. 0. 2010-07-006.
- [10] 祁帆, 李晴新, 朱琳. 海洋生态系统健康评价研究进展[J]. 海洋通报, 2007, 26(3): 97-104. (QI F, LI Q X, ZHU L. Research progress in marine ecosystem health assessment[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(3): 97-104. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-6392. 2007. 03. 015.
- [11] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 等. 生态系统健康评价: 方法与方向[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2106-2116. (MA K M, KONG H M, GUAN W B, et al. Ecosystem health assessment: methods and directions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(12): 2106-2116. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; STXB. 0. 2001-12-019.
- [12] 李斌, 白维东, 赵睿智, 等. 阅海湖浮游生物群落结构特征研究[J]. 宁夏农林科技, 2016, 57(11): 59-63. (LI B, BAI W D, ZHAO R Z, et al. Study on the characteristics of plankton community structure in the Yue-Hai Lake[J]. Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 2016, 57(11): 59-63. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-204X. 2016. 11. 024.
- [13] 李斌, 白维东, 杨永宇, 等. 阅海湖水环境因子时空分布特征及水环境综合评价[J]. 宁夏农林科技, 2016, 57(8): 40-42. (LI B, BAI W D, YANG Y Y, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of water environment factors and comprehensive evaluation of water environment in Yuehai Lake[J]. Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 2016, 57(8): 40-42. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-204X. 2016. 08. 016.
- [14] 杨永宇, 尹亮, 刘畅, 等. 基于灰关联和 BP 神经网络法评价黑河流域水质[J]. 人民黄河, 2017, 39(6): 58-62. (YANG Y Y, YIN L, LIU C, et al. Evaluation of water quality in the Heihe River basin based on grey correlation and BP neural network [J]. People's Yellow River, 2017, 39(6): 58-62. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2017. 06. 013.
- [15] 杨一鹏, 王娇, 肖青. 太湖富营养化遥感评价研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(3): 33-37. (YANG Y P, WANG J, XIAO Q. Research on remote sensing evaluation of eutrophication in Taihu Lake[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(3): 33-37. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-0504. 2007. 03. 008.
- [16] 王安磊, 彭书传. 包河冬夏两季水体自净情况研究[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2009, 17(6): 64-67. (WANG A L, PENG S C. Study on self-purification of water body in Baohe River in winter and summer[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry(Natural science edition), 2009, 17(6): 64-67. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-4540. 2009. 06. 017.
- [17] 陈书琴, 许秋瑾, 颜昌宙, 等. 主成分分析赋权及其在水质评价灰色模型中的应用[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2008, 33(2): 77-80. (CHEN S Q, XU Q J, YAN C Z, et al. Principal component analysis empowerment and its application in grey model of water quality evaluation[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science), 2008, 33(2): 77-80. (in Chinese)) DOI: 10. 16112/j. cnki. 53-1223/n. 2008. 02. 004.
- [18] 代雪静, 田卫. 水质模糊评价模型中赋权方法的选择[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(2): 169-176. (DAI X J, TIAN W. Selection of weighting method in fuzzy evaluation model of water quality [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(2): 169-176. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZKYB. 0. 2011-02-007.
- [19] 王倩, 丰飞. 基于灰色关联分析法的白城市洪水资源利用效益分析[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 299-303. (WANG Q, FENG F. Analysis of the benefits of flood resource utilization in Baicheng City based on grey correlation analysis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 299-303. ) DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2018. 06. 044.

(下转第 200 页)

- duction to computational fluid dynamics: the finite volume method[M]. New York: Pearson Education, 2007.
- [22] JUN M, YUKI S, KENJI K. Numerical simulation on flow in pump sump with free surface[C]. Proceedings of the 6th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering, IET, Wuhan, China, 2014: 928-932.
- [23] 资丹, 王福军, 陶然, 等. 边界层网格尺度对泵站流场计算结果影响研究[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 139-149. (ZI D, WANG F J, TAO R, et al. Research for impacts of boundary layer grid scale on flow field simulation results in pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 47(2): 139-149. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20150495.
- [24] 刘超, 韩旭, 周济人, 等. 泵站侧向进水引河段三维紊流数值模拟[J]. 排灌机械, 2009, 27(5): 281-286. (LIU C, HAN X, ZHOU J R, et al. Numerical simulation of turbulent flow in forebay with side-intake of pumping station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(5): 281-286. (in Chinese))
- [25] 成立, 祁卫军, 罗灿, 等. Y形导流墩几何参数对泵站前池整流效果的影响[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 68-72. (CHENG L, QI W J, LUO C, et al. Effect of geometric parameters of Y-shaped diversion piers on flow pattern in forebay of pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 68-72. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2014. 01. 014.
- [26] 于磊, 顾巍, 刘必伟, 等. 大扩散角泵站前池整流措施的数值模拟[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2017, 20(4): 75-78. (YU L, GU W, LIU B W, et al. Numerical simulation on improvement of flow Pattern in forebay of pumping station[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2017, 20(4): 75-78. (in Chinese)) DOI: 10. 19411/j. 1007-824x. 2017. 04. 017.
- [27] 范楼. 梁寨泵站整体模型试验研究报告[R]. 扬州: 江苏机电排灌工程研究所, 1996. (FAN L. Report on the overall model test of Liangzhai pumping station [R]. Yangzhou: Jiangsu Institute of Mechanical and Electrical Irrigation and Drainage Engineering, 1996. (in Chinese))

.....

(上接第 173 页)

- [20] 梁小俊, 张庆庆, 许月萍, 等. 层次分析法-灰关联分析法在京杭运河杭州段水质综合评价中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(3): 312-316, 325. (LIANG X J, ZHANG Q Q, XU Y P, et al. Application of analytic hierarchy process-gray correlation analysis in comprehensive evaluation of water quality in Hangzhou Section of Beijing-Hangzhou Grand Canal[J]. Journal of Wuhan University(Engineering Science), 2011, 44(3): 312-316, 325. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; WSDD. 0. 2011-03-010.
- [21] 惠秀娟, 杨涛, 李法云, 等. 辽宁省辽河水生态系统健康评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 181-188. (HUI X J, YANG T, LI F Y, et al. Health assessment of Liaohe water ecosystem in Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 181-188. (in Chinese)) DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 2011. 0005.
- [22] 彭涛, 陈晓宏. 海河流域典型河口生态系统健康评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 631-634, 639. (PENG T, CHEN X H. Health assessment of typical estuarine ecosystem in Haihe River basin[J]. Journal of Wuhan University(Engineering Science), 2009, 42(5): 631-634, 639. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; WSDD. 0. 2009-05-018.
- [23] 叶芳芳. 南四湖藻类及生态系统健康评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2010. (YE F F. Evaluation of algae and ecosystem health in Nansi Lake[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010. (in Chinese))