

# 基于模糊矩阵的衡水湖水环境质量评价及分析

温晓君<sup>1</sup>, 陈辉<sup>2</sup>, 白军红<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学 环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;

2. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024)

**摘要:**运用模糊综合评价法评价了衡水湖三个主要监测站点(洼内、小库和冀县)在 2000—2007 年水环境质量的 变化过程。研究表明 2001—2005 年衡水湖整体水环境质量没有得到明显的改善,2006 年后,衡水湖洼内和冀县 监测站点水环境质量有了改善,基本满足Ⅲ类用水标准。三个监测站点的主要贡献污染物也有所差异。2006 年洼内 监测站点水环境主要贡献污染物为氨氮,贡献率为 0.621。其余年份均为高锰酸盐指数,2000—2005 年及 2007 年贡献 率为 0.5 左右。小库监测站点水环境的主要贡献污染物 2003 年,2004 年,2005 年,2007 年均为总磷。2000 年,2001 年,2002 年,2006 年为氨氮且 2000 年和 2006 年贡献率分别达到 0.58,0.838。冀县监测站点水环境主要贡献污染物 2000 年,2001 年,2002 年,2006 年为氨氮,但 2001 年,2002 年贡献率不到 0.4,相较于 2000 年和 2006 年较低。2003 年为总磷,贡献率为 0.38。2004,2005,2007 为高锰酸盐指数,贡献率分别为 0.61,0.50,0.38。并在水环境质量分析 的基础上剖析了衡水湖水环境污染的原因,给出衡水湖今后保护和管理的建议。

**关键词:**环境科学;水质评价;模糊矩阵;主要贡献污染物;衡水湖

中图分类号:X822;S181.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)02-0292-05

## Evaluation and Analysis on Water Environmental Quality of Hengshui Lake Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

WEN Xiaojun<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>2</sup>, BAI Junhong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Resources and Environment Sciences, Hebei Normal

University, Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China)

**Abstract:** The fuzzy comprehensive evaluation method was applied to evaluate the water environmental quality of three main monitoring sites (i. e., Wanei, Xiaoku and Jixian) of Hengshui Lake during the period from 2000 to 2007. The results showed that water environment quality of Hengshui Lake had not been improved during the period from 2001 to 2005, however, water environment quality of both Wanei and Jixian monitoring sites had been improved after 2006, and basically met class III criteria of water quality. The main contribution ratios of these pollutants at three monitoring sites also differed each other. As for Wanei site, the major pollutant in 2006 was ammonia nitrogen with a contribution rate of 0.621 and permanganate index was the major pollutant in the rest years. From 2000 to 2005, the contribution rates were 0.52, 0.48, 0.44, 0.46, 0.66, and 0.70, respectively and it was 0.45 in 2007. At Xiaoku site, the major pollutant in 2003, 2004, 2005, and 2007 was total phosphorus, the respective contribution rate was 0.56, 0.46, 0.38, and 0.42, respectively, however, the major pollutant was ammonia nitrogen in 2000, 2001, 2002 and 2006, the respective contribution rates were 0.58 (2000), 0.36 (2001), 0.43 (2002), and 0.838 (2006), respectively. In contrast, the major pollutant at Jixian site was ammonia nitrogen with the contribution rates of 0.60 (2000), 0.38 (2001), 0.39 (2002), and 0.583 (2006) and it was total phosphorus with contribution rate of 0.38 in 2003, whereas it was permanganate index in 2004, 2005 and 2007 with the respective contribution rate of 0.61, 0.50, and 0.38, respectively. On the basis of water environmental quality analysis, the reasons for the water environment pollution of Hengshui Lake were analyzed and some suggestions for the ecological conser-

vation and water quality management of this lake were also put forward.

**Keywords:** environmental science; Hengshui Lake; water environmental quality; fuzzy matrix; major contribution of pollutant

湖泊的水流速度缓慢,水体更新历时长,导致湖泊水体的自净能力受到一定程度的限制。湖泊水环境质量是维持湖泊生态系统健康的重要限制因子<sup>[1-2]</sup>。当前国内外对湖泊水环境质量进行评价的主要方法有单因子污染指数法,综合污染指数法,AHP法,模糊综合评价法等<sup>[3]</sup>。其中,单因子污染指数法将评价因子与评价标准作比较,确定各个评价因子的水质级别,在所选因子的水质级别中将最差的作为水质级别<sup>[4]</sup>;综合污染指数法中以内梅罗指数法最具代表性,该方法选取污染最严重的因子与评价标准之间建立一定数学关系,通过计算结果确定水质状况<sup>[5]</sup>;AHP法通过相关性分析,构建指标体系,确定权重等手段得出水环境质量的评价等级<sup>[3,6]</sup>。但是,单因子污染指数法和综合污染指数法均忽略了影响湖泊水环境质量的各种因子之间的相互影响,AHP法中通过专家打分来确定权重具有一定的主观性。

湖泊水环境系统受多种因子影响,各因子之间也存在各种复杂的联系,这种联系存在模糊性,各种超标因子对养殖湖泊水质状况的影响程度也存在模糊性<sup>[2,6-8]</sup>。模糊综合评价法将湖泊水环境系统作为一个部分信息已知的灰色系统<sup>[3]</sup>,该方法考虑了所有监测环境因子,依据各自的权重,综合分析所有监测因子对养殖湖泊环境的作用,进而评价湖泊水体水环境质量<sup>[9]</sup>。与传统评价方法相比,该方法能很好地解决评价过程中出现的模糊的难以量化的问题<sup>[10]</sup>,是定量评价湖泊水环境质量的有效方法。

衡水湖湿地生物多样性丰富,具有巨大的生态服务功能价值。它既为衡水湖区域人们的生产生活提供用水来源,也是北温带野生动植物聚集地和候鸟南北迁徙不同路线的交汇处<sup>[11]</sup>。同时,衡水湖是华北平原第二大淡水湖,也是南水北调中线工程中的重要调蓄工程<sup>[11]</sup>,其水环境质量的变化将对南水北调工程的水质有着重要的影响<sup>[12]</sup>。因此,运用模糊综合评价法对衡水湖湿地水环境进行评价,剖析其水环境质量演变规律可为衡水湖水水质管理提供科学依据,从而保证衡水湖区域的生态安全和供水水质。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

衡水湖湿地为国家级湿地自然保护区,位于河北省衡水市境内,向北与衡水市桃城区的彭杜乡的滏阳河相

连,向南紧邻河北省冀州市区(东经 115°27'45"—115°42'6",北纬 37°31'39"—37°42'18")。衡水湖所处气候区为暖温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同期。年平均气温大约为 13℃,一般情况下年际变动处在 11.5℃到 13.7℃;衡水湖地区年平均降水量为 518.9 mm,主要集中在 6—8 月,年蒸发量为 2 393 万 m<sup>3</sup><sup>[13]</sup>。

流经衡水湖的河流有滏阳河,滏阳新河以及滏东排河,属于海河水系的子牙河水系<sup>[14]</sup>。建国以来,由于大兴水利设施,河网水系的天然水文联系被人工沟渠所取代,这就造成了水生态系统结构的不完整和生态功能的残缺。因衡水湖地区年均降水量明显低于年均蒸发量,目前人工调水是维持衡水湖水量的主要方式<sup>[13]</sup>。随着经济的发展,人口的增加,工农业和生活用水量增加,导致地表水过量开采,形成大面积地下漏斗。加之工业废水,生活污水以及农业污水的排放,使得衡水湖水环境质量不容乐观。

### 1.2 数据来源及处理

选择衡水湖湿地三个水质监测站点(洼内、小库、冀县)在 2000—2007 年的水质监测数据,以溶解氧、氨氮、总磷、高锰酸盐指数为主要评价因子,对衡水湖水环境质量进行模糊综合评价。对每个监测站点各年不同时间的监测数据进行均值化处理代表相应年份的水质指标。

### 1.3 评价方法

1.3.1 单项指标评价 选取溶解氧,氨氮,总磷,高锰酸盐指数共四项评价指标构成评价因素集合,并参照地表水环境质量标准(GB3838—2002,表 1)建立所需评价集  $V$ ,其中  $V_i$  表示每个项目对应的标准限值,每一行是一个项目分别为溶解氧(DO)、氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、总磷(TP)、高锰酸盐指数[COD(Mn)]。

$$V = \left\{ \begin{array}{ccccc} \text{I 级} & \text{II 级} & \text{III 级} & \text{IV 级} & \text{V 级} \\ \left[ \begin{array}{ccccc} V_{10} & V_{11} & V_{12} & V_{13} & V_{14} \\ V_{20} & V_{21} & V_{22} & V_{23} & V_{24} \\ V_{30} & V_{31} & V_{32} & V_{33} & V_{34} \\ V_{40} & V_{41} & V_{42} & V_{43} & V_{44} \end{array} \right] & \left[ \begin{array}{c} \text{DO} \\ \text{NH}_4^+ - \text{N} \\ \text{TP} \\ \text{COD(Mn)} \end{array} \right] \end{array} \right.$$

取  $U$  为各单项指标集合, $U = \{\text{溶解氧 氨氮 总磷 高锰酸盐指数}\}$ ,对  $U$  中的每个单项指标进行评价,通过隶属度函数求出单项指标对于 5 个级别水的隶属度。把各监测站点的溶解氧、氨氮、总磷和高锰酸盐指数的监测值和各级浓度标准值带入隶属度函数公式,得到下面的模糊矩阵  $R$ :

$$R = \begin{bmatrix} r_{10} & r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{30} & r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{40} & r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix}$$

1.3.2 计算权重 每一监测单项指标都会对特定的水环境综合体产生影响,但各单项指标对某一水环境综合体的水环境质量产生影响的贡献存在差异;即不同的环境条件对应的监测因子对其影响程度不同。实

际监测所得到的各指标的浓度值越大,该指标超标程度越重,对环境产生的负面影响也越大。因此,在进行衡水湖水环境质量评价时应该对每一单项指标赋予权重。采用能够反映污染超标轻重的加权法计算权重,之后对各单项指标的权重进行归一化处理。通过计算各监测点位的各单项指标的权重,可得到如下矩阵  $B$ :

$$U = \{ \text{溶解氮} \quad \text{氨氮} \quad \text{总磷} \quad \text{高锰酸钾指数} \}$$

$$B = [b_{10} \quad b_{11} \quad b_{12} \quad b_{13}]$$

表 1 地表水环境质量标准(GB3838—2002)中四个指标的标准限值<sup>[15]</sup>

项目	I类	II类	III类	IV类	V类
溶解氧	≥7.5	7.5~6	6~5	5~3	3~2
氨氮	≤0.15	0.15~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
总磷(湖)	≤0.01	0.01~0.025	0.025~0.05	0.05~0.1	0.1~0.2
高锰酸盐指数	≤2	2~4	4~6	6~10	10~15

1.3.3 模糊矩阵复合运算 通过对各单项指标进行评价和对各单项指标赋予权重后得到相应的隶属度,即模糊矩阵  $R$  与权重模糊矩阵  $B$ ,将  $B$  与  $R$  进行复合运算可得到综合评价指数;得出的综合评价指数也可以用矩阵  $B \circ R$  表示。

$$V = \{ \text{I级} \quad \text{II级} \quad \text{III级} \quad \text{IV级} \quad \text{V级} \}$$

$$B \circ R = [x_{10} \quad x_{11} \quad x_{12} \quad x_{13} \quad x_{14}]$$

该矩阵得出的指数即为对应于集合  $V$  上各单项指标的隶属度。比较矩阵  $B$  中  $b_{10}, b_{11}, b_{12}, b_{13}$  最大值所对应的污染物即对应某监测站点的主要贡献污染物。 $B \circ R$  矩阵中  $x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}$  最大值对应的水质级别即为该监测站点在某一年的水质级别。

## 2 结果与分析

### 2.1 评价结果

以下所列为 2000—2007 年权重模糊矩阵  $B$  和权重模糊矩阵  $B$  与隶属度模糊矩阵  $R$  复合运算结果得到的综合评价指数矩阵,矩阵用  $B \circ R$  表示。其中,从权重模糊矩阵  $B$  可看出每年对应的站点的主要贡献污染物。

$$B_{2000} = \begin{bmatrix} 0.11 & 0.20 & 0.17 & 0.52 \\ 0.02 & 0.58 & 0.28 & 0.13 \\ 0.05 & 0.60 & 0.21 & 0.14 \end{bmatrix}$$

$$B \circ R_{2000} = \begin{bmatrix} 0.11 & 0.17 & 0.17 & 0.00 & 0.52 \\ 0.02 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.13 \\ 0.013 & 0.05 & 0.00 & 0.00 & 0.6 \end{bmatrix}$$

$$B_{2001} = \begin{bmatrix} 0.17 & 0.11 & 0.24 & 0.48 \\ 0.05 & 0.36 & 0.22 & 0.37 \\ 0.06 & 0.38 & 0.28 & 0.28 \end{bmatrix}$$

$$B \circ R_{2001} = \begin{bmatrix} 0.11 & 0.24 & 0.24 & 0.48 & 0.25 \\ 0.05 & 0.00 & 0.00 & 0.2 & 0.22 \\ 0.06 & 0.00 & 0.00 & 0.06 & 0.38 \end{bmatrix}$$

$$B_{2002} = \begin{bmatrix} 0.18 & 0.30 & 0.07 & 0.44 \\ 0.05 & 0.43 & 0.17 & 0.35 \\ 0.08 & 0.39 & 0.20 & 0.33 \end{bmatrix}$$

$$B \circ R_{2002} = \begin{bmatrix} 0.18 & 0.07 & 0.30 & 0.44 & 0.15 \\ 0.05 & 0.00 & 0.00 & 0.17 & 0.43 \\ 0.08 & 0.10 & 0.20 & 0.33 & 0.33 \end{bmatrix}$$

$$B_{2003} = \begin{bmatrix} 0.16 & 0.29 & 0.08 & 0.46 \\ 0.16 & 0.01 & 0.56 & 0.27 \\ 0.06 & 0.33 & 0.38 & 0.23 \end{bmatrix}$$

$$B \circ R_{2003} = \begin{bmatrix} 0.16 & 0.09 & 0.29 & 0.34 & 0.23 \\ 0.01 & 0.00 & 0.16 & 0.16 & 0.56 \\ 0.33 & 0.00 & 0.06 & 0.06 & 0.38 \end{bmatrix}$$

$$B_{2004} = \begin{bmatrix} 0.27 & 0.004 & 0.06 & 0.66 \\ 0.10 & 0.01 & 0.46 & 0.43 \\ 0.22 & 0.02 & 0.14 & 0.61 \end{bmatrix}$$

$$B \circ R_{2004} = \begin{bmatrix} 0.66 & 0.25 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.10 & 0.00 & 0.00 & 0.46 \\ 0.22 & 0.14 & 0.00 & 0.44 & 0.56 \end{bmatrix}$$

$$B_{2005} = \begin{bmatrix} 0.24 & 0.02 & 0.04 & 0.70 \\ 0.09 & 0.25 & 0.38 & 0.28 \\ 0.22 & 0.16 & 0.12 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$B \circ R_{2005} = \begin{bmatrix} 0.24 & 0.24 & 0.00 & 0.00 & 0.70 \\ 0.09 & 0.09 & 0.00 & 0.00 & 0.38 \\ 0.00 & 0.22 & 0.22 & 0.01 & 0.50 \end{bmatrix}$$

$$B_{2006} = \begin{bmatrix} 0.371 & 0.621 & 0.003 & 0.004 \\ 0.144 & 0.838 & 0.005 & 0.013 \\ 0.382 & 0.583 & 0.03 & 0.031 \end{bmatrix}$$

$$B \circ R_{2006} = \begin{bmatrix} 0.37 & 0.15 & 0.62 & 0.24 & 0.00 \\ 0.14 & 0.14 & 0.00 & 0.00 & 0.84 \\ 0.38 & 0.08 & 0.58 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$B_{2007} = \begin{bmatrix} 0.22 & 0.20 & 0.13 & 0.45 \\ 0.08 & 0.34 & 0.42 & 0.16 \\ 0.16 & 0.15 & 0.32 & 0.38 \end{bmatrix}$$

$$B0R_{2007} = \begin{bmatrix} 0.22 & 0.20 & 0.46 & 0.46 & 0.00 \\ 0.08 & 0.08 & 0.00 & 0.16 & 0.42 \\ 0.16 & 0.15 & 0.38 & 0.38 & 0.00 \end{bmatrix}$$

从矩阵 B0R 可得 2000—2007 年衡水湖水环境质量见表

表 2 2000—2007 年衡水湖各监测站点水环境级别

站点	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年
洼内	V	IV	IV	IV	I	V	III	III
小库	V	V	V	IV	V	V	V	V
冀县	V	V	IV	V	V	V	III	III

矩阵 B 得到每个站点中,不同污染物对该站点水质级别的确定的贡献率不同(图 1)。贡献率大的为该站点水质污染的主要贡献污染物。由图 1 可知,2006 年洼内监测站点水环境主要贡献污染物为氨氮,其余年份均为高锰酸盐指数。2003 年,2004 年,2005 年,2007 年小库监测站点水环境的主要贡献污染物均为总磷,而 2000 年,2001 年,2002 年,2006 年为氨氮。对于冀县监测站点而言,2000 年,2001 年,2002 年,2006 年的水环境主要贡献污染物为氨氮,2003 年为总磷,2004,2005,2007 年为高锰酸盐指数。

### 2.2 污染源原因分析

有研究表明,湖泊水环境质量与所在地区工农业发展和城市建设,人口增长关系密切<sup>[16-17]</sup>。2000—2005 年期间,除 2004 年洼内监测站点水质达到 I 类水外,洼内、冀县、小库三个监测站点的水质均为 V 类或 IV 类。其原因在于在此期间衡水湖周边污染型工业企业得到发展,且大部分企业不具备污水处理能力<sup>[18]</sup>,超标排放的工业废水和因大气沉降作用落入衡水湖内的工业生产排放的烟尘对衡水湖水环境污染产生巨大影响<sup>[19]</sup>。同时,衡水湖附近地区耕地大水漫灌引起化肥、农药随农田沥水流入衡水湖内,粗放的养殖方式和增肥措施也对衡水湖水体带来污染<sup>[11,18]</sup>。此外,衡水湖周边生活区缺乏生活污水处理和生活垃圾处理的基础设施,周边村民产生的生活污水直接排入衡水湖,生活垃圾直接堆放到衡水湖附近,垃圾渗滤液及雨水的冲蚀及坡地上污水汇流至衡水湖内,导致湖水水质恶化<sup>[11,18-19]</sup>。另外,衡水湖的东线引水路线通过卫千渠经大营、枣强等城镇,卫千渠竣工后即成为沿途大营、枣强县城关的排污渠道,且排污口排污超标严重<sup>[11,20]</sup>,这也是造成衡水湖水体污染的原因。

2,洼内监测站点水质除 2004 年达到 I 类水外,在 2000—2005 年期间均为 IV 类或 V 类水。冀县监测站点水环境质量变化趋势与洼内站点类似,在 2000—2005 年期间均为 IV 类或 V 类水。2006—2007 年,洼内监测站点和冀县监测站点水质均得到明显改善,达到了 III 类水。但是在 2000—2007 年期间,小库监测站点水环境质量没有得到改善,水环境质量为 IV 类或 V 类水。

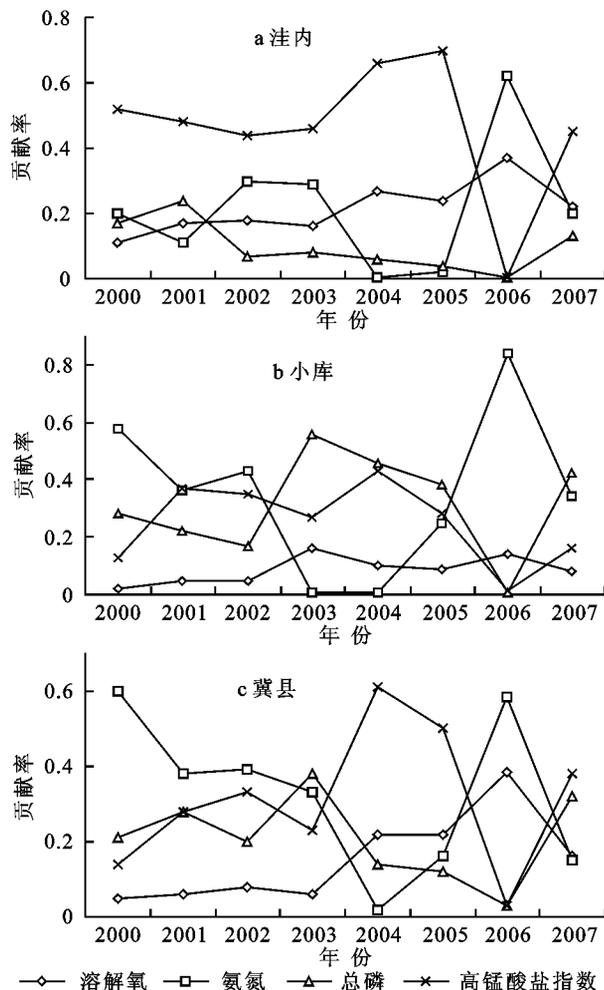


图 1 各站点不同污染物的贡献率

2004 年洼内监测站点水环境达到 I 类水,这可能是由于在监测数据中,2004 年洼内氨氮浓度值低于检出限值,由此可能对最终的评价结果产生影响。2004 年洼内氨氮浓度值偏低可能是由于引黄河水后,黄河流域的蒲草绒絮随引水进入衡水湖,蒲草大量繁殖,有效地吸收水体中的氮造成<sup>[11,21]</sup>。2006—2007 年,洼内和冀县监测站点水环境有了明显改善,

符合Ⅲ类用水标准,这是因为在 2004—2005 年期间,衡水湖周边地区对污染严重的采暖铸造业进行产业结构调整,到 2006 年,对衡水湖污染产生重大影响的橡胶化工小型企业也基本搬迁完毕,衡水湖受到的污染大大降低<sup>[11]</sup>。由此,在今后对衡水湖的管理和治理工作中,要借鉴这些经验,在衡水湖水体质和量两个角度保证衡水湖生态环境的良好。

### 3 结论

衡水湖三个监测站点洼内,冀县,小库的水环境质量在 2000—2005 年均无明显好转,在 2006 年后,洼内和冀县的水环境质量得到明显改善,达到Ⅲ类水,且衡水湖水体污染的主要贡献污染物为氨氮,总磷和高锰酸盐指数,主要由外部污染造成,与当地不合理的工业排污方式和居民的生活方式有关。衡水湖水环境质量的良好保持是其生态系统维持良好平衡的重要基础,也是衡水市经济社会发展的重大带动因素。在今后的发展过程中,应对衡水湖水环境质量做好监测预报,增加设立监测站点,完善测试设备,储备专业人才;严格管控污水排放,积极推进清洁生产,加强污水处理和垃圾处理基础设施建设;优先保证生态需水,开源与节流并举;应用生态补偿机制加强跨区域合作,走生态发展道路。

衡水湖是南水北调东线工程的调蓄湖泊,对衡水湖水环境进行保护不仅仅有益于衡水地区的经济社会的发展,也可以有效保证其周边地区的用水安全。衡水湖上游地区引水渠道污染问题也应该受到重视。就本研究而言,在某一历史时期阐述了衡水湖水环境质量状况及其原因,衡水湖作为整个流域系统中的节点,自身的水环境质量的良好保持可以从其中得到借鉴。湖泊水体的水环境质量与底泥中污染物的含量存在很大关系,但是由于数据来源的限制,无法得知衡水湖底泥受污染状况,进一步探求底泥对衡水湖水体污染的影响。所以,建议衡水湖保护区加强监测力度,完善监测系统,为衡水湖的保护和研究工作提供支持。

#### 参考文献:

- [1] Kallio K, Koponen S, Ylöstalo P, et al. Validation of MERIS spectral inversion processors using reflectance, IOP and water quality measurements in boreal lakes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,157:147-157.
- [2] 张燕萍,黄江峰,余智杰,等. 基于模糊综合评价法的太湖湖水环境质量评价[J]. *安徽农业科学*, 2014,42(25):

8733-8735.

- [3] 王维,纪枚,苏亚楠. 水质评价研究进展及水质评价方法综述[J]. *科技情报开发与经济*, 2012,22(13):129-131.
- [4] 毛飞剑,何义亮,徐智敏,等. 基于单因子水质标识指数法的东江河源段水质评价[J]. *安全与环境学报*, 2014(5): 327-331.
- [5] 徐彬,林灿尧,毛新伟. 内梅罗水污染指数法在太湖水质评价中的适用性分析[J]. *水资源保护*, 2014,30(2):38-40.
- [6] 张永祥,蔡德所,黄展案. 改进的 AHP 法在南宁内河水水质评价中的应用[J]. *广西水利水电*, 2012(3):11-13.
- [7] Doña C, Chang N B, Caselles V, et al. Integrated satellite data fusion and mining for monitoring lake water quality status of the Albufera de Valencia in Spain[J]. *Journal of environmental management*, 2015,151:416-426.
- [8] 江春波,张明武,杨晓蕾. 华北衡水湖湿地的水质评价[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2010(6):848-851.
- [9] 李艳利,李艳粉,徐宗学. 浑太河流域水环境质量综合分析评价[J]. *水土保持研究*, 2014,21(4):173-178.
- [10] 官冬杰,苏印,何政春. 基于模糊数学模型的城市生态系统健康动态变化评价[J]. *水土保持研究*, 2014,21(5):150-156.
- [11] 张彦增,尹俊岭,崔希东,等. 衡水湖湿地恢复与生态功能[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [12] 江春波,张明武,杨晓蕾. 南水北调工程对衡水湖水环境的影响预测[J]. *水力发电*, 2010,36(8):19-21.
- [13] 张学知. 衡水湖水面蒸发量计算[J]. *水科学与工程学报*, 2014(2):20-23.
- [14] 李亚楠,孙宝盛,张燕. 海河流域水质评价与预测[J]. *水土保持通报*, 2014,34(2):177-181.
- [15] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准[S]. GB3838—2002. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [16] Gu K, Liu J, Wang Y. Relationship between economic growth and water environmental quality of Anshan city in Northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2009,19(1):17-24.
- [17] Zhao H, You B, Duan X, et al. Industrial and agricultural effects on water environment and its optimization in heavily polluted area in Taihu Lake Basin, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2013,23(2):203-215.
- [18] 翟玉荣. 衡水湖污染现状及防治对策[J]. *衡水学院学报*, 2010,12(1):69-71.
- [19] 刘振杰. 河北衡水湖湿地水环境分析及综合防治对策[D]. 北京:中国农业大学,2004.
- [20] 康立新,戴乙,郭林. 海河流域水生态综合治理浅谈[J]. *海河水利*, 2014(5):18-20.
- [21] 周林飞,钟倩,董福君. 石佛寺人工湿地水体富营养化评价与分析[J]. *水土保持研究*, 2015,22(1):299-304.