

# 三峡水库蓄水运行后入出库断面水质评价与预测<sup>\*</sup>

黄 玥 黄志霖<sup>#</sup> 肖文发 曾立雄 马 良

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

**摘要** 三峡工程运行后库区水质问题关系库区环境安全和当地社会经济发展, 把握三峡库区水质变化趋势是水污染治理的基础。采用内梅罗污染指数法, 基于 2004—2016 年三峡库区长江干流入库断面(重庆朱沱)和出库断面(湖北宜昌南津关)水体 DO、高锰酸盐指数和氨氮的水质监测数据评价库区水质, 并利用差分自回归移动平均模型 (ARIMA 模型) 建立入出库断面水质变化趋势模型。结果表明: 2004—2016 年入库断面内梅罗污染指数 ( $I_p$ ) 为 1.72~3.22, 水质属轻污染—重污染, 变化波动大; 出库断面  $I_p$  为 0.82~1.46, 水质属清洁—轻污染, 总体保持平稳; 入库断面水质指标逐年偏向《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中 II 级标准, 出库断面水质指标逐年偏向 I 级标准, 入出库断面首要污染物是氨氮, ARIMA 模型预测显示未来入出库断面水质好转。

**关键词** 三峡工程 水质评价 内梅罗污染指数 差分自回归移动平均模型

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2019.02.017

Water quality evaluation and prediction of the reservoir inflow and outflow after the Three Gorges Project operation HUANG Yue, HUANG Zhilin, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, MA Liang. (Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

**Abstract:** Water quality is essential to the environmental security and socioeconomic development in the Three Gorges Reservoir Area after the Three Gorges Project operation. To analyze the changes of water quality in the reservoir after Three Gorges Project operation, the water quality and changing trends in the reservoir inflow (Zhutuo section in Chongqing) and outflow (Nanjinguan section in Hubei Yichang) of Changjiang River mainstream were evaluated based on the water quality monitoring data (DO, permanganate index, ammonia nitrogen) from 2004 to 2016 by using Nemerow pollution index method and ARIMA model. According to the calculation results, the Nemerow pollution index ( $I_p$ ) of inflow section fluctuated largely from 1.72 to 3.22, the water pollution level was between light pollution and heavy pollution. The  $I_p$  of outflow section ranged smoothly from 0.82 to 1.46, the water pollution level was between clear and light pollution. The pollution factors of inflow were closer to Class II of "Environmental quality standard of surface water" (GB 3838-2002), the pollution factors of outflow were closer to Class I. Ammonia nitrogen was the major pollutant in the reservoir. According to the ARIMA prediction model, water quality would keep well in the future.

**Keywords:** Three Gorges Project; water quality evaluation; Nemerow pollution index; ARIMA model

作为世界最大水库, 三峡水库水质持续受国际关注<sup>[1]45</sup>。三峡工程截流于 1997 年 11 月, 经历 3 次蓄水。2003 年 6 月首次蓄水至 135 m 且运行平稳, 2006 年 9 月蓄水至 156 m, 2008 年 9 月首次蓄水至 175 m, 2010 年 10 月正式蓄水至 175 m。

蓄水运行后, 库区内天然河道渐变为河道型水库, 库区干流和回水区水力要素改变, 各项水文要素也随之改变, 水环境和水生态在时空尺度发生变化<sup>[2]</sup>, 污染物浓度与分布也发生变化<sup>[3]</sup>, 引发水质变化<sup>[4]</sup>。三峡库区水质影响着当地生态环境, 伴随阶

段性蓄水, 库区水质及其变化趋势具有阶段性特征<sup>[5]54</sup>。研究三峡工程运行后库区入出库断面水质变化与发展趋势对库区水资源管理有重要意义。

水质评价为水资源管理和水体污染综合治理提供依据, 常用水质评价方法有人工神经网络法、Hopfield 网络、灰色聚类法、水质标识指数法、内梅罗污染指数法等<sup>[6]</sup>。本研究利用内梅罗污染指数法对入出库断面水质进行评价, 能避免计算多种污染物平均分配权重问题和人为赋值的影响, 涵盖多项污染因子平均污染状况, 也突出污染最严重的因

第一作者: 黄 玥, 女, 1994 年生, 硕士研究生, 研究方向为土地利用/覆被变化生态环境效应。<sup>#</sup> 通讯作者。

<sup>\*</sup> 国家科技支撑计划项目 (No. 2015BAD07B04)。

子<sup>[7]</sup>。采用差分自回归移动平均模型 (ARIMA 模型)<sup>[8-633]</sup>对不平稳的水质变化时间序列进行预测,以期获取水质变化趋势,评估三峡水库水位调度对库区水质及生态环境的影响,为三峡库区水资源管理、水污染治理等工作提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域概况

三峡库区位于四川盆地和长江中下游平原交汇处,地势多丘陵,属亚热带大陆季风气候带,降水和气温季节性变化明显。三峡库区特指因三峡工程淹没并有移民任务的地区,包含 20 多个县,库区东靠巫山,西达川东平行岭谷区,南靠云贵高原,北倚秦巴山脉。三峡水库范围从三斗坪坝址到上游江津,库区多为河道型水库;正常蓄水时,水库全长 663 km,水面平均宽度 1.1 km。库区干流入库断面所在地为重庆朱沱,出库断面所在地为湖北宜昌南津关。

### 1.2 数据来源

水质数据:原环境保护部数据中心的 地表水监测周报。

监测断面:(1)重庆朱沱断面—三峡库区长江干流入库口;(2)湖北宜昌南津关断面—三峡库区长江干流出库口。

监测时间:2004 年第 1 周至 2016 年最后 1 周。

水质评价指标:依据原环境保护部发布的《全国主要流域重点断面水质自动检测周报》和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),选择 DO、高锰酸盐指数和氨氮为水质指标因子。

三峡水库通过阶段性蓄水,在 2003、2006、2010 年水位分别达到 135、156、175 m,依据阶段性蓄水划分 4 个阶段:第 1 阶段(2004—2005 年)、第 2 阶段(2006—2007 年)、第 3 阶段(2008—2009 年)和第 4 阶段(2010 年后)。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 内梅罗污染指数( $I_p$ )

计算公式:

$$I_p = \sqrt{\frac{I_{\max}^2 + \bar{I}^2}{2}} \quad (1)$$

$$I_i = \frac{C_i}{L_i} \quad (2)$$

式中: $I_{\max}$ 为所有水质指标中污染指数最大值; $\bar{I}$ 为所有水质指标污染指数均值; $I_i$ 为第  $i$  项水质指标

单项污染指数; $C_i$ 为第  $i$  项水质指标实测值,mg/L; $L_i$ 为第  $i$  项水质指标的标准值,mg/L。

对于 DO,采用以下公式计算:

$$I_p = \begin{cases} |D_s - D| / (D_s - D_b), D \geq D_b \\ 10 - 9D / D_b, D < D_b \end{cases} \quad (3)$$

式中: $D_s$ 、 $D$ 、 $D_b$ 为 DO 饱和值、实测值、评价标准值,mg/L<sup>[9]</sup>。

水质污染等级划分: $I_p \leq 1$ ,清洁; $1 < I_p \leq 2$ ,轻污染; $2 < I_p \leq 3$ ,污染; $3 < I_p \leq 5$ ,重污染; $I_p > 5$ ,严重污染。

#### 1.3.2 污染分担率( $k_i$ )

为找出对水质影响最大的污染物,根据式(4)计算  $k_i$ 。将不同污染物的  $k_i$ 按从大到小顺序累加,使  $\sum k_i > 70\%$  的前几项为主要污染物<sup>[10]</sup>。

$$k_i = \frac{I_i}{\sum I_i} \times 100\% \quad (4)$$

#### 1.3.3 ARIMA 建模原理和步骤

ARIMA 模型又称 B-J 法,是经典的时间序列模型。ARIMA 模型将时间序列视为可用数学模型概括的随机过程;基于历史数据和数学模型对未来进行预测<sup>[8]634, [11-12]</sup>。

对于一个非平稳的时间序列,可经过  $d$  次差分后变为平稳序列,通过计算自相关 (ACF) 和偏相关 (PACF) 拖尾情况确定模型中的 ACF 拖尾起始点 ( $p$ ) 和 PACF 拖尾起始点 ( $q$ ),再根据 AIC 和 BIC 准则确定最优模型<sup>[13-14]</sup>,建立本研究所用的 ARIMA ( $p, d, q$ ) 模型。

SPSS 软件具有模块预处理、填补缺值、建立时间序列和 平稳化、结果图形输出 (序列图、序列 ACF 图、序列 PACF 图) 等功能,其中分析模块包括 ARIMA 模型<sup>[15-16]</sup>,满足上述工作要求。

## 2 结果与分析

### 2.1 入出库断面水质指标变化

#### 2.1.1 年变化

2004—2016 年长江干流入出库断面水质指标年均值如图 1 所示。入出库断面 DO 变化波动大,整体符合 GB 3838—2002 中 I 级标准;在少数年份,2008 年入库断面 DO (6.96 mg/L) 和 2010、2011 年出库断面 DO (7.41、7.49 mg/L) 劣于 I 级标准。2006—2015 年,入出库断面 DO 变化趋势一致,总体先下降再上升。其中,2006—2009 年出库断面 DO 大于入库,2010—2015 年则相反。近年,入库断

面 DO 下降趋势显著,出库断面 DO 稳定维持在 I 级标准内。

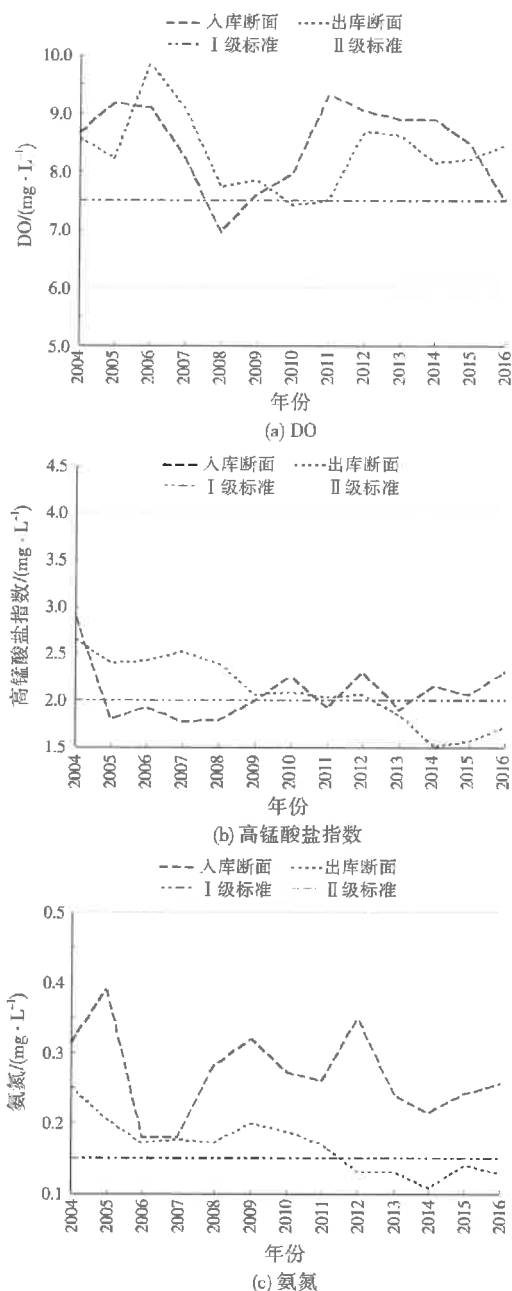


图1 2004—2016年长江干流入出库断面水质指标年均值  
Fig.1 Annual average water quality indicators changes at inflow and outflow of Changjiang River mainstream during 2004-2016

入出库断面高锰酸盐指数围绕 I 级标准波动,两者变化趋势相反。2005 年后,入库断面高锰酸盐指数呈上升趋势,2005—2009 年符合 I 级标准,此后总体符合 II 级标准;出库断面高锰酸盐指数呈下降趋势,2012 年前符合 II 级标准,此后符合 I 级标准。2009 年前出库断面高锰酸盐指数大于入库,此

后基本相反。

入出库断面氨氮整体保持 II 级标准。入库断面氨氮在 II 级标准内大幅波动且无明显长期趋势,浓度远高于出库断面;出库断面氨氮整体呈下降趋势,2011 年后由 II 级好转至 I 级。

监测时段入库断面 DO、高锰酸盐指数、氨氮逐渐偏向 II 级标准,出库断面 DO、高锰酸盐指数、氨氮浓度大体逐渐偏向 I 级标准,入库断面水质劣于出库,且水质恶化严重。经配对样本  $T$  检验,入出库断面 DO、高锰酸盐指数无显著差异 ( $P > 0.05$ ),而氨氮差异显著 ( $P < 0.01$ )。

### 2.1.2 蓄水阶段性变化

入出库断面 DO 变化有显著阶段特征。蓄水第 1、4 阶段,入库断面 DO 整体大于出库,蓄水第 2、3 阶段呈相反变化。蓄水第 2、3 阶段,入出库断面 DO 大体为下降趋势;蓄水第 4 阶段,入出库断面 DO 变化大体为上升趋势,库区阶段性蓄水对入出库断面 DO 变化影响显著。

蓄水第 1、2 阶段,出库断面高锰酸盐指数大于入库,蓄水第 3、4 阶段呈相反变化。入库断面高锰酸盐指数大体呈上升趋势,趋近 II 级标准,出库断面高锰酸盐指数大体呈下降趋势,趋近 I 级标准,入出库断面高锰酸盐指数变化趋势相反。入出库断面高锰酸盐指数变化长期趋势明显,但无明显蓄水阶段性特征。

### 2.2 $I_p$ 年变化

2004—2016 年入出库断面  $I_p$  年均变化见图 2。入库断面  $I_p$  为 1.72~3.22,水质属轻污染—重污染,总体变化波动大,存在明显阶段性特征;出库断面  $I_p$  为 0.82~1.46,水质属清洁—轻污染,总体变化平稳,  $I_p$  存在下降趋势。经配对样本  $T$  检验,入出库断面  $I_p$  差异显著 ( $P < 0.01$ )。

2004—2016 年长江干流入出库断面水质指标年均值的  $k_i$  如表 1 所示。入库断面  $k_i$  平均值为氨氮 > 高锰酸盐指数 > DO,首要污染物是氨氮。入库断面  $I_p$  与氨氮的  $R$  为 0.594,显著正相关 ( $P < 0.05$ )。

出库断面  $k_i$  平均值为氨氮 > 高锰酸盐指数 > DO,主要污染物是氨氮和高锰酸盐,两者  $k_i$  相近。出库断面  $I_p$  与氨氮、高锰酸盐指数时间分布相似,都呈下降趋势。出库断面  $I_p$  与氨氮、高锰酸盐指数的  $R$  分别为 0.937、0.820,都呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。

### 2.3 入出库断面水质变化趋势

利用 ARIMA 模型预测入出库断面水质变化。

表 1 2004—2016 年长江干流入出库断面水质指标年值的  $k_i$

Table 1 Variations of  $k_i$ , evaluation factors in inflow and outflow of Changjiang River mainstream durling 2004-2016 %

| 断面 | DO    |       |       | 高锰酸盐指数 |       |       | 氨氮    |       |       |
|----|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | 最大值   | 最小值   | 平均值   | 最大值    | 最小值   | 平均值   | 最大值   | 最小值   | 平均值   |
| 入库 | 30.61 | 4.80  | 15.99 | 42.21  | 22.94 | 31.69 | 68.79 | 40.70 | 52.32 |
| 出库 | 34.69 | 13.77 | 26.69 | 40.53  | 29.19 | 35.82 | 48.06 | 32.90 | 37.50 |

图 2 显示入库断面  $I_p$  变化波动较大,是不平稳的时间序列,一次差分后序列趋于平稳( $d=1$ )。一次差分后 ACF 在  $p=4$  时出现拖尾, PACF 在  $q=4$  时出现拖尾。ARIMA(4,1,4)残差项 ACF 和 PACF 的 Q 检验系数都落在置信区间内。模型拟合优度统计量中  $R^2=0.809$ ,平稳  $R^2=0.626$ ,都在取值范围内;离群值=0, BIC=-1.98;模型拟合效果好。由图 3(a)可见,模型拟合值和实测值稍有误差,但仍在置信区间内,表明 ARIMA(4,1,4)模型对入库断面  $I_p$  变化拟合及预测较准确。

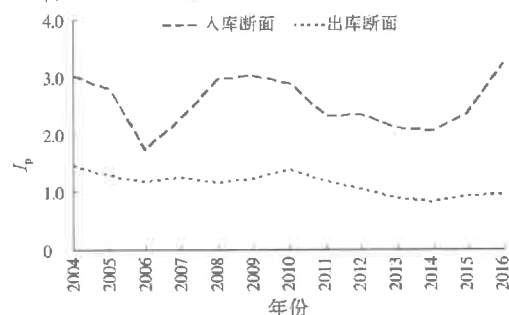


图 2 2004—2016 年入出库断面  $I_p$  年变化  
Fig.2 Annual variations of  $I_p$  in inflow and outflow of Changjiang River mainstream durling 2004-2016

图 2 显示出库断面  $I_p$  年变化无明显波动,为平稳的时间序列( $d=0$ )。ARIMA 模型运算结果表明:出库断面  $I_p$  年变化 ACF 在  $p=5$  时出现拖尾, PACF 在  $q=4$  时出现拖尾, ARIMA(5,0,4)残差项 ACF 和 PACF 的 Q 检验系数都落在置信区间内。模型拟合优度统计量中  $R^2=0.569$ ,平稳  $R^2=0.569$ ,都在取值范围内;离群值=0, BIC=0.967;模型拟合效果好。由图 3(b)可见,拟合值和实测值稍

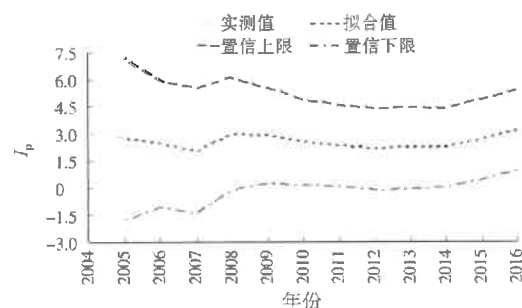
有误差,但仍在置信区间内,表明 ARIMA(5,0,4)模型对出库断面  $I_p$  年变化拟合及预测较准确。

依照《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008),将预见期间内的 20% 实测值作为允许误差,检验 2004—2016 年入库断面  $I_p$  年变化 ARIMA(4,1,4)模型和出库断面  $I_p$  年变化 ARIMA(5,0,4)模型的预测精度。结果显示:ARIMA(4,1,4)模型预测合格率为 92.31%,精度等级为甲级;ARIMA(5,0,4)模型预测合格率为 100.00%,精度等级为甲级。

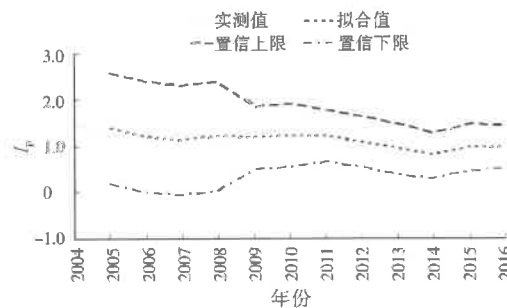
2017—2020 年入库断面年均  $I_p$  预测值为 3.37、2.58、2.01、2.03,总体呈下降趋势,水质由重污染好转为污染状态;2017—2020 年出库断面年均  $I_p$  预测值为 1.00、0.96、0.75、0.66,呈下降趋势,水质仍保持清洁状态。

### 3 讨论

(1) 入出库断面 DO 整体都符合 I 级标准,无显著差异;入库断面氨氮劣于出库,且随时间推移,出库断面水质好转趋势明显。整体来看,DO 在时空尺度无显著变化,高锰酸盐指数和氨氮在时空尺度差异显著,这与李进林等<sup>[1]48</sup>研究结果一致。出库断面水质优于入库,说明库区水质受区间效应影响,这与李进林等<sup>[1]49</sup>及王小煊等<sup>[5]58</sup>研究结果一致。引发水质差异的水文因素包括:库区蓄水后,水文条件改变,天然河道转变为典型河道型水库,沿程水深增加且水面变宽,造成水流减缓<sup>[17]、[18]26</sup>,水体滞留时间增加,泥沙沉降作用加强,库区输沙量大幅减少<sup>[19]</sup>,导致近坝区域的入库断面水体清洁能力弱



(a) 入库断面



(b) 出库断面

图 3 入出库断面  $I_p$  年变化值拟合结果

Fig.3 Fitting graph of annual variations of  $I_p$  of inflow and outflow

于出库断面。水体中有机物、重金属等物质被水体颗粒大范围吸附后沉入底泥,水体经澄清作用后透明度增加,藻类植物经阳光刺激后快速生长,大量分解有机物和氮素,有助于沿程污染物浓度下降,使出库断面水质比入库清洁<sup>[20-22]</sup>。水库蓄水后,有机污染物大量沉积,所需 DO 减少,而蓄水后水位抬高导致大气复氧能力减弱,综合作用下,入出库断面 DO 差异小<sup>[18]23</sup>。

(2) 出库断面水质常年优于入库断面,表明库区区间对水质产生影响。出库断面水质稳定保持在清洁—轻污染状态,入库断面水质在轻污染—重污染间波动,入出库断面水质年变化存在明显阶段性变化,与阶段性蓄水吻合。入出库断面  $I_p$  变化与氨氮相关性最强,但与 DO 存在类似的阶段性蓄水特征,这与王小煊等<sup>[5]560</sup> 研究结果一致,说明内梅罗污染指数法对 DO 较敏感,DO 对库区干流水质状况产生重要影响,也证明库区水质受阶段性蓄水影响。

出库断面水质优于入库,说明三峡库区干流水质受外来物影响,人为活动产生大量污染,污染物主要源于库区污染排放和外源污染物输入<sup>[24]735</sup>,包括工业废水排放、城镇生活污染物排放、农业面源污染和船舶污染物排放<sup>[1]50</sup>。杨乐等<sup>[24]737</sup> 研究表明,库区上游农村人口比例大,农业、养殖业生产活动造成库区农业面源污染严重,使大量有机氮磷和菊酯类化肥农药流入库区干支流,造成入库断面高锰酸盐指数、氨氮增大。而库区内采取了一系列水污染防治措施,推进生态农业和面源污染治理,污水处理厂建立和农业生产方式改变也减小了入江污染负荷<sup>[25-26]</sup>。

三峡水库蓄水使水体流速下降,一方面降低污染物扩散能力,导致污染物浓度升高;另一方面,污染物滞留时间长,河流沿程泥沙吸附沉降使污染物浓度下降<sup>[27-28]</sup>。本研究显示入库断面水质差于出库,说明后者作用大于前者。

(3) 利用 ARIMA 模型对水质年度变化进行预测。预测结果显示,2017—2020 年库区干流入出库断面水质状况好转,入库断面  $I_p$  变化有好转趋势,出库断面  $I_p$  平稳下降,库区污染物主要源于入库的非点源污染和库区使用农药化肥引发的面源污染,其次是城市污水排放,随库区污染治理力度加强,城镇化发展和农业改革使得断面水质呈现好转趋势<sup>[24]732</sup>。三峡工程进入正常运行期后,未来水质趋势主要受入库来水量、泥沙沉积量、农业生产等因素影响<sup>[5]564</sup>。

#### 4 结论与建议

采用内梅罗污染指数法对三峡水库入出库断面

水质评价,入出库断面水质差异明显;入库断面水质多为污染状态, $I_p$  变化波动大,蓄水阶段性特征明显;出库断面水质状优于入库, $I_p$  变化波动小且水质常年保持清洁—轻污染状态。氨氮是入出库断面水质主要污染物。内梅罗污染指数法在三峡入出库断面中具有较好的适用性,就水资源管理保护工作方面,该法评价结果突出超标最严重的水质指标因子,且  $I_p$  表现为简单分值,有助于对水污染程度提出大致评判。

鉴于水环境复杂性和水体多样性,本研究采用 ARIMA 模型预测入出库断面水质变化,模型精度为甲等,模拟和预测结果表明所建模型高度拟合水质发展趋势,该模型便捷有效地分析预测三峡库区干流断面水质结果,对三峡库区水质管理工作有一定帮助。影响模型使用效果的因素很多,如时间滞后、温度、样本数等,在实际工作中,需及时更新模型所需的监测数据、升级模型、提高预测精度。尽管库区干流水质预测结果良好,但污染现状严峻,仍需加大污染治理力度。

#### 参考文献:

- [1] 李进林,谭晶月,韦杰,等.三峡水库入出口水质及其与水情特征和排污负荷的关系[J].三峡生态环境监测,2017,2(1).
- [2] 邹家祥,翟红娟.三峡工程对水环境与水生态的影响及保护对策[J].水资源保护,2016,32(5):136-140.
- [3] 彭春兰,江玉姣,张馨月.三峡水库蓄水前后库区及坝下水质变化与成因探讨[J].水利水电快报,2016,37(11):35-40.
- [4] 刘跃晨,袁兴中,王云.三峡库区重庆段水质安全综合评价研究[J].人民长江,2014,45(18):10-14.
- [5] 王小煊,邵景安,王金亮,等.三峡库区长江干流入出库水质评价及其变化趋势[J].环境科学学报,2017,37(2).
- [6] 张光贵,王丑明,田琪.三峡工程运行前后洞庭湖水质变化分析[J].湖泊科学,2016,28(4):734-742.
- [7] 王书锦,刘云根,侯磊,等.基于内梅罗指数的阳宗海湖滨湿地水环境质量评价[J].环境污染与防治,2016,38(8):6-9.
- [8] 王耕,王嘉丽,苏柏灵.基于 ARIMA 模型的辽河流域生态足迹动态模拟与预测[J].生态环境学报,2013,22(4).
- [9] 夏炳训,宁璇璇,杨鲁宁,等.浅谈海水溶解氧污染指数计算中的有关问题[J].环境污染与防治,2013,35(4):107-109.
- [10] 申锐莉,鲍征宇,周旻,等.洞庭湖湖区水质时空演化(1983—2004 年)[J].湖泊科学,2007,19(6):677-682.
- [11] 刘微微,宋汉周,霍吉祥,等.基于季节 ARIMA 模型的紧水滩水库近坝区水质分析预测[J].勘察科学技术,2013(4):31-35.
- [12] 钟荣华,傅开道,何大明,等.基于 ARIMA 模型的补远江含沙量预测[J].水文,2011,31(5):48-52.
- [13] 张东莱.ARIMA 模型在水位预测中的应用[J].南水北调与水利科技,2016,14(2):238-240.
- [14] 唐启义,冯明光.DPS 数据处理系统——实验设计、统计分析及模型优化[M].北京:科学出版社,2006.
- [15] 旦木仁加甫.中长期水文预报与 SPSS 应用[M].郑州:黄河水利出版社,2011.

(下转第 239 页)