

基于模糊综合评价法的大伙房水库 上游水质评价及预测

闫滨, 杨 骁

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 运用模糊综合评价法及层次分析法对辽宁省浑河大伙房水库上游北杂木、古楼及台沟断面丰、枯水期的水质进行评价, 同时将水质评价结果(水质模糊综合评价指数)与对应上游来水量进行相关性分析, 建立来水量与水质模糊综合评价指数的非线性回归模型, 并利用该模型进行水质预测。结果表明: 非线性回归模型具有较高的拟合效果, 应用该模型可以对上游各来水断面的水质类别进行预测。

关键词: 水质评价; 水质预测; 模糊综合评价法; 层次分析法; 非线性回归模型; 大伙房水库上游; 水质模糊综合评价指数

中图分类号: TV211.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)02-0284-05

Water quality evaluation and prediction of upstream of Dahuofang Reservoir in the Hunhe River based on the fuzzy comprehensive evaluation

YAN Bin, YANG Xiao

(Shenyang Agricultural University, College of Water Conservancy, Shenyang 110866, China)

Abstract: Water quality in the upstream of Dahuofang Reservoir of the Hunhe River was evaluated in three detecting sections (Beizamu, Gulou, and Taigou) using the fuzzy comprehensive evaluation method and analytic hierarchy process (AHP). The correlation analysis between water quality evaluation results (water quality fuzzy comprehensive evaluation index) and corresponding upstream inflow was preformed. A nonlinear regression model of the upstream water inflow and water quality fuzzy comprehensive evaluation index was developed to predict water quality. The results showed that the nonlinear regression model has high fitting accuracy and it can predict the water quality categories of each upstream inflow section.

Key words: water quality evaluation; water quality prediction; fuzzy comprehensive evaluation method; Analytic Hierarchy Process (AHP); nonlinear regression model; upstream of Dahuofang Reservoir; water quality fuzzy comprehensive evaluation index

大伙房水库输水工程是解决辽宁省中部沈阳、鞍山、抚顺、营口、辽阳、盘锦及南部大连七城市水资源短缺问题的主要供水水源地。大伙房水库水质级别直接影响辽宁各大城市居民饮用水安全, 所以对近年来大伙房水库入库水质进行评价及预测水质显得十分必要。

水体本身是一个多元的复杂体系, 影响水质评价的物理、化学及生物因素具有不确定性和模糊性, 常用的评价方法可概括为单因子指数评价法和综合评价法两大类, 其中综合评价法又包括模糊综合评价法、模糊模式识别法、灰色系

统综合评价法、灰关联分析法、人工神经网络法、主成分分析法、综合水质标识指数法及标准类别指数评价法^[1-9]。水质预测模型大致可概括为数理统计预测方法、灰色系统预测法、神经网络模型预测法、水质模拟模型预测法及混沌理论预测法等^[10-14]。

本文运用模糊综合评价法及层次分析法对大伙房水库上游水质进行综合评价, 建立来水量与水质模糊综合评价指数的非线性回归模型, 可用于突发洪水影响下的水质预测, 进行水质污染预警。

收稿日期: 2014-08-01 修回日期: 2015-02-03 网络出版时间: 2014-03-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150320.1636.010.html>

基金项目: 辽宁省重大科技计划项目(2012212001)

作者简介: 闫滨(1972), 女, 辽宁沈阳人, 副教授, 博士, 主要从事生态水利及水工结构健康监控方面的研究。E-mail: yanbin2002@163.com

通讯作者: 杨骁(1989), 男, 辽宁沈阳人, 主要从事水质分析方面的研究。E-mail: yangxiao7686288@163.com

1 模糊综合评价法

模糊综合评价法的基本思路是:首先运用隶属函数对各项污染因子分别进行评价,其集合构成一个模糊矩阵 R ;再考虑各项污染因子对水质影响的程度大小给予不同的权重 $W_{\text{总}}$,进而构成一个权重集;最后通过复合运算,得出水质模糊综合评价指数 FCL ,藉此判别水质级别。

1.1 单因子隶属度函数

表征水体质量的各项因子的监测值可构成一个因子集 $\{x_i\}$,而根据不同用途和特征划分的水质级别标准又构成一个标准集 $\{S_{ij}\}$ 。

对于第 1 级水质,隶属度函数为

$$y_{i1} = \begin{cases} 1 & x_i \leq S_{i1} \\ \frac{x_i - S_{i2}}{S_{i1} - S_{i2}} & S_{i1} < x_i < S_{i2} \\ 0 & x_i \geq S_{i2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i 为第 i 种因子, ($i = 1, 2, \dots, n$); x_i 为第 i 种因子的实测浓度; S_{i1} 为第 1 级水质标准中规定的第 i 种因子标准浓度值; S_{i2} 为第 2 级水质标准中规定的第 i 种因子的标准浓度值。

对于第 2 级至 $(m-1)$ 级水质,其隶属度函数为

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i \leq S_{ij} \\ \frac{x_i - S_{i(j-1)}}{S_{ij} - S_{i(j-1)}} & S_{i(j-1)} < x_i < S_{ij} \\ \frac{x_i - S_{i(j+1)}}{S_{ij} - S_{i(j+1)}} & S_{ij} < x_i < S_{i(j+1)} \\ 0 & x_i \geq S_{i(j+1)} \text{ 或 } x_i \leq S_{i(j-1)} \end{cases} \quad (2)$$

$j = 2, 3, \dots, (m-1)$

对于第末级 m 水质,隶属度函数为

$$y_{im} = \begin{cases} 1 & x_i \geq S_{im} \\ \frac{x_i - S_{i(m-1)}}{S_{im} - S_{i(m-1)}} & S_{i(m-1)} < x_i < S_{im} \\ 0 & x_i \leq S_{i(m-1)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_i 为第 i 种因子实测值; S_{im} 为第 i 种因子的第 m 级评价标准。

1.2 模糊矩阵的建立

利用以上隶属函数,按照水质分级标准,可以计算出各项因子分别对各级水质指标的隶属度,从而构成模糊矩阵 R 如下:

$$R = (y_{ij})_{n \times m} = \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & \dots & y_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.3 确定权重

权重是基于污染物对水质影响的大小来确定的,准确地计算各污染指标权重是评价水质的重点。运用层次分析法确定权重可有效避免主观臆断。

(1) 建立层次结构模型。将模型构成划分为目标层 A 、准则层 B 和方案层 C 三个层次。

(2) 构造判断矩阵。通过对准则层相互比较,确定各准则对于目标的标度值,即构造目标层判断矩阵 $A-B$;对方案层相互比较,确定各方案对于准则层的标度值,即构造准则

层判断矩阵 $B-C$ 。在层次分析法中,引进矩阵判断标度(1 至 9 标度法)。

(3) 层次单排序。根据矩阵理论计算得出同一层次各因素对于上一层次对应因素的相对重要性权重值 W ,它是本层次中所有元素对上一层次而言进行重要性排序的基础。层次单排序可归结为求判断矩阵的特征值和特征向量问题。即对于判断矩阵 A ,计算满足: $A W = \lambda_{\text{max}} W$ 的特征根与特征向量。

求出矩阵的最大特征值后,还必须进行矩阵一致性检验。评价判断矩阵的一致性检验指标为 $CI = \frac{\lambda_{\text{max}} - n}{n - 1}$ (n 为判断矩阵的阶数),将 CI 与平均一致性指标 RI 进行比较,即 $CR = \frac{CI}{RI}$,当 $CR < 0.1$ 时,认为判断矩阵满足一致性,否则就要对判断矩阵进行调整。1 至 10 阶矩阵的 RI 值见表 1。

表 1 1 至 10 阶矩阵的 RI 值
Tab. 1 RI values of order 1-10 matrices

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

(4) 层次总排序。层次总排序是计算同一层次所有因素对于最高层相对重要性数值,这一过程是从最高层向最低层逐层进行的。采用层次分析法确定权重 $W_{\text{总}}$ (表 2)。

表 2 采用层次分析法确定权重
Tab. 2 Weights determination using Analytic Hierarchy Process (AHP) method

层次 C	层次 B				A 层次总排序 (权重 $W_{\text{总}}$)
	B_1	B_2	...	B_m	
c_1	b_{11}	b_{12}	...	b_{1m}	$\sum_{i=1}^m b_i c_{1i}$
c_2	c_{21}	c_{22}	...	c_{2m}	$\sum_{i=1}^m b_i c_{2i}$

1.4 模糊综合评价

将权重向量 $W_{\text{总}}$ 和模糊矩阵 R 合成,得到模糊综合评价结果矩阵:

$$B = W_{\text{总}} \cdot R \quad (5)$$

构造水质标准类别矩阵 $S = [1, 2, 3, 4, 5]$,则计算模糊综合评价指数为

$$FCL = B \cdot S \quad (6)$$

2 基于模糊综合评价法的浑河大伙房水库上游段水质评价

针对浑河上游北杂木、苏子河古楼和社河台沟 3 个断面,选取 7 种实测污染因子作为水质评价集,即评价集 $U = \{\text{溶解氧, 氨氮, 高锰酸盐指数, BOD}_5, \text{总氮, 总磷, 粪大肠菌群}\}$ 。以《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 评价标准为依据建立评价标准集 $V = \{\hat{N}, \hat{0}, \hat{0}, \hat{0}, \hat{0}\}$,采用基于层次分析法的模糊综合评价法进行水质评价。

2.1 建立模糊矩阵

应用式(1) - 式(4) 计算得到各断面的模糊矩阵。以 2011 年为例,北杂木、古楼和台沟断面模糊矩阵 R 分别为

$$R_{\text{北杂木}} = \begin{bmatrix} \tilde{N} & \hat{0} & \hat{0} & \hat{0} & \hat{0} \\ 1 & \hat{0} & \hat{0} & \hat{0} & \hat{0} \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.943 & 0.057 & 0 & 0 & 0 \\ 0.34 & 0.66 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.081 & 0.919 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{溶解氧} \\ \text{氨氮} \\ \text{高锰酸盐指数} \\ \text{DOD}_5 \\ \text{总氮} \\ \text{总磷} \\ \text{粪大肠菌群} \end{matrix}$$

$$R_{\text{古楼}} = \begin{bmatrix} \tilde{N} & \hat{0} & \hat{0} & \hat{0} & \hat{0} \\ 1 & \hat{0} & \hat{0} & \hat{0} & \hat{0} \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.216 & 0.784 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{溶解氧} \\ \text{氨氮} \\ \text{高锰酸盐指数} \\ \text{DOD}_5 \\ \text{总氮} \\ \text{总磷} \\ \text{粪大肠菌群} \end{matrix}$$

$$R_{\text{台沟}} = \begin{bmatrix} \tilde{N} & \hat{0} & \hat{0} & \hat{0} & \hat{0} \\ 1 & \hat{0} & \hat{0} & \hat{0} & \hat{0} \\ 0.75 & 0.25 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.223 & 0.777 & 0 & 0 & 0 \\ 0.065 & 0.935 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{溶解氧} \\ \text{氨氮} \\ \text{高锰酸盐指数} \\ \text{DOD}_5 \\ \text{总氮} \\ \text{总磷} \\ \text{粪大肠菌群} \end{matrix}$$

2.2 评价指标的权重

根据层次分析法将单排序分为 A、B、C 三个层次(表 3)。采用层次分析法确定污染因子权重,计算结果见表 4。

总排序一致性检验: $CI = \frac{\sum_{i=1}^3 b_i (CI)_i}{3} = 0.0004, CR =$

$0.0003 < 0.1$, 即总排序满足一致性。

因素集 $U = \{\text{溶解氧, 氨氮, 高锰酸盐指数, BOD}_5, \text{总氮, 总磷, 粪大肠菌群}\}$ 的权重集 $W_{\text{总}} = \{0.035, 0.217, 0.088, 0.111, 0.011, 0.230, 0.308\}$ 。

表 3 层次单排序

Tab. 3 The single hierarchical arrangement

层次 A	权重		
层次 B	浑河北杂木断面	苏子河古楼断面	社河台沟断面
层次 C	溶解氧、氨氮、高锰酸盐指数、BOD ₅ 、总氮、总磷、粪大肠菌群		

表 4 采用层次分析法确定的污染因子权重

Tab. 4 Weights of pollution factors determined by Analytic Hierarchy Process (AHP)

层次	B1	B2	B3	A 层次总排序	
	权重	权重	权重	权重	排序
C1	0.043	0.026	0.035	0.035	6
C2	0.196	0.263	0.211	0.217	3
C3	0.079	0.060	0.094	0.088	5
C4	0.094	0.079	0.120	0.111	4
C5	0.013	0.010	0.011	0.011	7
C6	0.526	0.420	0.156	0.230	2
C7	0.050	0.143	0.372	0.308	1

注: 本文数据来自 2004 年-2012 年大伙房水库管理局水质监测数据。

2.3 模糊综合评价

采用 2004 年-2012 年水质监测数据,运用模糊综合评价法计算浑河大伙房水库上游北杂木、古楼及台沟断面全年及丰、枯水期的水质模糊综合评价指数 FCL 及水质级别,结果见表 5。

表 5 2004 年-2012 年各断面季节性水质评价

Tab. 5 Seasonal water quality evaluation of each section from 2004 to 2012

年份	浑河北杂木断面					苏子河古楼断面					社河台沟断面							
	全年 FCL	水质类别	丰水期 FCL	类别	枯水期 FCL	类别	全年 FCL	类别	丰水期 FCL	类别	枯水期 FCL	类别	全年 FCL	类别	丰水期 FCL	类别	枯水期 FCL	类别
2004	1.81	$\hat{0}$	1.72	$\hat{0}$	1.98	$\hat{0}$	1.86	$\hat{0}$	1.54	$\hat{0}$	1.53	$\hat{0}$	1.66	$\hat{0}$	1.6	$\hat{0}$	1.63	$\hat{0}$
2005	1.69	$\hat{0}$	1.73	$\hat{0}$	1.79	$\hat{0}$	1.72	$\hat{0}$	1.62	$\hat{0}$	1.51	$\hat{0}$	1.57	$\hat{0}$	1.59	$\hat{0}$	1.63	$\hat{0}$
2006	1.86	$\hat{0}$	1.75	$\hat{0}$	1.89	$\hat{0}$	1.63	$\hat{0}$	1.47	\tilde{N}	1.58	$\hat{0}$	1.6	$\hat{0}$	1.47	\tilde{N}	1.63	$\hat{0}$
2007	1.79	$\hat{0}$	1.79	$\hat{0}$	1.91	$\hat{0}$	1.84	$\hat{0}$	1.7	$\hat{0}$	1.5	$\hat{0}$	1.63	$\hat{0}$	1.7	$\hat{0}$	1.71	$\hat{0}$
2008	1.74	$\hat{0}$	1.76	$\hat{0}$	1.92	$\hat{0}$	1.26	\tilde{N}	1.55	$\hat{0}$	1.44	\tilde{N}	1.28	\tilde{N}	1.62	$\hat{0}$	1.63	$\hat{0}$
2009	1.67	$\hat{0}$	1.8	$\hat{0}$	1.97	$\hat{0}$	1.19	\tilde{N}	1.47	\tilde{N}	1.45	\tilde{N}	1.24	\tilde{N}	1.44	\tilde{N}	1.64	$\hat{0}$
2010	1.8	$\hat{0}$	1.84	$\hat{0}$	1.94	$\hat{0}$	1.85	$\hat{0}$	2	$\hat{0}$	1.48	\tilde{N}	1.18	\tilde{N}	1.48	\tilde{N}	1.64	$\hat{0}$
2011	1.5	$\hat{0}$	1.48	\tilde{N}	1.92	$\hat{0}$	1.2	\tilde{N}	1.45	\tilde{N}	1.52	$\hat{0}$	1.19	\tilde{N}	1.43	\tilde{N}	1.64	$\hat{0}$
2012	1.52	$\hat{0}$	1.6	$\hat{0}$	2.87	$\hat{0}$	1.13	\tilde{N}	1.77	$\hat{0}$	1.58	$\hat{0}$	1.12	\tilde{N}	1.47	\tilde{N}	2.22	$\hat{0}$

由表 5 可见,北杂木断面全年水质类别均为 $\hat{0}$ 类,丰水期水质类别除 2011 年为 \tilde{N} 类以外其他年份均为 $\hat{0}$ 类,枯水期水质类别除 2012 年为 $\hat{0}$ 类以外其他年份均为 $\hat{0}$ 类,进一步分析发现该断面当年枯水期总磷污染平均浓度为 0.28 mg/L,超过国家地表水 $\hat{0}$ 类水质评价标准 80%。古楼断面全年水质类别均在 $\hat{0}$ 类水质以上,自 2008 年起水质类别上升为 \tilde{N} 类(2010 年除外),水质发展趋势良好,进一步分析发现该断面 2010 年丰水期时氨氮污染浓度为 0.71 mg/L,超过国家地表水 $\hat{0}$ 类水质标准 42%;高锰酸盐指数污染浓度为

5.65 mg/L,超过国家地表水 $\hat{0}$ 类水质标准 41.25%;总氮污染浓度为 3.03 mg/L,超过国家地表水 $\hat{0}$ 类水质标准 51.5%,且这三种污染均大于古楼断面历年监测浓度。台沟断面全年水质类别为 $\hat{0}$ 类,2008 年转为 \tilde{N} 类,水质总体趋势良好,丰水期在 2009 年由 $\hat{0}$ 类转为 \tilde{N} 类,枯水期水质类别均为 $\hat{0}$ 类。

3 水质模糊评价指数预测

本文通过建立来水量与水质模糊综合评价指数的非线性

性回归模型, 对水质模糊综合评价指数进行预测。

3.1 浑河大伙房水库上游段丰、枯水期划分

根据浑河大伙房水库上游段 2004 年- 2012 年实测来水量, 计算丰、枯水期多年平均月入库水量(图 1)。由图 1 可见, 大伙房水库上游丰水期为 4 月- 9 月, 期间入库水量大于 $50 \text{ m}^3/\text{s}$; 枯水期为 12 月- 2 月, 期间入库水量小于 $15 \text{ m}^3/\text{s}$; 平水期为 3 月、10 月及 11 月, 期间入库水量大于 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 且小于 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ [15]。

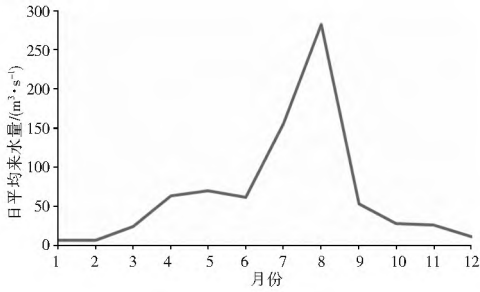


图 1 多年平均日入库流量

Fig. 1 Average daily flow

3.2 非线性预测模型的建立

利用丰水期、枯水期日平均来水量与水质模糊综合评价指数计算值, 建立二者的非线性回归模型(表 6)。

表 6 回归分析

Tab. 6 Regression analysis

时期	断面	非线性回归模型	回归系数
丰水期	北杂木	$y = -6 \times 10^{-8}x^3 + 4 \times 10^{-5}x^2 - 0.0063x + 1.9729$	$R^2 = 0.2423$
	古楼	$y = 4 \times 10^{-8}x^3 - 1 \times 10^{-5}x^2 + 0.0018x + 1.4565$	$R^2 = 0.7039$
	台沟	$y = -1 \times 10^{-7}x^3 + 5 \times 10^{-5}x^2 - 0.0063x + 1.7782$	$R^2 = 0.0817$
枯水期	北杂木	$y = 0.0134x^3 - 0.2717x^2 + 1.7049x - 1.3235$	$R^2 = 0.7152$
	古楼	$y = 0.0003x^3 - 0.008x^2 + 0.0824x + 1.2336$	$R^2 = 0.6422$
	台沟	$y = 0.0075x^3 - 0.1523x^2 + 0.9692x - 0.2443$	$R^2 = 0.689$

3.3 非线性预测模型回归分析

应用 SPSS 软件对表 6 各非线性预测模型进行回归分析及非线性相关分析, 结果见表 6、表 7。可见, 除丰水期台沟断面回归模型的 R^2 为 0.0817 外, 其他各时期各断面 R^2 均

呈现较显著回归水平, 说明除丰水期台沟断面外各时期各断面非线性回归方程与评价离散值拟合度较高。从表 7 可见, 来水量与古楼断面丰、枯水期水质模糊综合评价指数均呈显著正相关(分别为 $p = 0.807, p = 0.762$), 与北杂木丰、枯水期及台沟断面枯水期水质模糊综合评价指数均呈正相关(分别为 $p = 0.253, p = 0.577, p = 0.62$), 与台沟断面丰水期水质模糊综合评价指数呈负相关($p = -0.197$), 负相关的结果是由于评价指数值与拟合曲线差值较大造成的, 并不影响对台沟断面丰水期水质评价指数进行预测。

表 7 非线性相关分析

Tab. 7 Nonlinear correlation analysis

时期	断面	未标准化系数		标准化系数		t	Sig.	p
		B	标准误差	Beta				
丰水期	北杂木	-0.006	0.014	-4.255	-0.46	0.665	0.253	
	古楼	0.002	0.014	0.766	0.132	0.9	0.807*	
	台沟	-0.006	0.013	-4.959	-0.487	0.647	-0.197	
枯水期	北杂木	1.705	1.247	13.844	1.367	0.23	0.577	
	古楼	0.082	0.216	4.337	0.382	0.718	0.762*	
	台沟	0.969	0.778	13.189	1.247	0.268	0.62	

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

3.4 水质预测

应用非线性预测模型对各断面丰水期、枯水期水质模糊综合评价指数进行预测, 从结果(表 8、表 9)可见, 预测值与计算值差值百分比均在 20% 以内 [16], 两者比较吻合。北杂木断面、古楼断面、台沟断面丰水期预测指数分别为 1.76、1.67、1.66, 水质评价等级均为 0 类; 枯水期预测指数分别为 3.32、1.59、2.5, 水质评价等级分别为 0、0、0 类。

4 结论

(1) 北杂木、古楼、台沟断面全年水质类别均在 0 类以上, 丰水期各断面水质类别均在 0 类以上, 枯水期除 2012 年北杂木断面水质类别为 0 类以外, 其他各断面各年均均在 0 类以上。

(2) 通过建立来水量与水质模糊综合评价指数的非线性回归方程, 发现除台沟断面丰水期水质模糊综合评价指数与来水量相关性较差以外, 其他各断面各时期均呈正相关。

表 8 丰水期各断面水质评价指数预测

Tab. 8 The prediction of water quality evaluation index of each section during the wet period

年份	丰水期日平均来水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	水质评价指数计算值			水质评价指数预测值			差值			差值百分比(%)		
		北杂木	古楼	台沟	北杂木	古楼	台沟	北杂木	古楼	台沟	北杂木	古楼	台沟
2004	68.84	1.72	1.54	1.60	1.71	1.55	1.55	0.01	-0.01	0.05	0.63	-0.37	3.31
2005	182.46	1.73	1.62	1.59	1.79	1.69	1.69	-0.06	-0.07	-0.10	-3.50	-4.63	-6.03
2006	94.75	1.75	1.47	1.47	1.68	1.57	1.55	0.07	-0.11	-0.07	3.91	-7.19	-4.79
2007	54.35	1.79	1.70	1.70	1.74	1.53	1.57	0.05	0.17	0.13	2.82	9.86	7.59
2008	58.97	1.76	1.55	1.62	1.73	1.54	1.56	0.03	0.01	0.06	1.69	0.89	3.80
2009	47.51	1.80	1.47	1.44	1.76	1.52	1.58	0.05	-0.06	-0.14	2.58	-3.96	-9.62
2010	267.36	1.84	2.00	1.48	2.00	1.99	1.76	-0.16	0.01	-0.28	-8.58	0.50	-18.88
2011	59.94	1.48	1.45	1.43	1.73	1.54	1.56	-0.25	-0.08	-0.13	-16.56	-5.84	-9.03
2012	140.68	1.60	1.77	1.47	1.71	1.62	1.60	-0.11	0.14	-0.13	-6.62	8.08	-9.16
2013	169.26				1.76	1.67	1.66						

表 9 枯水期各断面水质评价指数预测

Tab. 9 The prediction of water quality evaluation index of each section during the dry period

年份	枯水期日平均 来水量/(m ³ ·s ⁻¹)	水质评价指数计算值			水质评价指数预测值			差值			差值百分比(%)		
		北杂木	古楼	台沟	北杂木	古楼	台沟	北杂木	古楼	台沟	北杂木	古楼	台沟
2004	7.14	1.98	1.53	1.63	1.88	1.52	1.64	0.10	0.01	-0.01	1.46	0.34	-0.76
2005	6.31	1.79	1.51	1.63	1.98	1.51	1.69	-0.19	0.00	-0.06	-3.06	-0.02	-4.08
2006	7.43	1.89	1.58	1.63	1.84	1.53	1.63	0.05	0.05	0.00	0.66	2.79	0.30
2007	7.86	1.91	1.50	1.71	1.80	1.53	1.61	0.11	-0.03	0.11	1.42	-1.60	7.12
2008	3.38	1.92	1.44	1.63	1.85	1.43	1.58	0.07	0.01	0.05	2.01	0.57	3.13
2009	4.38	1.97	1.45	1.64	2.06	1.47	1.71	-0.09	-0.02	-0.07	-2.04	-0.97	-4.85
2010	6.67	1.94	1.48	1.64	1.94	1.52	1.67	0.00	-0.04	-0.03	0.05	-1.85	-2.10
2011	10.80	1.92	1.52	1.64	2.28	1.57	1.91	-0.36	-0.05	-0.27	-3.32	-2.52	-17.62
2012	11.43	2.87	1.58	2.22	2.68	1.58	2.14	0.19	0.00	0.08	1.66	0.11	4.94
2013	12.15				3.32	1.59	2.50						

(3) 北杂木、古楼、台沟断面丰水期水质预测评价等级均为Ⅱ类; 枯水期水质预测评价等级分别为Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类。

需要指出的是, 应用本文的模糊综合评价法进行水质预测时, 数据系列越长回归系数 R^2 越接近于 1, 预测结果越精确。

参考文献(References):

- [1] 甘霖, 张强. 指数评价法在川北某村地下水水质评价中的应用[J]. 职业与健康, 2009, 25(24): 2670-2672. (GAN Lin, ZHANG Qiang. Application of index evaluation method in evaluation of ground water quality in a certain village of Northern Sichuan[J]. Career and health, 2009, 25(24): 2670-2672. (in Chinese))
- [2] 曾永, 樊引琴, 王丽伟. 水质模糊综合评价法与单因子指数评价法比较[J]. 人民黄河, 2007, 29(2): 64-65. (ZENG Yong, FAN Yin qin, WANG Li wei. Water quality fuzzy comprehensive evaluation method compared with single factor index evaluation method[J]. The people of the Yellow River, 2007, 29(2): 64-65. (in Chinese))
- [3] 徐力刚, 叶昌, 张奇. 基于模糊模式识别的地下水水质综合评价研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(5): 7-12. (XU Li gang, YE Chang, ZHANG Qi. Application of fuzzy pattern recognition for the comprehensive assessment of groundwater quality[J]. Hydrogeology Engineering geology, 2011, 38(5): 7-12. (in Chinese))
- [4] 李晴新, 朱琳, 陈中智. 灰色系统法评价近海海洋生态系统健康[J]. 南开大学学报, 2010, 42(1): 39-43. (LI Qing xin, ZHU Lin, CHEN Zhong zhi. Ecosystem health assessment of marine sublittoral ecosystem by grey system method[J]. Journal of Nankai University, 2010, 42(1): 39-43. (in Chinese))
- [5] 赵天燕, 贺方升, 侯棋棕. 一种改进的灰关联分析法在水质评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(1): 26-29. (ZHAO Tian yan, HE Fang sheng, HOU Qi zong. Application of improved gray relation analysis method for water quality assessment in aquatic system[J]. Journal of safety and the environment, 2005, 5(1): 26-29. (in Chinese))
- [6] 向娜. 基于神经网络和人工蜂群算法的水质评价和预测研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. (XIANG Na. Exploration for water quality assessment and prediction based on neural networks and artificial bee colony algorithm[D]. Guangzhou: South China university, 2012. (in Chinese))
- [7] 姚焕玫, 黄仁涛, 刘洋, 等. 主成分分析法在太湖水质富营养化评价中的应用[J]. 桂林工学院学报, 2005, 25(2): 248-251. (YAO Huan mei, HUANG Ren tao, LIU Yang, et al. Principal component analysis of water high eutrophication evaluation in Taihu Lake[J]. Journal of Guilin institute of technology, 2005, 25(2): 248-251. (in Chinese))
- [8] 胡成, 苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 186-192. (HU Chen, SU Dan. Application of comprehensive water quality identification index in water quality assessment of Hun River[J]. Journal of ecological environment, 2011, 20(1): 186-192. (in Chinese))
- [9] 潘术香, 李莲芳, 张宝莉. 利用标准类别指数评价法评价北京主要水系河流水质[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 560-564. (PAN Shu xiang, LI Lian fang, ZHANG Bao li. Utilizing standard category index method to assess the water quality of main rivers of Beijing[J]. Agricultural Journal of Environmental Science, 2004, 23(3): 560-564. (in Chinese))
- [10] 韦璐, 江敏, 余根鼎, 等. 凡纳滨对虾养殖塘叶绿素 a 与水质因子主成分多元线性回归分析[J]. 中国水产科学, 2012, 19(4): 620-625. (WEI Lu, JIANG Min, YU Gen ding. Exploring the influence of water quality parameters on chlorophylla in Litopenaeus vannamei culture ponds using the method of multiple linear regression of principal components[J]. Agricultural journal of environmental science, 2012, 19(4): 620-625. (in Chinese))
- [11] 魏智宽, 蒋世云, 李少旦. 灰色理论在龙江突发镉污染水质预测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(3): 135-141. (WEI Zhi-kuan, JIANG Shi-yun, LI Shao-dan. Application of grey theory in water quality prediction of sudden cadmium pollution in Longjiang River[J]. Journal of water resources and water engineering, 2013, 24(3): 135-141. (in Chinese))
- [12] 梁楠. 基于人工神经网络的水质预测及 MATLAB 实现[D]. 西安: 长安大学, 2007. (LIANG Nan. Research on artificial neural networks for water quality forecasting and realization on the MATLAB[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese))

(下转第 381 页)

- tional allocation of water resources [J]. Resources & Industries, 2001(2): 11-13. (in Chinese)
- [7] 涂启玉, 梅亚东. 遗传算法在水库(群)优化调度研究中的应用综述[J]. 水电自动化与大坝监测, 2008, 32(1): 16-18. (TU Qi yu, MEI Ya dong. Development of computer supervision and control system for hydropower stations with giant generators [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2008, 32 (1): 16-18. (in Chinese))
- [8] 马光文, 王黎. 遗传算法在水电站优化调度中应用[J]. 水科学进展 1997, 8(3): 275-280. (MA Guang wen, WANG Li. Application of a genetic algorithm to optimal operation of hydropower station [J]. Advances in Water Science, 1997, 8(3): 275-280. (in Chinese))
- [9] 武新宇. 不确定环境下水电系统多维优化理论和应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (WU Xin yu. Multidimensional optimization theory and application for hydropower system under uncertain environment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [10] Loucks D P. Quantifying trends in system sustainability [J]. Hydrology. 1997. 42(4), 513-530.
- [11] 卢丽, 徐千军, 保其长, 等. 密云水库错峰调度的可行性分析 [J]. 水力发电学报, 2008, 27(2): 1-5. (LU Li, XU Qian jun, BAO Qichang, et al. Feasibility of flood peak staggered regulation for Miyun reservoir [J]. Journal of China Hydroelectric engineering, 2008, 27(2): 1-5. (in Chinese))
- [12] 钟永华, 鲁帆, 易忠, 等. 密云水库以上流域年径流变化趋势及周期分析 [J]. 水文, 2013, 33(6): 81-84. (ZHONG Yong hua, LU Fan, YI Zhong, et al. Change trend and period of annual runoff in upstream watershed of miyun reservoir [J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(6): 81-84. (in Chinese))
- [13] 左丰收, 綦中跃, 姜明辉. 密云水库入库径流演变特性及成因分析 [J]. 北京水务, 2011(2): 34-37. (ZU O Feng shou, QI Zhong yue, JIANG Ming hui. Evolution characteristics of the Miyun Reservoir inflow and its cause factors analysis [J]. Beijing Water, 2011, (2): 34-37. (in Chinese))
- [14] S Sandovař Solis. Sustainability Index for Water Resources Planning and Management [J]. Journal of Water Resource Planning and Management, 2011(5): 381-390.
- [15] Shi Y, Eberhart R, Chen Y. Implementation of evolutionary fuzzy systems [J]. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, 1999, 7(2): 109-119.
- [16] Van den Bergh F. An analysis of particle swarm optimizers [D]. South Africa: Department of computer science, University of Pretoria, 2002.
- [17] 夏乐天. 马尔可夫链预测方法及其在水文序列中的应用研究 [D]. 南京: 淮海大学, 2005. (XIA Le tian. Research of Markov Chain prediction method and its application on hydrology series [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))

(上接第 288 页)

- [13] 林箬, 朱亮, 吴炳方, 等. 基于 WebGIS 三峡干流水质模拟平台研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(8): 987-993. (LIN Zhong, ZHU Liang, WU Bing fang, et al. Numerical simulation platform of main stream water quality within the Three Gorges Reservoir area based on Webgis [J]. Resources and environment in Yangtze river basin, 2012, 21(8): 987-993. (in Chinese))
- [14] 徐敏, 曾光明, 苏小康. 混沌理论在水质预测中的应用初探 [J]. 环境科学与技术, 2004, 27(1): 51-54. (XU Min, ZENG Guang-ming, SU Xiao kang. A preliminary study on application of chaos theory to prediction of river water quality [J]. Environmental Science and Technology, 2004, 27(1): 51-54. (in Chinese))
- [15] 裴木凤, 李适宇, 胡嘉膺. 丰、枯水期珠江河口水体交换的数值模拟 [J]. 热带海洋学报, 2013, 32(6): 28-35. (PEI Mu feng, LI Shi yu, HU Jia tong. Simulation of the water exchange in the Pearl River Estuary during wet and dry seasons [J]. Journal of tropical Marine, 2013, 32(6): 28-35. (in Chinese))
- [16] 唐宗鑫, 简文彬. 闽江下游水质预测的时间序列模型 [J]. 水利科技, 2002(2): 7-10. (TANG Zong-xin, JIAN Wen-bin. Min river downstream water quality prediction of time series model [J]. Water Conservancy Science and Technology, 2002(2): 7-10. (in Chinese))