

基于 M - DGM(1,1) 模型的东江河流系统健康评估

方陈卓¹, 王海鹏², 吴龙华¹, 杨校礼¹, 邓西平³, 武煜伦¹, 张广明¹, 李喜元¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;

3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 东江作为广东省和香港特别行政区的重要水源地, 直接关系到珠三角地区的经济发展以及香港特区的繁荣稳定。为有效掌握东江河流系统健康状况的发展趋势, 促进东江流域内经济社会的可持续发展, 针对东江河流系统健康评分(2015—2019年)的振荡分布特性, 基于灰色预测理论, 结合等维灰数动态递补模型, 构建了 M - DGM(1,1) 灰色预测模型, 并利用该模型对东江河流系统(2020—2024年)的健康状况进行了评估。结果表明: 该预测模型精度达到一级, 可满足东江河流系统健康状况评估的要求; 东江河流系统健康在 2020—2024 年间仍处于亚健康状态, 但总体向着健康方向发展; 部分敏感警兆指标评分(2020—2024年)发生波动, 要继续加强对东江河流系统健康的保护与管理。

关键词: 河流系统健康; 预测; 灰色理论; M - DGM(1,1); 东江

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2024)02-0032-08

Health assessment of the Dongjiang River system based on the M - DGM(1,1) model

FANG Chenzhuo¹, WANG Haipeng², WU Longhua¹, YANG Xiaoli¹,
DENG Xiping³, WU Yulun¹, ZHANG Guangming¹, LI Xiuyan¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, HoHai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

Abstract: As an important water source for Guangdong Province and Hong Kong area, Dongjiang River is directly related to the economic development of the Pearl River Delta region and the prosperity and stability of the Hong Kong Special Administrative Region. In order to grasp the development trend of the health status of the Dongjiang River system and promote sustainable development of the economic society in Dongjiang River Basin, regarding to the oscillatory distribution characteristics of Dongjiang River system health scores (2015—2019), a M - DGM(1,1) grey prediction model was constructed based on the grey predicting theory and the gray recurrence dynamic model with equal dimension to assess the future health status of the river system (2020—2024). The results show that the accuracy of the prediction model can reach the first level, and the model can meet the requirements of health assessment of the Dongjiang River system. It is found that the health status of the Dongjiang River system is in the sub-healthy state during 2020—2024, but the overall development is improving towards healthy. The scores of some sensitive warning indices (2020—2024) fluctuated, so it is necessary to strengthen the protection and management of the health of the Dongjiang River system.

Key words: health of river system; prediction; grey theory; M - DGM(1,1); the Dongjiang River

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2023-09-09

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20230099)

作者简介: 方陈卓 (1999—), 男, 江苏泗洪人, 博士研究生, 研究方向为工程水力学。

通讯作者: 吴龙华 (1974—), 男, 江西鄱阳人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为河流管理与工程水力学。

1 研究背景

自 20 世纪 80 年代河流健康的概念提出以来,河流健康研究已逐渐发展成为河流现代化科学管理的一种重要工具和手段^[1]。经过数十年的发展,河流健康研究的对象已经从河流单一元素(例如水质、流量等)发展到河流生态环境,再到包含河流生态、社会服务功能的河流生态系统^[2]。然而,随着社会、经济、人口的快速发展,日益增强的人类活动对河流造成了更为广泛以及更深层次的影响,同时,人们为了提高生活品质也对河流生态环境提出了更高的要求^[3]。2008 年,吴龙华等^[4]从系统论的角度出发重新定义了包含河流自然子系统和流域内社会子系统的河流系统,并在此基础上提出了河流系统健康及预警的内涵。通过河流系统健康预警,不但能够及时掌握河流系统的健康状况、查证诱发河流系统警报的警源,还可以了解河流系统未来一段时间内的健康发展趋势,具备一定的先觉性和预见性^[5],为调节流域内人类活动的强度和范围提供依据,从而达到排除警患、实现人与河流共同发展的目标。其中,健康预测是河流系统健康预警的一个核心环节,其预测模型的精度会直接影响到预警的可靠性^[6]。

在传统河流健康研究方面,有不少学者针对水质^[7-9]、流量^[10-13]、生物完整性^[14-16]等关乎河流健康状况的指标展开了预测研究,对包含人类发展水平的河流系统健康预测尚未见研究报道。通过对河流系统的某一健康指标进行预测,可以直观显著地看到河流系统内该指标的未来变化趋势,但在复杂的河流系统中,河流系统内各指标相互影响,通过对单一或部分健康指标预测难以满足河流系统健康预测的需求。因此,构建适宜的河流系统健康预测模型是准确预测河流系统未来一段时间内的健康状况和发展趋势的核心环节。

在河流健康预测中,常见的预测模型有线性回归模型^[17]、神经网络模型^[18-20]、决策树回归模型^[21]、灰色理论预测模型^[22-23]等。其中,大部分预测模型训练需要大量的样本数据,针对少量、不完全信息的预测模型研究较少。由于我国对河流系统开展全面监测的时间较晚,河流系统的各项指标样本数据时间序列较短、数据较少,所以一般常见的预测方法受制于样本数据的数量无法进行合理有效地预测。而灰色理论预测模型可以利用少量的、不完全的信息建立数学预测模型,特别是当预测对象只具备较少的特征值数据时,其预测精度和可靠性具有

明显的优势。目前该预测方法在河流水质预测^[24-25]、区域生态环境预测^[26]、水量预测^[27-28]等方面已经得到较为广泛的应用。因此,本文根据东江河流域健康状况评分(2015—2019 年)数据的振荡特性,基于灰色预测理论,建立了 M-DGM(1,1)灰色预测模型,并利用该预测模型对东江河流域系统在 2020—2024 年的健康状况进行了评估分析。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

东江流域(图 1)位于珠江三角洲的东北端,南临南海并毗邻广州市和香港特别行政区(以下简称“香港”),北部与韶关、清远、安远市相接,地势整体呈现东北高、西南低的特征。流域内雨量充沛,属亚热带季风气候区,具有明显的干、湿季节。东江流域是香港及广州市东部、深圳市等地的主要供水水源,总供水人口近 $4\ 800 \times 10^4$,供水区域人均水资源量约为 690 m^3 ,低于全国人均水资源量的 $1/3$ 。同时,流域内不同地区的人均水资源量差异明显,由上游向下游呈现不均匀减少趋势,人均水资源量紧缺。东江流域的可持续发展,不仅关系到流域内居民的生活供水,更与珠三角地区及香港的经济发 展息息相关。2020 年广东省由东江水资源支撑的 GDP 总量达到 4.91×10^{12} 元,约占全省 GDP 总量的 44%,同年香港特别行政区的 GDP 为 2.71×10^{12} 港元,东江的水资源已成为香港和东江流域的“政治之水、生命之水、经济之水”。

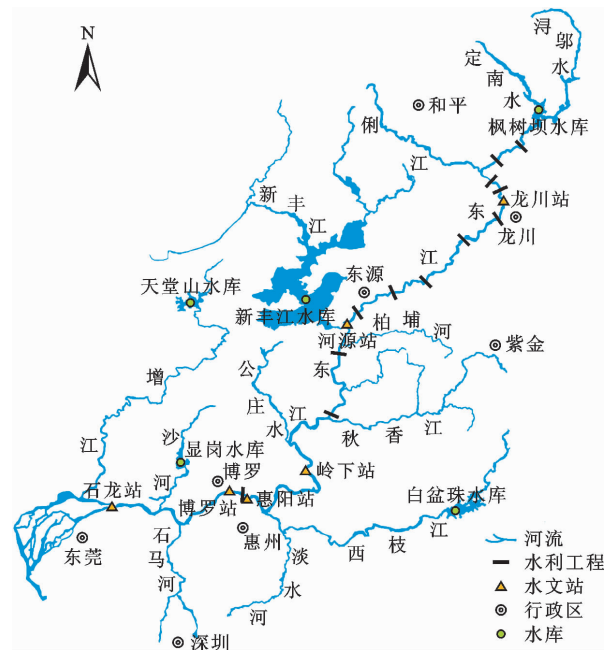


图 1 东江流域概况图

2.2 数据来源

本研究所采用的水资源开发利用数据来自2015—2022年《广东省水资源公报》。天然月径流量、多年平均径流量、河流水质、达标水功能区等水文数据来自龙川、河源等水文监测站。河流形态结构、生物完整性、社会服务功能等数据来自现场勘察与调查。人类发展指数中涉及到的预期寿命指数、受教育年龄年限、人均国民总收入指数等数据来自《广东统计年鉴》。

2.3 研究方法

2.3.1 东江河流系统健康状况(2015—2019年)

东江河流系统由自然生态子系统和社会子系统组成,包含了河流自然生态状况、河流社会功能状况和流域内人类发展水平等3个方面。吴龙华等^[4]根据东江河流系统实际情况,构建了东江河流系统健康预警警兆指标体系(表1),并根据河流系统健康评分区间对河流系统健康状态进行了等级划分,同时设置了相应的警度和预警信号(表2)^[5]。

表1 东江河流系统健康预警警兆指标体系及其权重

目标层	子目标层	准则层	指标层	指标内容
东江 河流 系统 健康 状况	水文完整性 (0.200 0)		水资源开发利用率(0.331 8)	在包含上游入境来水量的情况下,按多年来水统计年实测流量与天然月径流量的平均偏离程度 实测月径流量占多年平均径流量的最小百分比
			流量过程变异程度(0.302 1)	
			生态流量满足程度(0.366 1)	
	生态状况 (0.485 4)	化学完整性 (0.200 0)	水质优劣程度(0.543 8)	按照河流水质类别比例赋分
			水功能区达标率(0.456 2)	水功能区达标数量占评估水功能区总数的百分比
	形态结构完整性 (0.200 0)		河流纵向连通指数(0.383 3)	根据单位河长内影响河流连通性的工程设施数量赋分
			河岸稳定性(0.333 3)	已发生的或潜在发生的河岸侵蚀
			河岸带人工干扰程度(0.283 3)	“乱采,乱占,乱堆,乱建”状况
	生物完整性 (0.400 0)		鱼类保有指数(0.500 0)	河流鱼类种数现状和历史参考鱼类种数的差异状况
			珍稀水生动物保护指数(0.500 0)	针对珍稀水生物采取的保护性措施评分
河流社会 功能状况 (0.261 0)	社会服务功 能可持续性	公众满意度(0.356 8)	公众对河流环境、水质水量、涉水景观等满意程度	
		防洪指标(0.288 0)	达到防洪标准的堤防长度占堤防总长度的比例	
		供水指标(0.355 2)	重要断面最小控制流量保障程度	
流域内人类 发展水平 (0.253 6)	人类发展指数	出生时预期寿命指数(0.333 3)	以联合国公布的人类发展报告的计算公式为准	
		平均受教育年龄年限(0.333 3)		
			人均国民总收入指数(0.333 3)	

注:表中括号里的数字代表权重。

表2 河流系统健康分级及其预警信号

评分范围	健康等级	警度	预警信号
(80,100]	健康	无警	绿色
(60,80]	亚健康	轻警	蓝色
(40,60]	轻度病变	中警	黄色
(20,40]	重度病变	重警	橙色
(0,20]	病危	巨警	红色

建立东江河流系统健康评价指标体系的层次分析结构模型后,确定上下层次指标隶属关系,利用模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)计算评价指标权重。

设某指标层包含 n 个因素,即指标层 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,对其中任意两个因素 x_i 与 x_j ,引用0.1~0.9九标度数量标度(表3)进行比较,用 a_{ij} 表示 x_i

和 x_j 的相对重要性,并建立模糊判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。

表3 0.1~0.9九标度数量标度说明

标度	定义	说明
0.5	同等重要	表示 x_i 与 x_j 相比较,两者同等重要
0.6(0.4)	略微重要	表示 x_i 与 x_j 相比较, $x_i(x_j)$ 略微重要
0.7(0.3)	显著重要	表示 x_i 与 x_j 相比较, $x_i(x_j)$ 显著重要
0.8(0.2)	重要得多	表示 x_i 与 x_j 相比较, $x_i(x_j)$ 重要得多
0.9(0.1)	极端重要	表示 x_i 与 x_j 相比较, $x_i(x_j)$ 极端重要

通过公式(1)对模糊判断矩阵 A 各行求和,并按照公式(2)进行转换,得到模糊一致判断矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$,对矩阵 R 采用归一化处理,求得各指标的权重向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$,权重向量 W 满足公式(3)。

$$s_i = \sum_{k=1}^n a_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$r_{ij} = \frac{s_i - s_j}{2(n-1)} + 0.5 \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

基于 FAHP 方法,利用专家问卷调查,获取东江河流域健康综合评价指标体系中指标层各指标的相对重要性,通过上述计算,可得到东江河流域健康评价指标权重(表 1)。根据 2015—2019 年各警兆指标的指标值及其权重,计算得到东江河流域 2015—2019 年各年度的健康评分,并结合表 2 得到东江河流域各年度健康状况等级及其相应警度(表 4)。

表 4 2015—2019 年东江河流域健康等级

年份	健康评分	健康等级	警度
2015	66.01	亚健康	轻警
2016	71.23	亚健康	轻警
2017	72.93	亚健康	轻警
2018	69.53	亚健康	轻警
2019	73.43	亚健康	轻警

2.3.2 M-DGM(1,1) 预测模型 GM(1,1) 模型适用于非负光滑单调序列,对振荡序列进行拟合和预测时常常无法获得良好的精度和效果。为此,钱吴永等^[29]提出了 TDGM(1,1) 模型,但在利用 TDGM(1,1) 模型对东江河流域健康状况进行预测分析时,发现其模拟预测精度无法满足需要。因此,本文针对东江河流域健康评分数据(2015—2019 年)的振荡特点,提出了一种新的振荡数据序列预处理方法,基于 GM(1,1) 模型,并结合等维灰度递补法,构建 M-DGM(1,1) 预测模型。

(1) 振荡数据序列的预处理。对振荡数据序列进行预处理一方面是弱化其波动性,另一方面则是使生成的序列能够满足单调递增的要求,从而适用于 GM(1,1) 模型。本文在对振荡序列进行预处理时,充分考虑原始数据序列 $X^{(0)}$ 中除第一个数外的每一个数据较前一个数据的变化趋势及变化幅度,并依据不同数据的变化趋势及幅度对振荡数据序列进行变换。

设原始数据序列 $X^{(0)}$ 为振荡波动分布序列,将 $X^{(0)}$ 表示为公式(4)。

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (4)$$

式中: n 为健康评分数据的样本数量; $x^{(0)}(n)$ 为数

据序列 $X^{(0)}$ 的第 n 个数据值。

当 $\exists k, k' \in (2, 3, \dots, n)$ 满足以下关系式

$$\begin{aligned} X^{(0)}(k) - X^{(0)}(k-1) &> 0, \\ X^{(0)}(k') - X^{(0)}(k'-1) &< 0 \end{aligned} \quad (5)$$

定义 $X^{(0)}$ 的标准差 S 根据公式(6)求得。

$$S(X^{(0)}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x^{(0)}(k) - \bar{x}^{(0)})^2}{n}} \quad (6)$$

式中: $X^{(0)}(k)$ 为数据序列 $X^{(0)}$ 中第 k 个样本数据; $\bar{x}^{(0)}$ 为数据序列 $X^{(0)}$ 的均值。

对 $X^{(0)}$ 进行变换,得到新序列,如公式(7)。

$$X^{(0)}D = \{x^{(0)}(1)d, x^{(0)}(2)d, \dots, x^{(0)}(n)d\} \quad (7)$$

其中,

$$\begin{aligned} x^{(0)}(k)d &= x^{(0)}(k) + m(k)(k-1)S(X^{(0)}) \\ (k &= 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (8)$$

$$m(k) = e^{\left(-3 \frac{x^{(0)}(k) - x^{(0)}(k-1)}{x^{(0)}}\right)} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中: $x^{(0)}(k)d$ 为变换新序列 $X^{(0)}D$ 的第 k 个数据值; m 为变幅控制系数,当考虑相邻数据变化规律时,基于第 $k-1$ 个数据的变化趋势以及变化幅度,计算相应的第 k 个数的变幅控制系数 $m(k)$,使得数据变化更趋于稳定。

称序列 $X^{(0)}D$ 为序列 $X^{(0)}$ 的平滑序列, D 为序列 $X^{(0)}$ 一阶平滑算子。

(2) 建模原理。对振荡序列 $X^{(0)}$ 进行上述预处理后得到序列 $Y^{(0)}$,对 $Y^{(0)}$ 再进行一次累加得到序列 $Y^{(1)}$ 。

$$Y^{(1)} = (y^{(1)}(1), y^{(1)}(2), \dots, y^{(1)}(n)) \quad (10)$$

其中,

$$y^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k y^{(0)}(i) \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

式中: $y^{(1)}(k)$ 为累加序列 $Y^{(1)}$ 第 k 个数据值。

根据 $Y^{(1)}$ 建立 GM(1,1) 模型,得到灰色微分方程如公式(12)。

$$\frac{dy^{(1)}}{dt} + ay^{(1)} = b \quad (12)$$

式中: a 为发展系数; b 为灰色作用量。

通过最小二乘法求得参数列 $\hat{a} = (a, b)^T$,并代入微分方程公式(12)的解,得到时间 t 的响应函数

$$\hat{y}^{(1)}(t+1) = (y^{(1)}(1) - \frac{b}{a})e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (13)$$

求解还原得到

$$\begin{aligned} \hat{y}^{(0)}(k+1) &= y^{(1)}(k+1) - \hat{y}^{(1)}(k) \\ &= (1 - e^{-a})(y^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak} \end{aligned} \quad (14)$$

由于数据进行了预处理,最终还原得到

$$m(k+1)S(X^{(0)})k + \hat{x}^{(0)}(k+1) - \hat{y}^{(0)}(k+1) = 0 \quad (15)$$

解得的 $\hat{x}^{(0)}(k+1)$ 即为预测的第 $k+1$ 个数据的值。

(3) 等维灰数动态递补模型。上述得到的灰色预测模型实际上是一个指数函数,模型预测的有效性受系统时间序列长短及数据变化的影响。因此,第一个预测值结果是最精确的,随着时间的推移,预测模型的白化效应不断降低,灰色性越来越突出,使得模型的预测精度不断下降^[30]。为了提高预测模型的适用性和精度,对原灰色预测模型实施等维灰数递补。

将原始数据系列 $x^{(0)}$ 利用模型预测得到的第一个预测值 $x^{(0)}(n+1)$ 置入原序列,并去掉其中最老的信息 $x^{(0)}(1)$,组成新数列 $X^{(1)} = \{x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n+1)\}$ 。

利用这一新数据序列重复上述过程并重新构建新的灰色预测模型,然后根据新的灰色预测模型预测下一个数值,并将预测值重新补充到数据序列,再去掉数据序列中最老的数据。这样利用预测灰数新陈代谢、逐个预测、依次递补,直到完成预测目标为止。

(4) M-DGM(1,1) 预测模型精度检验。根据预测模型预测得到的数据与原始数据总是存在一定的差别,为表征预测模型的精度,通常利用模型平均相对误差进行判别。设原始数据 $X^{(0)}$ 预测模型的拟合数据为 $\hat{X}^{(0)} = \{\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n)\}$, 则模型误差 $\Delta(k)$ 为

$$\Delta(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) \quad (16)$$

模型相对误差 $\delta(k)$ 为

$$\delta(k) = \frac{\Delta(k)}{x^{(0)}(k)} \times 100\% \quad (17)$$

模型平均相对误差 δ_M 为

$$\delta_M = \frac{\sum_{k=1}^n |\delta(k)|}{n} \quad (18)$$

式中: n 为数据序列中的样本数量。

对灰色系统预测模型的精度检验一般参照表 5 来进行判断,当模型精度等级低于四级时,则该模型不适合用来进行预测。

表 5 预测模型精度检验等级参照表

精度等级	一级	二级	三级	四级
平均相对误差 δ_M 临界值	0.01	0.05	0.10	0.20

为了检验 M-DGM(1,1) 改进模型在东江河流系统健康预测中的有效性,以东江 2015—2019 年河流系统健康状况评分作为原始数据,分别采用 GM(1,1)、TDGM(1,1) 模型以及本文构建的 M-DGM(1,1) 模型进行预测,各预测模型的拟合计算结果详见表 6。

表 6 不同预测模型预测精度对比

年份	原始数据	GM(1,1)	TDGM(1,1)	M-DGM(1,1)
2015	66.01	66.01	66.01	66.01
2016	71.23	71.30	72.07	71.82
2017	72.93	71.62	70.07	71.70
2018	69.53	71.94	71.66	70.22
2019	73.43	72.26	74.00	73.35
平均相对误差		0.013 9	0.017 9	0.007 2

从表 6 中可以看出, M-DGM(1,1) 预测模型精度较 GM(1,1)、TDGM(1,1) 预测模型精度有显著提高,各项拟合值与原始数据更接近,且拟合值变化趋势和幅度与原始数据基本一致, M-DGM(1,1) 模型平均相对误差满足精度等级一级要求,表明该预测模型更适合用于东江河流系统健康的评估。

3 结果与分析

根据东江流域 2015—2019 年河流系统健康状况评分数据,利用 M-DGM(1,1) 预测模型,对东江河流系统 2020—2024 年的健康状况进行评估,结果见表 7 所示。

表 7 2020—2024 年东江河流系统健康状况评估结果

年份	评估分值	健康等级	警度	预警信号
2020	70.04	亚健康	轻警	蓝色
2021	71.31	亚健康	轻警	蓝色
2022	71.49	亚健康	轻警	蓝色
2023	70.24	亚健康	轻警	蓝色
2024	71.30	亚健康	轻警	蓝色

从表 7 可以看出, 2020—2024 年东江河流系统健康状况评估分值均在 70~80 分之间,处于亚健康状态,警度为轻警。虽然东江河流系统总体上仍然向着健康方向发展,但距离健康状态仍有一定差距,不能忽视在某些特殊情况下,河流系统健康存在恶化的可能。为此,本文进一步选取东江河流系统健康警兆指标体系中部分敏感指标(水资源开发利用、流量过程变异程度、供水指标和公众满意度)利

用 M-DGM(1,1) 预测模型进行评估,结果见表 8 所示。

表 8 东江河流系统部分敏感指标评分值(百分制)

年份	水资源开发 利用率评分	流量过程 变异程度评分	供水指标 评分	公众满意 度评分
2020	87.03 (88.20)	32.40(39.91)	70.31(72.58)	83.57
2021	86.66 (85.80)	45.74(38.58)	84.15(45.37)	85.58
2022	86.99 (86.40)	39.56(34.78)	80.46(85.75)	87.64
2023	85.71	47.44(42.19)	75.13(65.89)	89.75
2024	85.78	53.34	84.88	91.91

注:表中括号里的评分为当年实测数据计算值。

根据表 8 中利用 M-GDM(1,1) 预测模型得出的评估数据与当年实测数据可以看出,水资源开发利用率在 2020—2024 年之间的评分发生了波动,这主要与东江流域的年降水量有关,如东江流域 2021 年降水量为 1 212.7 mm,较 2020 年(1 462.7 mm) 减少了 17.1%,比常年(1 751.1 mm) 减少了 30.8%,导致 2021 年水资源开发利用率评分较低。由于东江流域的水量主要来源于降水,因此,水资源开发利用率评分的波动很大程度上是由降水量的变化造成的。流量过程变异程度指标评估分值总体偏低,表明 2020—2024 年东江河流系统的年实测流量与天然月径流量的平均偏离程度仍处于较高水平,其主要原因之一是东江干流枫树坝水库下游已建设一系列梯级电站和相关跨流域引水工程,这些水利工程在运行过程中对各自下游的径流过程影响较大,改变了河流原有的水动力过程,从而直接影响到下游河流的生态系统。供水指标评估分值波动较大,表明东江河流的水资源量与区域内经济社会发展之间的需求仍存在一定的供需矛盾,其中一个主要原因仍是流域内的降水量变化,如 2021 年东江流域降水量较小,且降水主要集中在汛期,非汛期供水无法得到保障,水资源量供给紧张,直接导致该年的实际供水指标评分低于常年评分。公众满意度指标预测评分逐年增长,符合在东江流域进行现场调查时人们对东江河流系统健康状态发展的预期。

部分敏感指标评分值(表 8) 数据表明,利用 M-GDM(1,1) 预测模型得出的评估数据与实测数据吻合程度较高,2024 年东江河流系统健康状况及部分敏感指标(水资源开发利用率、流量过程变异程度、供水指标、公众满意度) 预测分值可靠,能为相关管理部门对流域进行科学规划提供有效的参考。

因此,为全面推进和加强东江河流系统健康保护与管理工作,避免东江河流系统健康状况发生恶

化,针对东江河流系统健康的敏感指标,提出了合理建议。

(1) 科学规划、充分论证,合理开发利用东江水资源。对东江流域涉水工程的建设,在规划阶段应做到科学规划、充分论证,在设计阶段应以生态友好型工程为目标,在施工阶段则尽可能采用生态材料和生态工法,尽量避免或降低涉水工程建设、水资源开发利用等人类活动对东江河流系统生态环境造成的不利影响。

(2) 对已建涉水工程,应加强调度运行管理、完善生态补偿措施,提高用水保障。为消除或降低已建涉水工程对河流生态环境的不利影响,应采取针对性的工程或非工程措施对河流系统实施生态补偿和修复,如对河道挡水建筑物增设过鱼通道、采用生态护岸、加强涉水工程的科学调度管理、优先保障生活和生态用水等。

(3) 建立健全长效的河流系统健康预警机制,实现河流系统健康的智慧动态预警。为了适应和满足区域内的经济社会发展需要,东江流域在未来很长一段时间内仍不可避免地存在涉水工程的建设与开发、水资源利用等人类活动,为评估这些人类活动对河流系统健康可能造成的影响,可以构建东江河流系统健康智慧预警平台,对东江流域内数据进行实时汇总分析,实现实时评价与预测、随时预警的动态预警,从而为河流管理部门决策提供科学依据。

4 讨 论

(1) 利用 M-DGM(1,1) 模型进行评估,结果显示:东江河流系统在 2020—2024 年处于亚健康状态(评分在 70~80 分之间),虽然总体上呈现向健康方向发展的趋势,但仍存在相当一部分的不健康成分。其中,东江干流上一系列梯级电站及相关跨流域引水工程是导致东江河流系统不健康的重要因素之一。因为相关部门在东江流域实施了水资源调配等科学管理措施,加大了违规事件查处力度以及流域内民众对东江河流系统健康关注度的提高,东江河流系统正不断向健康方向发展。

(2) 目前对河流健康的研究主要是以河流自然生态环境和河流社会功能为目标^[31-32],包含流域内人类发展水平的健康评价及预测研究较为少见。当前,对河流健康的研究大多仅考虑人类活动对河流自然生态环境的影响,而忽视了人类自身的发展,即人类发展水平和科学素养的提高对保护和维护河流系统健康的促进作用。本研究初步选取了联合国开

发计划署(The United Nations Development Programme, UNDP)提出的人类发展指数(Human Development Index, HDI)来评估流域内的人类发展水平,计算过程中,HDI为预期寿命指数、教育指数以及收入指数的算术平均值,3个组成指数权重相同。然而,在实际调查中发现人们的受教育程度往往决定了人们对河流健康的认知程度。因此,需进一步研究预期寿命指数、教育指数和收入指数三者之间的权重配比,使得新人类发展指数(NHDI)更能反映人们对河流系统健康的认知和维护程度。

(3)本文构建的M-DGM(1,1)模型主要是针对样本数据少、数据序列振荡的情况。这是由于国内对河流系统全面监测的时间较短,样本数据少,而常用的预测模型往往需要大量的样本数据加以训练^[33],若样本数据少,常规预测模型的精度难以保证。而在利用现有的GM(1,1)、TDGM(1,1)^[29]预测模型对东江河流系统健康状况进行预测时,二者的预测精度只达到二级,明显低于本文所构建的M-DGM(1,1)模型。M-DGM(1,1)模型在数据预处理阶段利用变幅控制系数 m 能有效控制新数据序列的增长幅度,弱化振荡序列的波动性,使得模型精度达到一级,更适用于东江河流系统的健康状况预测。在后续的河流系统健康预测研究中,一方面可以结合现有的河长制建立健全长期有效的健康预警机制,搭建河流系统健康智慧预警平台,实现动态预警;另一方面,随着国内河流全面监测的有序进行以及河流系统健康样本数据的不断增加,后续可进一步改进相关预测算法和模型,提高河流系统健康状况的预测精度。

5 结 论

本文根据东江河流系统健康评分样本数据少、数据序列振荡分布的特点,建立了基于灰色理论的M-DGM(1,1)预测模型,并利用该模型对东江河流系统2020—2024年的健康状况进行评估。

(1)在东江河流系统健康预测中,M-DGM(1,1)模型的预测精度达到了一级,可以应用于东江河流系统健康的预测,预测结果可为东江河流的科学管理提供参考依据。

(2)东江河流系统在2020—2024年的健康预测评估分值分别为70.04、71.31、71.49、70.24和71.30,均处于亚健康状态,评分波动幅度小,但总体上仍向着健康方向发展;部分敏感警兆指标如水资源开发利用率、流量过程变异程度等预测评分存在

波动,相关部门在水利工程规划、设计及施工阶段应做到科学规划、生态优先,尽可能采用生态材料和生态工法,以实现东江河流的最大保护。

参考文献:

- [1] SINGH P K, SAXENA S. Towards developing a river health index[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 999-1011.
- [2] LUO Zengliang, ZUO Qiting, SHAO Quanxi. A new framework for assessing river ecosystem health with consideration of human service demand[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640: 442-453.
- [3] GRIZZETTI B, LANZANOVA D, LIQUETE C, et al. Assessing water ecosystem services for water resource management[J]. *Environmental Science & Policy*, 2016, 61: 194-203.
- [4] 吴龙华,杨建贵. 基于系统对象的河流健康及其评价体系[C]//中国水利学会2008年学术年会论文集,中国海南海口,2008:430-433.
- [5] 吴龙华,杨校礼. 河流系统健康预警理论与方法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2022:39-46.
- [6] 石教智,吴文娇,吴龙华,等. 东江河流系统健康诊断及分析[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(1): 35-39.
- [7] AHMED A N, OTHMAN F B, AFAN H A, et al. Machine learning methods for better water quality prediction[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124084.
- [8] CHEN Zeng, XU Huan, JIANG Peng, et al. A transfer learning-based LSTM strategy for imputing large-scale consecutive missing data and its application in a water quality prediction system[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126573.
- [9] 张秀菊,王柳林,李秀平,等. 基于BP神经网络的潇河流域水质预测[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(5): 19-26.
- [10] GAO Shuai, HUANG Yuefei, ZHANG Shuo, et al. Short-term runoff prediction with GRU and LSTM networks without requiring time step optimization during sample generation[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 125188.
- [11] GHORBANI M A, ZADEH H A, ISAZADEH M, et al. A comparative study of artificial neural network (MLP, RBF) and support vector machine models for river flow prediction[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6): 476.
- [12] TIAN Zhan, YU Ziwei, LI Yifan, et al. Prediction of river pollution under the rainfall-runoff impact by artificial neural network: a case study of Shiyan River, Shenzhen, China[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 887446.
- [13] 马乐宽,邱瑀,赵越,等. 基于改进的神经网络与支持向量机的小流域日径流量预测研究[J]. *水资源与水工*

- 程学报,2016,27(5):23-27.
- [14] 陈凯,于海燕,张汲伟,等. 基于底栖动物预测模型构建生物完整性指数评价河流健康[J]. 应用生态学报,2017,28(6):1993-2002.
- [15] LEE D, KIM M, LEE B M, et al. Integrated explainable deep learning prediction of harmful algal blooms [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, 185: 122046.
- [16] DUONG T T, HOANG T T H, NGUYEN T K, et al. Factors structuring phytoplankton community in a large tropical river; case study in the Red River (Vietnam) [J]. *Limnologica*, 2019, 76: 82-93.
- [17] KADAM A K, WAGH V M, MULEY A A, et al. Prediction of water quality index using artificial neural network and multiple linear regression modelling approach in Shivganga River Basin, India [J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2019, 5(3): 951-962.
- [18] PARMAR K S, BHARDWAJ R. River water prediction modeling using neural networks, fuzzy and wavelet coupled model [J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(1): 17-33.
- [19] TAYYAB M, ZHOU Jianzhong, ZENG Xiaofan, et al. Discharge forecasting by applying artificial neural networks at the Jinsha River Basin, China [J]. *European Scientific Journal*, 2016, 12(9): 108-127.
- [20] 徐伟,董增川,付晓花,等. 基于BP人工神经网络的河流生态健康预警[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015,43(1):54-59.
- [21] ASADOLLAH S B H S, SHARAFATI A, MOTTA D, et al. River water quality index prediction and uncertainty analysis: a comparative study of machine learning models [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(1): 104599.
- [22] ZHANG Xianqi, WU Xilong, XIAO Yimeng, et al. Application of improved seasonal GM(1,1) model based on HP filter for runoff prediction in Xiangjiang River [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(35): 52806-52817.
- [23] 李建林,李志强,王心义,等. 河流年径流量的GM(1,2)-Markov中长期预测模型[J]. 干旱区地理,2016,39(2):240-245.
- [24] 胡祉冰,逢勇,宋为威,等. 灰色系统动态模型群GM(1,1)在秦淮河水质预测中的应用[J]. 四川环境,2019,38(1):116-119.
- [25] 冉延平,何万生,雷旭晖,等. 应用灰色GM(1,1)模型及其改进模型预测渭河天水段水质[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(5):88-91.
- [26] 郑乐乐,马小雯,安翔,等. 基于DPSIR-GM(1,1)模型的甘肃省生态安全评价与预测[J]. 生态科学,2022,41(4):60-69.
- [27] 李志超,姜宝良,潘登,等. 灰色理论在新乡百泉泉水流量动态分析中的应用[J]. 水文地质工程地质,2023,50(2):34-43.
- [28] 伍德权,杨延梅,付宇. 基于灰色系统理论的贵阳市城市用水总量预测[J]. 南昌工程学院学报,2022,41(1):40-46.
- [29] 钱吴永,党耀国. 基于振荡序列的GM(1,1)模型[J]. 系统工程理论与实践,2009,29(3):149-154.
- [30] 王学萌. 等维灰数递补动态预测[J]. 华中理工大学学报,1989(4):9-16.
- [31] CHEN Yongming, XIA Jihong, CAI Wangwei, et al. Three-phase-based approach to develop a river health prediction and early warning system to guide river management [J]. *Applied Sciences - Basel*, 2019, 9(19): 4163.
- [32] CAO Jiale, ZHANG Yahui, ZHANG Jin, et al. Research progress of water ecological health assessment at home and abroad [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(5): 1402-1410.
- [33] WAN Xuhao, YANG Tao, ZHANG Qian, et al. A novel comprehensive model of set pair analysis with extenics for river health evaluation and prediction of semi-arid basin: a case study of Wei River Basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145845.