

灰色理论在新乡百泉泉水流量动态分析中的应用

李志超, 姜宝良, 潘 登, 卢金阁, 王秀明

Application of the grey theory to dynamic analyses of the Baiquan Spring flow rate in Xinxiang

LI Zhichao, JIANG Baoliang, PAN Deng, LU Jingge, and WANG Xiuming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205047>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

河南某大型裂隙岩溶水源地地下水位动态分析

A dynamic analysis of groundwater levels in a large fractured-karst groundwater wellfield in Henan

姜宝良, 陈宁宁, 李新建, 潘登, 张晓, 姜英博 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 37-43

管道流模型参数敏感性分析及其在许家沟泉域的应用

A sensitivity analysis of conduit flow model parameters and its application to the catch area of the Xujiagou spring

武亚遵, 李彦涛, 林云, 曲鹏冲 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 68-75

基于等速线模型的一维黄土动荷载响应分析

Dynamic load response analysis of 1-D loess based on the equal speed line model

王文丽, 王兰民 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 113-119

含分数阶的灰色模型及其在地基沉降预测中的应用

Gray model with fractional order and its application to settlement prediction

赖文杰, 齐昌广, 郑金辉, 王新泉, 左殿军 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 124-124

基于高斯过程回归的地下水模型结构不确定性分析与控制

Quantification and reduction of groundwater model structural uncertainty based on Gaussian process regression

钟乐乐, 曾献奎, 吴吉春 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 1-1

基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型

A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression

方然可, 刘艳辉, 苏永超, 黄志全 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 181-187



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202205047

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.
LI Zhichao, JIANG Baoliang, PAN Deng, *et al.* Application of the grey theory to dynamic analyses of the Baiquan Spring flow rate in Xinxiang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 34-43.

灰色理论在新乡百泉泉水流量动态分析中的应用

李志超¹, 姜宝良¹, 潘登², 卢金阁³, 王秀明⁴

(1. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省自然资源监测和国土整治院, 河南 郑州 450016; 3. 河南省河口村水库管理局, 河南 济源 459010; 4. 济源水文水资源勘测局, 河南 济源 459099)

摘要: 新乡百泉具有供水、农灌、人文、旅游及生态等多种功能, 研究其泉水流量动态, 建立泉水流量动态预测模型, 对泉域水资源评价和泉水资源保护具有重要意义。为了进一步研究新乡百泉天然状态下泉水流量动态特征、评价泉域岩溶水资源, 基于 1964—1978 年泉水年均实测流量和泉域年均降水量资料, 通过逐步回归分析, 确定泉水流量的主要影响因素为前 1 年降水量, 并建立了逐步回归模型, 其回归效果显著; 在逐步回归分析的基础上建立了泉水流量动态预测的 GM(1, 2) 模型、NSGM(1, 2) 模型和 GM(0, 2) 模型。结果表明: 1964—1978 年百泉泉水流量动态主要受泉域降水控制, 且泉水流量滞后降水 1 年, 反映了天然状态下泉水动态特征。3 种灰色模型的精度等级均为最高级(优)。1964—1978 年百泉泉水实测流量为 2.347~6.448 m³/s, 平均为 3.904 m³/s; 逐步回归模型预测值为 1.882~6.383 m³/s, 平均为 3.904 m³/s; GM(1, 2) 模型预测值为 2.327~6.448 m³/s, 平均为 3.939 m³/s; NSGM(1, 2) 模型预测值为 2.133~6.448 m³/s, 平均为 3.927 m³/s; GM(0, 2) 模型预测值为 1.787~6.448 m³/s, 平均为 3.907 m³/s。逐步回归模型和前述 3 种灰色模型的平均相对误差分别为 7.794%、7.292%、7.122%、7.797%, 均 <10%, 可用于泉水流量动态预测; 其中 NSGM(1, 2) 模型精度更高、对曲线“拐点”的拟合更好。根据 4 种模型预测的 1964—2030 年泉水流量, 从保泉角度评价百泉泉域岩溶水的开采资源量不得超过 1.69 m³/s。研究成果可为泉水流量动态预测和泉域水资源评价提供科学依据, 也可为类似地区地下水动态研究提供参考。

关键词: 新乡百泉; 逐步回归分析; GM(1, N) 模型; NSGM(1, N) 模型; GM(0, N) 模型; P-III 型曲线

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)02-0034-10

Application of the grey theory to dynamic analyses of the Baiquan Spring flow rate in Xinxiang

LI Zhichao¹, JIANG Baoliang¹, PAN Deng², LU Jing³, WANG Xiuming⁴

(1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2. Henan Provincial Institute of Natural Resources Monitoring and Land Management, Zhengzhou, Henan 450016, China; 3. Hekou Village Reservoir Management Bureau, Henan Province, Jiyuan, Henan 459010, China; 4. Jiyuan Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Jiyuan, Henan 459099, China)

Abstract: The Baiquan Spring in Xinxiang has many functions, such as water supply, agricultural irrigation,

收稿日期: 2022-05-18; 修订日期: 2022-07-15

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(WT2019188B)

第一作者: 李志超(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文地质、工程地质、环境地质等方面的研究。E-mail: lzc15537345765@163.com

通讯作者: 姜宝良(1962-), 男, 学士, 教授级高工, 硕士生导师, 主要从事水文地质、工程地质、环境地质等方面的研究。

E-mail: 13703849008@163.com

humanities, tourism and ecology. It is of great significance to study the dynamics of the spring flow rate and establish a dynamic prediction model for the spring water resources evaluation and protection. In order to further study the dynamic characteristics of the Baiquan Spring flow rate in Xinxiang and evaluate karst water resources in the spring area, based on the data of annually measured spring flow rate and annual average precipitation in the spring area from 1964 to 1978, the main influencing factors of the spring flow rate are determined by using the stepwise regression analysis, and a stepwise regression model is established, with remarkable regression effect. On the basis of the stepwise regression analysis, this paper establishes the GM(1, 2) model, NSGM(1, 2) model and GM(0, 2) model for the dynamic prediction of the spring flow rate. The results show that (1) from 1964 to 1978, the Baiquan spring flow rate was mainly controlled by the precipitation in the spring area, and the spring flow rate lagged behind the precipitation for one year, reflecting the dynamic characteristics of the spring water in the natural state. (2) The accuracy levels of the three grey models are the highest (excellent). (3) From 1964 to 1978, the measured discharge of the Baiquan spring ranged from 2.347 to 6.448 m³/s, with an average of 3.904 m³/s. The predicted values of the stepwise regression model range from 1.882 to 6.383 m³/s, with an average of 3.904 m³/s. The predicted value of the GM(1, 2) model varies between 2.327 and 6.448 m³/s, with an average of 3.939 m³/s. The predicted values of the NSGM(1, 2) model range from 2.133 to 6.448 m³/s, with an average of 3.927 m³/s. The predicted values of the GM(0, 2) model range from 1.787 to 6.448 m³/s, with an average of 3.907 m³/s. (4) The average relative errors of the stepwise regression model and the three grey models mentioned above are 7.794%, 7.292%, 7.122% and 7.797% respectively, all of which are less than 10%, indicating that they can be used for dynamic prediction of the spring water. Among them, the NSGM(1, 2) model has a higher accuracy and better fitting to the inflection point of the curve. (5) According to the spring flow rate from 1964 to 2030 predicted by the four models, the exploitation resources of the karst water in the Baiquan spring area should not exceed 1.69 m³/s from the angle of spring protection. The research results can not only provide scientific basis for spring flow dynamic prediction and spring area water resources evaluation, but also provide reference for the study of groundwater dynamics in similar areas.

Keywords: Baiquan Spring in Xinxiang; stepwise regression analysis; GM(1, N) Model; NSGM(1, N) Model; GM(0, N) Model; P-III Curve

由于国民经济高速发展,对水资源量的需求骤增,人为大量开采泉域裂隙岩溶地下水(简称岩溶水),造成大部分泉水干枯或仅短期出流,生态环境恶化等^[1-4],其中不乏集供水、人文、旅游、生态功能为一体的著名风景岩溶大泉,如山西太原晋祠泉、山西朔州神头泉、山西阳泉娘子关泉、山西潞城辛安泉、山东济南趵突泉、河北邢台百泉、河南新乡百泉等。岩溶泉水流量动态是反映岩溶含水系统特征的重要指标之一^[5]。研究天然状态下泉水流量的动态特征,构建泉水流量动态的预测模型,预测天然状态下的泉水流量,对泉域岩溶水资源评价和泉水资源保护具有重要意义。

目前,国内外对典型岩溶泉水的研究工作主要围绕泉水流量的影响因素与动态特征^[6-7],泉水流量衰减机理^[8-9]等进行。大气降水是影响天然泉水流量

动态的主要因素^[10],多种统计分析方法被应用于研究泉水流量动态与大气降水之间的响应机制。Nunno等^[11]采用非线性自回归外生神经网络模型对意大利Apulia地区76口监测井的地下水水位动态进行了预测。Hao等^[12]基于灰色GM(1,2)模型研究柳林泉水流量与降水量之间的时滞性。Hao等^[13]采用分段灰色系统模型研究人类活动对岩溶水文过程的影响。Liu等^[14]采用数值法模拟矿井关闭后矿井水位的动态变化。An等^[15]采用时频分析与长短期记忆神经网络相结合的方法模拟岩溶泉水流量。Cheng等^[16]采用多层感知器、长短期记忆一递归神经网络和支持向量回归三种机器学习方法研究山西龙子祠泉水流量与大气降水之间的关系。林云等^[17]基于R/S分析法、Mann-Kendall趋势分析法和小波分析法对河南安阳小南海泉水流量变化规律进行分析。卢丽等^[18]基

于水文动态分析和水均衡等方法研究桂林会仙湿地狮子岩地下河系统水循环对大气降水的响应机制。郭艺等^[19]基于移动平均法和指数平滑法建立了济南城区岩溶泉水流量的移动平均模型和指数平滑模型。

新乡百泉位于辉县市西北的苏门山南麓,以秀水青山、古迹名胜享誉中外,素有“中州颐和园”和“北国小西湖”的美誉^[20-21]。1964—1978年百泉泉水流量主要受大气降水影响,反映了天然状态下泉水流量动态特征;1979年以后,由于人工大量开采泉域岩溶水,致使百泉泉水长期干涸(仅在丰水年的丰水期有短暂复流),生态环境恶化,严重影响了新乡旅游业及其相关产业的高质量发展^[22]。

传统灰色模型通常采用灰色关联分析确定因变量的主要影响因素,具有一定的主观性^[23-27];而逐步回归分析是利用求解求逆紧凑变换法和双检验法,根据自变量在多元线性回归中起作用的大小进行筛选,建立“最优”的回归方程,其主要影响因素的选取更为客观^[21,28]。姜宝良等^[20]通过逐步回归分析建立了新乡百泉天然泉水流量与降水量的逐步回归模型,其回归效果显著,但缺乏多种模型之间的对比研究。为了进一步研究天然状态下新乡百泉泉水流量动态特征、评价泉域岩溶水资源,本文在逐步回归分析的基础上构建泉水流量与其主要影响因素之间的GM(1, N)模型^[23]、含一阶差分方程及多个变量的新结构灰色预测模型^[24-25](New Structure Grey Model with one first order equation and multiple variables,简称NSGM(1, N)模型)和GM(0, N)模型^[26],预测天然泉水流量,为泉域岩溶水资源评价和泉水资源保护提供了科学依据。

1 水文地质概况及流量动态分析

百泉泉域是一个相对封闭的水文地质单元(图1),北部以秦家岗—南岭尖压扭性断层构成隔水边界;西北部以魁星阁断层、黄水河部及西北部地表分水岭构成零通量边界;西南部以薄壁—上八里压扭性断层构成隔水边界;东北部以隆起的太古界(Ar)相对隔水地层、东陈召北岩浆岩侵入带为隔水边界;东南部以青羊口深大断裂为隔水边界;南部以峪河压扭性断层为界。峪河断层南部,奥陶系(O)灰岩深埋在石炭系(C)—二叠系(P)砂泥岩相对隔水地层之下,岩溶水开采难度大,目前没有开采。百泉泉域总面积1 260 km²,其中补给区面积710 km²。百泉泉域岩溶水主要接受

北部山丘区(灰岩裸露区)大气降水入渗补给,受地质构造影响,在与平原交界处的百泉集中排泄,属全排型岩溶大泉^[21]。

根据1964—1978年百泉泉水年均流量与泉域平均降水量(取要街、黄水、辉县3个雨量站逐年降水量的算术平均值)动态(图2),泉水年均流量最大6.448 m³/s,最小2.347 m³/s,平均3.904 m³/s。泉水流量受大气降水控制,且滞后降水量1 a,即泉水流量受前1 a降水量影响较大,当年降水量影响较小,反映了天然状态的泉水流量动态特征。

1979—2004年,在补给区和储存区结合部的山前一带大量开采岩溶水,据统计开采量约为20×10⁴ m³/d,百泉仅在丰水年的丰水期有短暂复流;2005—2020年,开采井数量和深度不断增加,开采井数超过300眼,开采量约为30×10⁴ m³/d,致使百泉泉水再也难觅其踪;2021年,辉县市、新乡凤泉区、卫辉市的自来水厂采用南水北调水(6 500×10⁴ m³/a)置换岩溶水的开采,再加上百泉泉域遭遇有气象记录以来的特大降雨,百泉泉水才重新复流,最大流量为10 m³/s(表1)。

2 理论与方法

2.1 灰色理论

灰色理论是一种研究“部分信息已知,部分信息未知”的不确定性系统理论方法。它通过原始数据的处理和灰色模型的建立,挖掘、发现、掌握系统演化规律,对系统未来的发展趋势做出科学合理的定量预测^[27]。GM(1, N)模型、NSGM(1, N)模型和GM(0, N)模型在建模过程中能充分考虑自变量对因变量变化趋势的影响,已在自然科学、工程技术、社会科学等领域中广泛应用^[23-27]。

(1) GM(1, N)模型

GM(1, N)模型是由一个因变量和N-1个自变量构成的一阶动态模型,是一种典型的因果关系模型,其建模步骤参考文献[23]。

(2) NSGM(1, N)模型

NSGM(1, N)模型是在GM(1, N)模型的基础上增加了线性修正项及灰色作用量,采用差分模型替代影子方程,在一定程度上解决了GM(1, N)模型存在的机理缺陷、参数缺陷和结构缺陷^[24-25],提高了模型的预测精度,其建模步骤参考文献[25]。

(3) GM(0, N)模型

GM(0, N)模型是由一个因变量和N-1个自变量

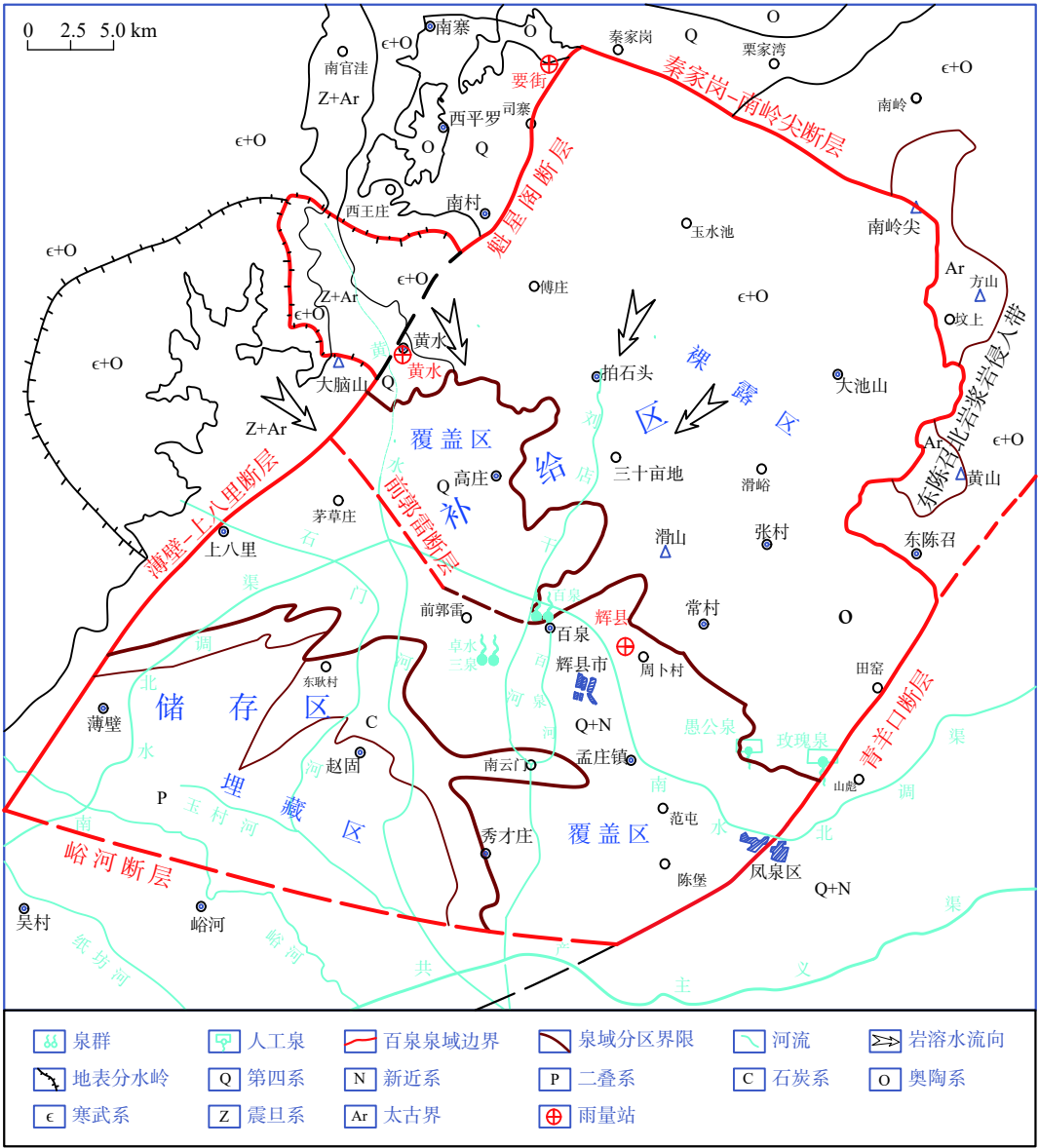


图 1 新乡百泉泉域裂隙岩溶水水文地质示意图

Fig. 1 Simplified hydrogeological map of the fissure-karst groundwater in the Baiquan Spring area in Xinxiang

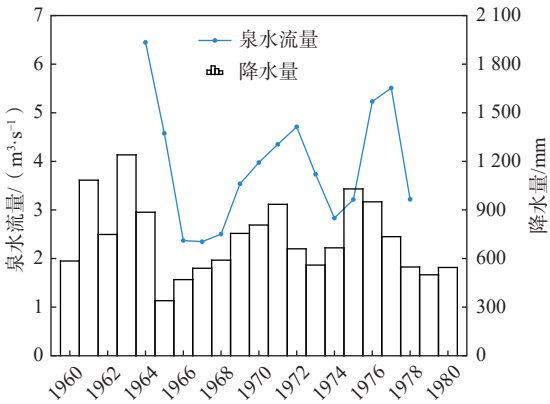


图 2 1964—1978 年百泉年均流量与降水量动态图

Fig. 2 Dynamic charts of the annual average flow rate of the Baiquan Spring and precipitation from 1964 to 1978

表 1 1979—2021 年百泉泉水复流情况

Table 1 Statistics of re-flow of the Baiquan Spring from 1979 to 2021

复流年份	复流情况
1982	8月15日复流至次年5月断流, 最大出水量为6.65 m³/s
1988	8月中旬复流, 次年断流(断流日期不详), 最大出水量约为5 m³/s
1996	8月3日复流, 次年4月17日断流, 最大出水量为3.10 m³/s
1998	9月2日复流, 次年1月8日断流, 最大出水量为1.91 m³/s
2000	9月21复流, 10月26日断流, 最高湖水位仅为40 cm
2003	10月26复流, 次年3月28日断流, 最大出水量为2.35 m³/s
2004	8月28日复流, 次年1月31断流, 最大出水量为1.40 m³/s
2021	百泉泉域遭遇有气象记录以来的特大降雨, 7月23日复流, 最大出水量为10 m³/s。2022年7月, 仍有近4 m³/s

构成的静态模型,由于不含导数,求解更为简便,其建模步骤参照文献[26]。

2.2 灰色模型精度检验

建立的预测模型是否可信,必须按照一定的方法和途径进行检验。本文采用后验差检验法、绝对关联度检验法和平均相对误差检验法评价模型的精度。

(1) 后验差检验法^[21]

$$\begin{cases} C = \frac{S_2}{S_1} \\ P = \{|\varepsilon(i) - \bar{\varepsilon}| < 0.674 5 S_1\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_1 ——原始数据列标准差;

S_2 ——残差序列标准差;

$\varepsilon(i)$ ——残差;

$\bar{\varepsilon}$ ——残差均值;

C ——后验差比值;

P ——小误差频率。

(2) 绝对关联度检验法^[27]

$$r_{ij} = \frac{1 + |s_i| + |s_j|}{1 + |s_i| + |s_j| + |s_i - s_j|} \quad (2)$$

$$s_i = \sum_{k=2}^{n-1} x_i(k) + 0.5 \times x_i(n)$$

$$s_j = \sum_{k=2}^{n-1} x_j(k) + 0.5 \times x_j(n)$$

式中: r_{ij} ——序列 i 与序列 j 的绝对关联度。

(3) 平均相对误差检验法

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i} \right| \times 100\% \quad (3)$$

式中: n ——样本容量;

$\hat{x}_i$ ——预测值;

x_i ——实测值。

灰色模型的精度等级可参照表 2。

表 2 灰色模型精度等级评价

Table 2 Evaluation of the accuracy grade of the grey model

精度等级	P	C	r_{ij}
优	$0.95 < P \leq 1.00$	$0.00 < C \leq 0.35$	$0.90 < r_{ij} \leq 1.00$
良	$0.80 < P \leq 0.95$	$0.35 < C \leq 0.50$	$0.80 < r_{ij} \leq 0.90$
中	$0.70 < P \leq 0.80$	$0.50 < C \leq 0.65$	$0.70 < r_{ij} \leq 0.80$
差	$0.00 < P \leq 0.70$	$0.65 < C \leq 1.00$	$0.00 < r_{ij} \leq 0.70$

3 灰色模型的建立

根据 1964—1978 年百泉泉水年均流量和泉域平

均降水量动态,选取当年降水量、前 1 a 降水量、前 2 a 降水量作为自变量,通过逐步回归分析建立了泉水流量与泉域降水量的逐步回归模型^[20]:

$$Q_i = 5.000\ 363 \times 10^{-3} \cdot P_{i-1} + 0.182\ 063 \quad (4)$$

式中: i ——序列序号;

Q_i ——当年泉水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

P_{i-1} ——前一年降水量/mm。

式(4)的复相关系数 $R = 0.963$, 剩余标准差 $S_Q = 0.345$, F 检验值 $F^* = 164.328$, 其回归效果显著。逐步回归模型逐年泉水流量的预测值见表 3。

根据逐步回归分析结果,取前 1 a 降水量作为主要影响因素,构建泉水流量动态预测的 GM(1, 2)模型、NSGM(1, 2)模型和 GM(0, 2)模型。

3.1 GM(1, 2)模型

经计算, GM(1, 2)模型的时间响应式为:

$$\hat{Q}_i = [6.448 - 0.005\ 292 \cdot \hat{P}_{i-1}] \cdot e^{-2.003\ 934(i-1)} + 0.005\ 292 \cdot \hat{P}_{i-1} \quad (5)$$

3.2 NSGM(1, 2)模型

经计算, NSGM(1, 2)模型的时间响应式为:

$$\begin{aligned} \hat{Q}_i = & \sum_{t=1}^{i-1} [0.540\ 442 \times 0.080\ 884^{t-1} \times 0.008\ 433 \cdot \hat{P}_{i-t+1}] + \\ & 0.080\ 884^{i-1} \times 6.448 + \\ & \sum_{j=0}^{i-2} 0.080\ 884^j [(i-j) \times 0.205\ 097 + 0.504\ 804] \end{aligned} \quad (6)$$

3.3 GM(0, 2)模型

经计算, GM(0, 2)模型的时间响应式为:

$$\hat{Q}_i = 0.005\ 255 \cdot \hat{P}_i + 0.283\ 219 \quad (7)$$

式中: i ——序列序号;

$\hat{Q}_i$ —— i 年泉水流量预测值的一阶累加值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

$\hat{P}_{i-1}$ —— $(i-1)$ 年降水量的一阶累加值/mm;

$\hat{P}_{i-t+1}$ —— $(i-t+1)$ 年降水量的一阶累加值/mm, $t = 1, 2, \dots, i-1$;

$\hat{P}_i$ —— i 年降水量的一阶累加值/mm。

3 种灰色模型逐年泉水流量的预测值通过累减还原得到, 见表 3。

3.4 模型检验

3.4.1 后验差检验和绝对关联度检验

GM(1, 2)模型、NSGM(1, 2)模型、GM(0, 2)模型的小误差频率(P)、后验差比值(C)及绝对关联度(r_{ij})的计算结果见表 4, 结合表 2 可知, 3 种灰色模型的精度等级均为最高级(优)。

表 3 1964—1978 年泉水流量预测值与实测值对比结果

Table 3 Comparison results between the predicted and measured values of the spring flow rate from 1964 to 1978

年份	年均降水量 /mm	实测值 /(m ³ ·s ⁻¹)	逐步回归模型		GM(1, 2)模型		NSGM(1, 2)模型		GM(0, 2)模型	
			预测值/(m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%	预测值/(m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%	预测值/(m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%	预测值/(m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%
1963	1 240.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1964	886.0	6.448	6.383	1.016	6.448	0.000	6.448	0.000	6.448	0.000
1965	340.0	4.575	4.612	0.817	4.156	9.158	4.678	2.251	4.656	1.770
1966	470.0	2.370	1.882	20.583	2.327	1.814	2.133	10.000	1.787	24.599
1967	540.0	2.347	2.532	7.892	2.585	10.141	2.520	7.371	2.470	5.241
1968	590.0	2.504	2.882	15.016	2.876	14.856	2.870	14.617	2.838	13.339
1969	755.0	3.537	3.132	11.443	3.126	11.620	3.126	11.620	3.101	12.327
1970	807.0	3.976	3.957	0.469	3.996	0.503	3.899	1.937	3.968	0.201
1971	935.0	4.349	4.217	3.027	4.271	1.794	4.198	3.472	4.241	2.483
1972	660.0	4.711	4.857	3.108	4.948	5.031	4.806	2.017	4.914	4.309
1973	560.0	3.733	3.482	6.716	3.493	6.429	3.602	3.509	3.468	7.099
1974	666.0	2.833	2.982	5.269	2.964	4.624	3.049	7.624	2.943	3.883
1975	1 030.0	3.215	3.512	9.247	3.525	9.642	3.487	8.460	3.500	8.865
1976	950.0	5.232	5.332	1.920	5.451	4.186	5.181	0.975	5.413	3.459
1977	735.0	5.509	4.932	10.466	5.028	8.731	4.954	10.074	4.993	9.366
1978	548.0	3.219	3.857	19.830	3.890	20.845	3.956	22.895	3.863	20.006
最大值	1 240.0	6.448	6.383	19.830	6.448	20.845	6.448	22.895	6.448	20.006
最小值	340.0	2.347	1.882	0.469	2.327	0.000	2.133	0.000	1.787	0.000
平均值	732.0	3.904	3.904	7.794	3.939	7.292	3.927	7.122	3.907	7.797

表 4 灰色模型检验指标计算结果

Table 4 Calculation results of the grey model test index

模型	<i>P</i>	<i>C</i>	<i>r_{ij}</i>
GM(1, 2)	1.000 0	0.265 3	0.997 4
NSGM(1, 2)	1.000 0	0.200 4	0.999 7
GM(0, 2)	1.000 0	0.274 7	0.996 3

3.4.2 平均相对误差检验

为了进一步检验 3 种灰色模型和逐步回归模型的精度, 将 4 种模型 1964—1978 年泉水流量的预测值与实测值作比较, 结果见图 3、表 3。由图 3 可以看出, NSGM(1, 2)模型对曲线“拐点”的拟合更好, 其预测精度更高。由表 3 可知, 4 种模型逐年泉水流量的预测值较为接近。1964—1978 年百泉泉水实测流量为 2.347 ~ 6.448 m³/s, 平均为 3.904 m³/s; 逐步回归模型预测泉水流量为 1.882 ~ 6.383 m³/s, 平均为 3.904 m³/s; GM(1, 2)模型预测值为 2.327 ~ 6.448 m³/s, 平均为 3.939 m³/s; NSGM(1, 2)模型预测值为 2.133 ~ 6.448 m³/s, 平均为 3.927 m³/s; GM(0, 2)模型预测值为 1.787 ~ 6.448 m³/s, 平均为 3.907 m³/s。逐步回归模型、GM(1, 2)模型、NSGM(1, 2)模型及 GM(0, 2)模型的平均相对误差分别为 7.794%、7.292%、7.122%、7.797%, 均<10%, 可用

于泉水流量动态预测。
综上所述, NSGM(1,2)模型更优于 GM(0,2)模型、GM(1,2)模型, 其对曲线“拐点”的拟合更好。

4 泉水流量动态预测及资源评价

1964—1978 年百泉泉水流量动态反映了天然状态下岩溶水的动态特征, 1979 年以后, 由于大量凿井开采泉域岩溶水, 造成岩溶水位持续下降, 改变了百泉泉域岩溶水的天然排泄方式, 致使泉水长期干涸, 仅在丰水年的丰水期有短暂复流^[22]。
基于 1964—2021 年百泉泉域年均降水量资料, 采用时间序列分析方法^[29]建立了 ARIMA(4,1,4)模型。经检验, 该模型 1964—2021 年降水量预测值与真实值相关分析的相关系数 $R=0.87$, 表明年降水量序列数据的有效信息基本已被提取, 该模型可用于百泉泉域年降水量预测。2022—2030 年降水量的预测值见图 4。
基于 1979—2030 年降水量(图 4), 利用前述建立的 4 种模型预测 1979—2030 年百泉逐年泉水流量(图 4); 通过绘制 4 种模型预测的 1964—2030 年泉水流量与 P-Ⅲ型曲线^[30]的最优拟合图(图 5)计算出不同保证率的泉水流量(表 5)。由图 4、图 5 和表 5 可知,

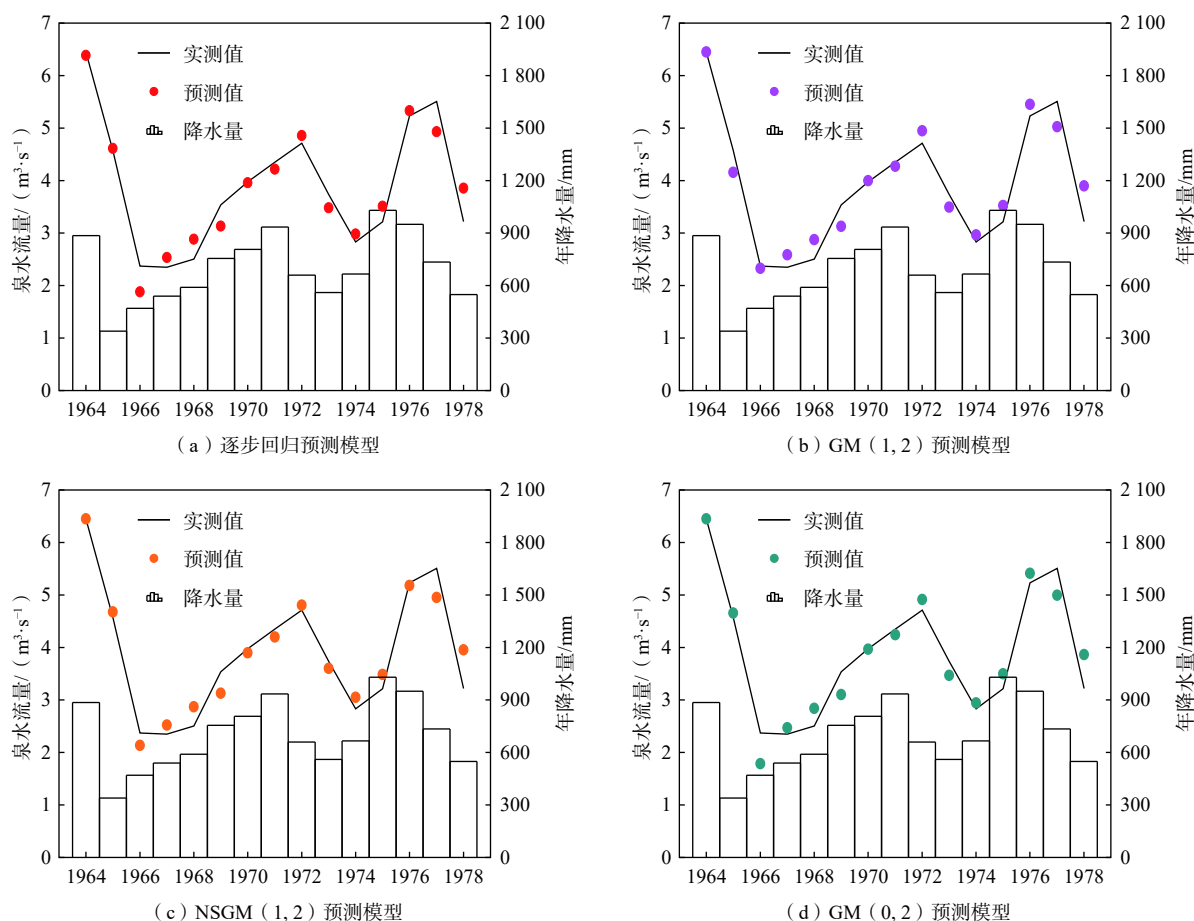


图3 4种模型泉水流量预测值与实测值对比图

Fig. 3 Comparison between the predicted and measured values of the spring flow rate in the four models

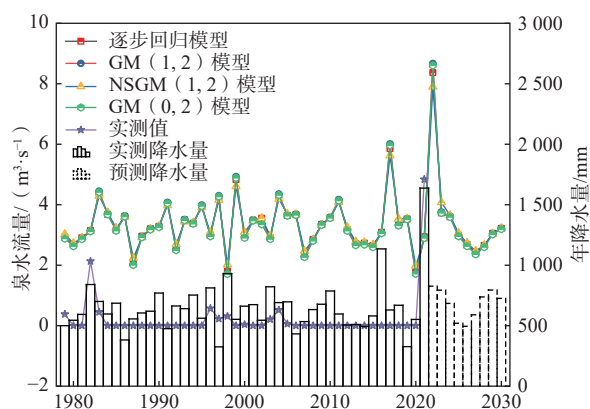


图4 1979—2030年百泉泉水流量实测值及预测结果图

Fig. 4 Measured and predicted values of the Baiquan Spring flow rate from 1979 to 2030

注: 图4中实测值为开采条件下年均泉水流量。

4种模型不同保证率泉水流量的预测值非常接近, 均可作为百泉区域水资源评价的依据。

为了使具有重要历史文化及生态和旅游价值的百泉绿水长流, 应根据百泉泉域的水文地质条件和岩溶水的开采现状等, 制定科学合理的开采规划, 严格

地下水管理, 压采、限采百泉泉域岩溶水, 其岩溶水的开采资源量不得超过 $1.69 \text{ m}^3/\text{s}$, 泉水在极枯年份也可出流, 恢复百泉自然优美景观。

5 结论

(1) 根据 1964—1978 年百泉泉水年均流量与泉域年均降水量动态, 通过逐步回归分析确定了百泉泉水流量的主要影响因素为前 1 a 降水量, 并建立了逐步回归模型, 其回归效果显著。

(2) 本文在逐步回归分析的基础上建立了灰色 GM(1, 2) 模型、NSGM(1, 2) 模型和 GM(0, 2) 模型, 其精度等级均为最高级 (优)。

(3) 逐步回归模型和 3 种灰色模型的平均相对误差分别为 7.794%、7.292%、7.122%、7.797%, 均 $< 10\%$, 可用于泉水流量动态预测; 其中 NSGM(1, 2) 模型的精度更高、对曲线“拐点”的拟合更好。

(4) 根据 4 种模型预测的 1964—2030 年泉水流量, 从保泉角度评价百泉泉域岩溶水的开采资源量不得超过 $1.69 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

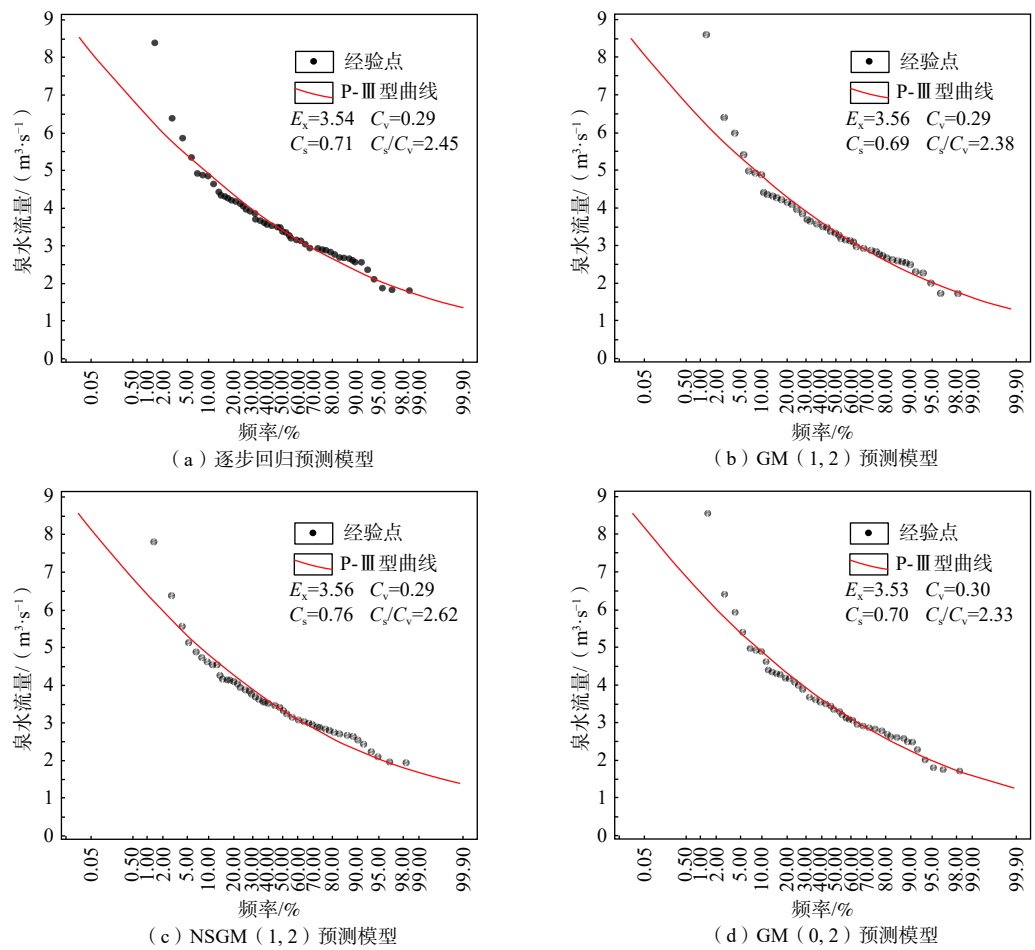


图 5 泉水流量与 P-Ⅲ型曲线拟合图

Fig. 5 Fitting diagram of the spring flow rate and P-Ⅲ curves

表 5 不同保证率泉水流量

保证率/%	泉水流量/(m³·s⁻¹)				
	逐步回归	GM(1,2)	NSGM(1,2)	GM(0,2)	平均
10	4.91	4.94	4.94	4.94	4.93
20	4.35	4.38	4.37	4.37	4.37
50	3.42	3.44	3.43	3.41	3.43
75	2.80	2.81	2.81	2.77	2.80
95	2.08	2.09	2.11	2.02	2.08
99	1.69	1.69	1.74	1.62	1.69

参考文献 (References) :

[1] LIANG Yongping, GAO Xubo, ZHAO Chunhong, et al. Review: Characterization, evolution, and environmental issues of Karst water systems in Northern China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(5): 1371 – 1385.

[2] 梁永平, 王维泰, 赵春红, 等. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(1): 34 – 42. [LIANG Yongping, WANG Weitai, ZHAO Chunhong, et al. Variations of Karst water and environmental

problems in North China[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(1): 34 – 42. (in Chinese with English abstract)]

[3] 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 等. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(3): 363 – 380. [LIANG Yongping, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, et al. Thinking and practice on the research direction of Karst water in Northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 363 – 380. (in Chinese with English abstract)]

[4] 王志恒, 梁永平, 申豪勇, 等. 自然与人类活动叠加影响下晋祠泉域岩溶地下水动态特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(6): 1823 – 1837. [WANG Zhiheng, LIANG Yongping, SHEN Haoyong, et al. Dynamic characteristics of karst groundwater in Jinci Spring under superimposed influence of natural and human activities[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(6): 1823 – 1837. (in Chinese with English abstract)]

[5] HAO Yonghong, ZHANG Juan, WANG Jiaojiao, et al.

- How does the anthropogenic activity affect the spring discharge?[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 1053 – 1065.
- [6] 王大伟, 乔小娟, 高波, 等. 山西龙子祠岩溶泉流量动态特征与影响因素分析[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 420 – 429. [WANG Dawei, QIAO Xiaojuan, GAO Bo, et al. Dynamic characteristics and influence factors of discharge of the Longzici Karst spring in Shanxi Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 420 – 429. (in Chinese with English abstract)]
- [7] LIU Y, WANG B, ZHAN H, et al. Simulation of nonstationary spring discharge using time series models[J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(15): 4875 – 4890.
- [8] 茅伟绩, 王锦国. 云南鹤庆县蝙蝠洞泉流量衰减分析[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(11): 47 – 50. [MAO Wei, WANG Jinguo. Analysis of Bianfudong spring flow attenuation in Heqing County, Yunnan Province[J]. *Coal Geology of China*, 2021, 33(11): 47 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 梁日胜, 曾成, 闫志为, 等. 贵州印江朗溪岩溶槽谷龙洞湾泉流量衰减分析[J]. 中国岩溶, 2019, 38(1): 10 – 18. [LIANG Risheng, ZENG Cheng, YAN Zhiwei, et al. Recession flow analysis for Longdongwan spring at Langxi Karst valley in Yinjiang County, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(1): 10 – 18. (in Chinese with English abstract)]
- [10] WU Xianchang, LI Changsuo, SUN Bin, et al. Groundwater hydrogeochemical formation and evolution in a Karst aquifer system affected by anthropogenic impacts[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(9): 2609 – 2626.
- [11] NUNNO D F, GRANATA F. Groundwater level prediction in Apulia region (Southern Italy) using NARX neural network[J]. *Environmental Research*, 2020, 190: 110062.
- [12] HAO Yonghong, YEH T C J, GAO Zongqiang, et al. A gray system model for studying the response to climatic change: The Liulin Karst springs, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(3/4): 668 – 676.
- [13] HAO Yonghong, CAO Bibo, CHEN Xiang, et al. A piecewise grey system model for study the effects of anthropogenic activities on Karst hydrological processes [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(5): 1207 – 1220.
- [14] LIU Peigui, GAO Yang, SHANG Manting, et al. Predicting water level rises and their effects on surrounding Karst water in an abandoned mine in Shandong, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(1): 1 – 10.
- [15] AN Lixing, HAO Yonghong, YEH T C J, et al. Simulation of Karst spring discharge using a combination of time-frequency analysis methods and long short-term memory neural networks[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 125320.
- [16] CHENG Shu, QIAO Xiaojun, SHI Yaolin, et al. Machine learning for predicting discharge fluctuation of a karst spring in North China[J]. *Acta Geophysica*, 2021, 69: 257 – 270.
- [17] 林云, 曲鹏冲, 吕海新, 等. 太行山东缘典型岩溶泉流量变化特征及规律分析[J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 671 – 679. [LIN Yun, QU Pengchong, LV Haixin, et al. Variation characteristics of typical karst springs in the eastern margin of the Taihang Mountains[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(5): 671 – 679. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 卢丽, 邹胜章, 赵一, 等. 桂林会仙湿地狮子岩地下河系统水循环对降水的响应[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 63 – 72. [LU Li, ZHOU Shengzhang, ZHAO Yi, et al. Response of water cycle to precipitation in Shizhiyan underground river system in Huixian wetland of Guilin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 63 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 郭艺, 王枫, 甘甫平, 等. 基于移动平均模型和指数平滑模型的岩溶泉流量预测[J]. 河北地质大学学报, 2020, 43(4): 19 – 25. [GUO Yi, WANG Feng, GAN Fuping, et al. Forecasting of spring flow based on moving average model and exponential smoothing model[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 2020, 43(4): 19 – 25. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 姜宝良, 付北锋, 赵延涛. 泉水动态分析预测和资源评价: 以辉县百泉为例[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(3): 43 – 46. [JIANG Baoliang, FU Beifeng, ZHAO Yantao. Analysis prediction and resources evaluation of spring dynamic: A case study of Bai spring in Hui County[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2002, 29(3): 43 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 姜宝良, 赵贵章, 于怀昌, 等. 河南新乡百泉供水研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2012. [JIANG Baoliang, ZHAO Guizhang, YU Huaichang, et al. Study on water supply of Baiquan in Xinxian, Henan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese)]

- [22] 姜宝良,许来慧,崔江利,等.新乡市百泉泉水流量动态预测与资源评价[J].人民黄河,2013,35(12):71-72. [JIANG Baoliang, XU Laihui, CUI Jiangli, et al. Dynamic prediction of spring flow and resources evaluation of Baiquan at Xinxian[J]. Yellow River, 2013, 35(12): 71-72. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 肖荣鸽,靳帅帅,庄琦,等.基于灰色理论的油气管道腐蚀速率预测[J].热加工工艺,2022,51(18):53-57. [XIAO Rongge, JIN Shuaishuai, ZHUANG Qi, et al. Prediction of corrosion rate of oil and gas pipeline based on grey theory[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(18): 53-57. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 曾波,李树良,孟伟.灰色预测理论及其应用[M].北京:科学出版社,2020. [ZENG Bo, LI Shuliang, MENG Wei. Grey prediction theory and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)]
- [25] 吴磊,陶忠,赵志曼,等.基于NSGM(1,3)模型的短切聚丙烯纤维-磷建筑石膏复合材料强度预测[J].材料导报,2021,35(增刊2):655-659. [WU Lei, TAO Zhong, ZHAO Zhiman, et al. Strength prediction of short-cut PP fiber-phosphorus building gypsum composites based on NSGM(1,3) model[J]. Materials Reports, 2021, 35(Sup 2): 655-659. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 穆奎,马崇启.梳棉工艺对单纱强力影响的灰色GM(0,N)预测模型[J].纺织学报,2011,32(6):34-38. [MU Kui, MA Chongqi. Grey GM(0,N) prediction model of influence of carding process on yarn strength[J]. Journal of Textile Research, 2011, 32(6): 34-38. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 刘思峰.灰色系统理论及其应用[M].9版.北京:科学出版社,2021. [LIU Sifeng. The grey system theory and its application[M]. 9th ed. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)]
- [28] 姜宝良,陈宁宁,李小建,等.河南某大型裂隙岩溶水源地地下水位动态分析[J].水文地质工程地质,2021,48(2):37-43. [JIANG Baoliang, CHEN Ningning, LI Xiaojian, et al. A dynamic analysis of groundwater levels in a large fractured-Karst groundwater wellfield in Henan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 37-43. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 刘德林.郑州市年降水量的ARIMA模型预测[J].水土保持研究,2011,18(6):249-251. [LIU Delin. Annual precipitation forecasting of Zhengzhou City based on ARIMA model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(6): 249-251. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 张浪,贺中华,夏传花,等.基于河流出水量的区域水文干旱特征及其水文频率分析——以黔中水利枢纽工程区为例[J].科学技术与工程,2021,21(27):11480-11489. [ZHANG Lang, HE Zhonghua, XIA Chuanhua, et al. Analysis of regional hydrological drought characteristics and hydrological frequency based on river water output: Taking Qianzhong water conservancy project area as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(27): 11480-11489. (in Chinese with English abstract)]