

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.03.016

基于改进 GM(1,1)模型的生活用水量预测

高华昆, 陶月赞, 杨杰

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:生活用水量预测是城市给水规划的关键,其核心是提高预测的精准度。由于传统 GM(1,1)模型误差主要来源于背景值和初始值,文章采取引入幂函数改进背景值和初始值 2 种改进方法。引入幂函数改进背景值权重构造,使新数据占改进模型主导地位;引入幂函数减少原始数据振荡,优化原始序列。将改进后的 2 种模型应用于河南省生活用水量预测中,并与传统 GM(1,1)模型进行比较。结果表明改进模型各个检验均满足要求,可进行中长期用水量预测,预测可得 2025 年河南省生活用水量为 $48.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。优化原始值改进的 GM(1,1)模型预测效果好、精度高,可为当地水资源保护、管理提供参考。

关键词:优化原始值;优化背景值;改进 GM(1,1)模型;用水量预测

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)03-0387-06

Prediction of domestic water consumption based on improved GM(1,1) model

GAO Huakun, TAO Yuezan, YANG Jie

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The prediction of domestic water consumption is the key to the urban water supply planning, and the core of it is to improve the accuracy of prediction. Since the error of the traditional GM(1,1) model mainly comes from the background value and the initial value, two improvement methods are adopted: introducing the power function to improve the background value weight structure, making the improved model dominated by new data; introducing the power function to reduce the oscillation of the original data, enhancing the adaptability of the original sequence. The two models are applied to the prediction of domestic water consumption in Henan Province and compared with the traditional GM(1,1) model. The results show that all tests of the improved model satisfy the requirements, and the medium-and long-term water consumption can be predicted. The domestic water consumption of Henan Province in 2025 is predicted to be $48.31 \times 10^8 \text{ m}^3$. The improved GM(1,1) model with optimized original value has good prediction effect and high accuracy, and can provide reference for local water resources protection and management.

Key words: optimized original value; optimized background value; improved GM(1,1) model; water consumption prediction

随着城市化的发展和居民生活水平的提高,生活用水量持续增加,生活用水供需矛盾日益突出^[1]。因此精准合理地预测生活用水量,有助于

缓解用水供需矛盾,也是水资源保护、管理的研究热点。生活用水量从较长时间看,具有逐年增长的趋势,为其预测奠定了基础。常用的用水量预

收稿日期:2022-10-17;修回日期:2022-11-24

基金项目:安徽高校自然科学研究重点资助项目(KJ2017A409)

作者简介:高华昆(1995—),男,安徽阜阳人,合肥工业大学硕士生;

陶月赞(1964—),男,安徽巢湖人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

测方法有城市综合指标法、系统动力学法、灰色预测模型法等^[2-4]。

灰色系统理论认为任何随机过程都可以看成一定时空区域内变化的灰色过程,灰色系统即部分信息已知、部分信息未知的系统,该理论是文献[5]提出的,灰色预测模型是灰色系统理论的一部分。对于生活用水量的预测,已知信息为用水量,但是影响用水量的其他因素难以明确得知,即为未知信息,如气候、行政管理措施、人口规模等,因此可将其视为灰色系统,灰色预测模型是适用的^[6]。该模型广泛应用于人口预测、经济预测、电力预测等^[7-9]。自 GM(1,1)模型提出至今,国内外学者不断对其进行改进,文献[10]基于新信息优先原理提出非等间距 GM(1,1)优化模型,改进后的模型能够充分利用信息,从而提高预测精度;文献[11]利用拉格朗日中值定理将背景值构造为与初始值相关的变量,有效提高模型的预测精度;文献[12]分析非等间距 GM(1,1)模型中的背景值,提出用 Newton 插值和数值积分中的 Newton-Cores、Gauss-Legendre 公式分别重构模型中的背景值,数据模拟结果充分说明新模型的有效性和优越性;文献[13]通过对非等间距原始序列背景值进行改进,拓宽 GM(1,1)模型的适用范围和精准度。

国内外学者大多引入积分差值、向量等方法改进 GM(1,1)模型,这些方法虽然取得不错的预测效果,但是较为烦琐,不利于预测结果的计算。通过对 GM(1,1)模型的研究,发现灰色预测模型的误差来源主要是初始条件和背景值^[14-15]。本文在上述研究的基础上引入幂函数优化背景值、原始序列进而改进 GM(1,1)模型,并将其应用于河南省生活用水量预测中,以期能用少量的数据进行中长期用水量预测,为城市供水管理、水资源持续利用提供帮助。

1 GM(1,1)模型的改进

1.1 GM(1,1)模型及其局限分析

经典 GM(1,1)模型的构造如下,原始序列 $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ 为非负序列,经累加得到:

$$x^{(1)}(k) = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\} \quad (1)$$

其中, $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$, $k = 1, 2, \dots, n$, 序列 $x^{(1)}(k)$ 为序列 $x^{(0)}(k)$ 的累加序列。

对序列 $x^{(1)}(k)$ 的紧邻数据求均值,生成

$z^{(1)}(k)$ 序列,即

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1) \quad (2)$$

构造矩阵 B 与矩阵 Y , 采用最小二乘法求参数 a, b , 即

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix},$$

$$Y = [x^{(0)}(1) \ x^{(0)}(2) \ \dots \ x^{(0)}(n)]^T,$$

$$[a \ b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3)$$

其中: a 为发展系数; b 为灰色作用量。

GM(1,1)模型的时间响应函数为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right) \exp(-ak) + \frac{b}{a} \quad (4)$$

其中, $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ 为 $x^{(1)}(k)$ 预测值, $k=0, 1, \dots, n$ 。

根据上述分析, $x^{(1)}$ 由 $x^{(0)}$ 累加得到, 累减 $\hat{x}^{(1)}$ 即可得到 $x^{(0)}$ 的预测值 $\hat{x}^{(0)}$, 即

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (5)$$

按照式(1)~(5)构造的模型即为经典 GM(1,1)模型。

通过上述建模分析,可以发现经典 GM(1,1)模型存在如下缺点:

1) GM(1,1)模型的拟合和预测精度与 a, b 值有关, a, b 的计算数值依赖于原始序列和背景值,因此式(2)的构造是造成拟合误差的因素之一。

2) 原始序列经累加得到式(1),其变化越平缓,产生误差越小。当原始序列变化速度过快或过慢时,会产生较大的滞后误差,从而影响预测精度。

1.2 GM(1,1)改进模型

经典 GM(1,1)模型在构造紧邻均值序列 $z^{(1)}(k)$ 时,所使用的方法为式(2)。此方法使得 $x^{(1)}(k)$ 中的每个数据均处于同等地位,导致新数据比旧数据没有优势,从而影响预测精度。为了削弱此种影响,使新数据占主导地位,文献[12]运用 Newton-Cores、Gauss-Legendre 公式进行改进背景值,此方法较为烦琐,不利于计算。本文构造新的序列 $Z^{(1)}(k)$, 即

$$Z^{(1)}(k) = \left\{ \left[(N-1)x^{(1)}(k)^{N-1} + x^{(1)}(k-1)^{N-1} \right] / N \right\}^{\frac{1}{N-1}} \quad (6)$$

式(6)对原有序列式(2)进行改进,新序列可抽象为幂函数。当 N 取 2 时, $Z^{(1)}(k)$ 与 $z^{(1)}(k)$ 两序列相同。

按式(1)、式(6)、式(3)~(5) 顺序重新构造 GM(1,1)模型,即优化背景值进而改进GM(1,1)模型,为便于比较,本文将此种构造方法记为模型II。

经典 GM(1,1)模型在使用过程中需要原始数据离散且非负,通过一次累加生成削弱随机性、有规律的离散序列。为增大此种影响,使原始序列随机性减小、规律性增大,更能适合 GM(1,1)模型。文献[16]引入缓冲算子对原始序列进行改进,缓冲算子虽然能有效减小预测产生的误差,但是需要满足不动点公理、信息充分利用公理、解析化和规范化公理方可使用。同时,当原始序列为振荡序列时,预测效果不如单调增长序列或单调衰减序列,而实际工程中很多原始数据是振荡序列。因此本文在前人研究的基础上进行总结,采用新的序列 $X^{(0)}(k)$ 代替原始序列 $x^{(0)}(k)$ 进行模型优化改进,新序列也可抽象为幂函数表示,即

$$X^{(0)}(k) = [x^0(k)^{M-1}x^0(n)]^{\frac{1}{M}} \quad (7)$$

按式(1)、式(7)、式(2)~(5) 顺序重新构造 GM(1,1)模型,即优化原始序列进而改进GM(1,1)模型,本文将此种构造方法记为模型III。

1.3 模型检验

对灰色预测模型及其相关改进模型的检验方法较多,常用的预测性能检验方法主要有均方误差、均方根误差、标准误差、平均相对误差等[6]。几种检验方法相似,为了运算简便,本文选取平均相对误差法进行预测性能检验。常用的预测精度检验方法主要有残差检验、灰色关联度检验、后验差检验[17]。残差检验仅对残差序列进行检验从而得出模型的预测性能,检验序列较少,因此本文采用灰色关联度检验和后验差检验。

令 ϵ_i 为原始数据与预测数据的残差,即

$$\epsilon_i = x^{(0)}(i) - \hat{x}^{(0)}(i)。$$

1) 平均相对误差。平均相对误差检验是对模型预测和仿真性能的检验,可以有效地反映出预测模型的真实值与预测值之间的差异[18],即

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{\epsilon(k)}{x^0(k)} \right| \quad (8)$$

2) 绝对关联度检验。绝对关联度检验需要对原始值与预测值进行零化,然后对两者之间的发展变化进行相应的几何检验[19-20]。设零化后原始值与预测值序列为 $x_0^{(0)}, \hat{y}_0$, 即

$$x_0^{(0)} = \{x_0^{(0)}(1), x_0^{(0)}(2), \dots, x_0^{(0)}(n)\},$$

$$\hat{y}_0 = \{\hat{y}_0(1), \hat{y}_0(2), \dots, \hat{y}_0(n)\} \quad (9)$$

$$x_0^{(0)}(i) = x^{(0)}(i) - x^{(0)}(1),$$

$$\hat{y}_0(j) = \hat{y}(j) - \hat{y}(1) \quad (10)$$

其中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n。$

序列 $x_0^{(0)}, \hat{y}_0$ 绝对关联度的定义[17]如下:

$$\Delta = \frac{1 + |s_i| + |s_j|}{1 + |s_i| + |s_j| + |s_j - s_i|} \quad (11)$$

其中

$$|s_i| = \left| \sum_{k=1}^{n-1} x_0^{(0)}(k) + 0.5x_0^{(0)}(n) \right|;$$

$$|s_j| = \left| \sum_{k=1}^{n-1} \hat{y}_0(k) + 0.5\hat{y}_0(n) \right|;$$

$$|s_j - s_i| = \left| \sum_{k=1}^{n-1} [\hat{y}_0(k) - x_0^{(0)}(k)] + 0.5[\hat{y}_0(n) - x_0^{(0)}(n)] \right|。$$

3) 后验差检验。后验差检验主要由均方差比 C 、小误差概率 P 2 个检验组成,该方法以残差序列为研究对象,检验残差的概率分布[21]。

$$S_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x^{(0)}(i) - \bar{x}^{(0)}]^2} \quad (12)$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\epsilon(i) - \bar{\epsilon}^{(0)}]^2} \quad (13)$$

$$C = \frac{S_2}{S_1} \quad (14)$$

$$P = P\{|\epsilon(i) - \bar{\epsilon}| < 0.674 5S_1\} \quad (15)$$

平均相对误差检验是模型预测精度方面的检验方法,绝对关联度检验、后验差检验是模型拟合精度方面的检验。相对误差越小,模型预测精度越高; C 越小,模型预测精度越高,表明原始数据很离散,而模型计算值与实际值之间并不太离散; P 和 C 同时进行精度刻画, P 越大,精度越高,表示残差与残差平均值之差小于给定值 $0.674 5S_1$ 的点较多[22]。通过检验可将模型划分为 4 个等级,模型精度等级参数取值见表 1 所列[23]。

表 1 模型精度等级参数取值

模型精度	α	Δ	C	P
1 级	0.01	0.90	0.35	0.95
2 级	0.05	0.80	0.50	0.80
3 级	0.10	0.70	0.65	0.70
4 级	0.20	0.60	0.80	0.60

2 实例分析

2.1 数据来源

为了便于与其他改进方法进行比较,本文采

用文献[24]提供的河南省 2012—2018 年生活用水量数据及改进模型(记为模型 I)进行横向对比,结果见表 2 所列。通过查阅《河南省水资源公报》,利用 2019—2020 年实际用水量数据作为预测检验。模型 I 与文献[10]所提出的改进模型相似,改进背景值计算方法进而改进 GM(1,1)模型。

表 2 河南省 2012—2018 年居民生活用水量 单位:10⁸ m³

年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
用水量	32.02	33.40	33.42	35.40	38.70	40.20	40.70

2.2 模型构建

对表 2 中的数据分别使用经典 GM(1,1)模型、模型 I、模型 II、模型 III 建模,对生活用水量进行模拟预测。模型 II、模型 III 构建时,N 与 M 的

选择至关重要,经过多次重复试验,N 取 3、M 取 2 时,效果最好。

经典 GM(1,1)模型为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 969.52\exp(0.023k) - 664.5 \quad (16)$$

模型 I 为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 698.45\exp(0.046k) - 666.4 \quad (17)$$

模型 II 为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 691.32\exp(0.046k) - 659.3 \quad (18)$$

模型 III 为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 1569.71\exp(0.023k) - 1533.6 \quad (19)$$

通过式(16)~(19)求出 4 种模型的模拟预测值和误差结果,见表 3 所列。

表 3 2012—2018 年 4 种模型用水量模拟结果对比

年份	经典 GM(1,1)模型		模型 I		模型 II		模型 III		
	模拟值/ (10 ⁸ m ³)	误差/%	模拟值/ (10 ⁸ m ³)	误差/%	模拟值/ (10 ⁸ m ³)	误差/%	优化值/ (10 ⁸ m ³)	模拟值/ (10 ⁸ m ³)	误差/%
2012	32.02		32.02		32.02		36.10	36.10	
2013	32.81	1.77	32.89	1.53	32.55	2.55	36.87	36.54	0.90
2014	34.37	2.84	34.40	3.02	34.08	1.99	36.88	37.40	1.40
2015	36.00	1.69	36.06	1.86	35.69	0.83	37.96	38.28	0.84
2016	37.71	2.56	37.77	2.40	37.38	3.42	39.69	39.18	1.28
2017	39.50	1.74	39.55	1.62	39.14	2.64	40.45	40.10	0.86
2018	41.38	1.67	41.41	1.74	40.99	0.70	40.70	41.05	0.85

由上述分析及表 3 可知:模型 I、模型 II 同为优化背景值进而改进 GM(1,1)模型,但模型 I 出现的最大误差年份为 2014 年,误差为 3.02%;模型 II 出现的最大误差年份为 2016 年,误差为 3.42%;GM(1,1)模型的最大误差年份为 2014 年,误差为 2.84%。对比模型 I、模型 II 发现使用积分的方法改进背景值优于引用幂函数的方法改进背景值,但两者改进后的模型均出现了最大误差大于 GM(1,1)模型。模型 III 对比 GM(1,1)模型,则最大误差大幅减小。模型 III 出现最大误差的年份也是 2014 年,但仅为 1.40%。

经典 GM(1,1)模型、模型 I、模型 III 产生最大误差的年份为 2014 年,通过 2014 年实际用水量以及预测用水量发现 4 种模型的预测值均大于实际值。此种现象普遍存在于 GM(1,1)模型在进行等间距预测时,原始数据变化差异较大,从而

造成预测误差变大。模型 III 虽进行了优化原始序列,减少此类误差产生,但无法消除。

2.3 模型检验

采用式(8)~(15)检验 4 种模型的模拟预测效果,结果见表 4 所列。

表 4 4 种模型的精度检验

指标	模型			
	经典 GM(1,1)	I	II	III
平均相对误差/%	2.050	2.030	2.020	1.020
绝对关联度	0.993	0.999	0.959	0.994
均方差比值	0.280	0.250	0.280	0.250
小误差概率	1.000	1.000	1.000	1.000

由表 4 可知,4 种模型在绝对关联度、均方差比值和小误差概率检验相差不大,绝对关联度大于

0.900,均方差比值小于0.350,小误差概率大于0.950。在不计入平均相对误差指标分析时,4种模型的精准度为一级精度模型。通过平均相对误差检验可以发现,模型Ⅲ的平均相对误差最小,经典GM(1,1)模型、模型Ⅰ、模型Ⅱ产生的平均相对误差基本相同,约为模型Ⅲ平均相对误差的2倍。

本文所采用的2种改进方法在模型拟合精度方面没有显著提高,但模型Ⅲ在预测精度上有显著提高,模型Ⅱ却无明显变化。这表明模型Ⅲ更

具优越性,具有较好的工程应用价值。

2.4 用水量预测

通过上述分析可知模型Ⅲ更具预测的优越性,但上述4种模型在精度等级上都可以进行中长期用水量预测。

为了检验模型Ⅲ是否更适合河南省生活用水量预测,本文根据上述4种模型,通过式(13)~(16)预测2019—2020年用水量,结果见表5所列。

表5 2019—2020年4种模型用水量误差对比

年份	实际量/ (10 ⁸ m ³)	经典GM(1,1)模型		模型Ⅰ		模型Ⅱ		模型Ⅲ	
		模拟值/(10 ⁸ m ³)	误差/%	模拟值/(10 ⁸ m ³)	误差/%	模拟值/(10 ⁸ m ³)	误差/%	模拟值/(10 ⁸ m ³)	误差/%
2019	41.60	43.35	4.20	43.37	4.25	42.92	3.17	42.01	0.99
2020	43.12	45.41	5.31	45.52	5.57	44.94	4.23	43.01	0.27

虽然4种模型都适用于河南省生活用水量预测,但由表5可知,模型Ⅲ进行河南省生活用水量预测时效果最好。4种模型的平均相对误差分别为4.76%、4.91%、3.70%、0.63%,模型Ⅲ2019年、2020年的误差分别为0.99%、0.27%,预测精度远超前3种模型,更适合进行河南省生活用水量预测。模型Ⅲ的预测结果较为理想,但在实际问题使用时会受到其他因素的影响,如引江济淮工程、《地下水管理条例》施行等,造成供水水源、水量发生变化。这些变化在一定程度上会影响预测结果的精准度,因此在作出预测前要求用水过程不会发生结构性变化。

综上所述,使用模型Ⅲ进行河南省生活用水量预测,预测出2021—2025年用水量分别为44.02×10⁸、45.05×10⁸、46.11×10⁸、47.20×10⁸、48.31×10⁸ m³。

3 结 论

1)对4种模型进行比较,可知模型Ⅰ、模型Ⅱ在理论上属于构造新的紧邻均值序列,两者模拟结果及相应预测的误差相近,较GM(1,1)模型精度略有提高;模型Ⅲ属于优化原始值改进GM(1,1)模型,其预测精度明显高于前3种改进模型。引入幂函数优化原始值比优化背景值更能提高GM(1,1)模型的预测精度。

2)模型Ⅲ对河南省生活用水量进行中长期预测,预测效果在4种模型中相对最优。在满足用水过程中不发生结构性变化时,预测2025年用水量为48.31×10⁸ m³。但在实际用水过程发生

变化时,使预测结果精准度进一步提高是下一阶段研究的重点。

[参 考 文 献]

- [1] 刘家宏,王建华,李海红,等.城市生活用水指标计算模型[J].水利学报,2013,44(10):1158-1164.
- [2] 吴娇.国土空间规划背景下广州市城市用水量预测[J].给水排水,2022,58(3):6-10.
- [3] 艾萨迪拉·玉苏甫安瓦尔·买买提明.新疆喀什地区城镇化过程中用水量预测[J].冰川冻土,2017,39(3):688-695.
- [4] 傅金祥,潘海宾,由昆.灰色残差模拟在城市用水量预测的研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2008,24(1):119-122.
- [5] DENG J L. Control problems of grey systems[J]. Systems and Control Letters,1982,1(5):288-294.
- [6] 尹学康,韩德宏.城市需水量预测[M].北京:中国建筑工业出版社,2005:94-99.
- [7] 侯瑞环,徐翔燕.基于改进GM(1,1)模型的中长期人口预测[J].统计与决策,2021(1):186-188.
- [8] CHONG L, WAN L X, TONG F L, et al. Application of a novel grey forecasting model with time power term to predict China's GDP[J]. Grey Systems Theory and Application,2020,5:343-357.
- [9] DING S, HIPEL K W, DANG Y G. Forecasting China's electricity consumption using a new grey prediction model[J]. Energy,2018,149:314-328.
- [10] 奚雷,丁松,徐宁,等.新信息优先原理下非等间距GM(1,1)模型优化研究[J].控制与决策,2019,34(10):2221-2228.
- [11] WANG Y H, LU J. Improvement and application of GM(1,1) model based on multivariable dynamic optimization[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2020,31(3):593-601.

(下转第416页)

[参 考 文 献]

- [1] KABBAGE M, KESSENS R, BARTHOLOMAY L C, et al. The life and death of a plant cell[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2017, 68:375-404.
- [2] FOYER C H, NOCTOR G. Redox sensing and signalling associated with reactive oxygen in chloroplasts peroxisomes and mitochondria[J]. *Physiol Plantarum*, 2003, 119(3):355-364.
- [3] APEL K, HIRT H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction [J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2004, 55:373-399.
- [4] MLLER A P, MOUSSEAU T A, DE LOPE F, et al. Elevated frequency of abnormalities in barn swallows from chernobyl[J]. *Biol Lett*, 2007, 3(4):414-417.
- [5] TAKAHASHI H, YAMAUCHI T, COLMER T D, et al. Aerenchyma formation in plants[J]. *Low-Oxygen Stress in Plants*, 2014, 21:247-265.
- [6] 吴顺, 萧浪涛. 植物体内活性氧代谢及其信号转导[J]. *湖南农业大学学报*, 2003, 29(5):450-455.
- [7] ZHANG C J, ZHAO B C, GE W N, et al. An apoplastic h-type thioredoxin is involved in the stress response through regulation of the apoplastic reactive oxygen species in rice [J]. *Plant Physiol*, 2011, 157(4):1884-1899.
- [8] REICHHELD J P, MESTRES-ORTEGA D, LALOI C, et al. The multigenic family of thioredoxin *h* in *Arabidopsis thaliana*: specific expression and stress response[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2002, 40(6/7/8):685-690.
- [9] COLLIN V, ISSAKIDIS-BOURGUET E, MARCHAND C, et al. The *Arabidopsis* plastidial thioredoxins: new functions and new insights into specificity [J]. *J Biol Chem*, 2003, 278(26):23747-23752.
- [10] KÖNIG J, BAIER M, HORLING F, et al. The plant-specific function of 2-Cys peroxiredoxin-mediated detoxification of peroxides in the redox-hierarchy of photosynthetic electron flux[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99(8):5738-5743.
- [11] 李云飞, 桑娜, 刘慧, 等. 棉花硫氧还蛋白基因 *Gh-WCRKC2-5* 参与开花调控的功能研究[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2018, 36(6):774-782.
- [12] GHANTA S, BHATTACHARYA D, SINHA R, et al. *Nicotiana tabacum* overexpressing γ -ECS exhibits biotic stress tolerance likely through NPR1-dependent salicylic acid-mediated pathway[J]. *Planta*, 2011, 233(5):895-910.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 391 页)

- [12] 刘圣保, 张公让, 李巧巧, 等. 非等间距 GM(1, 1) 模型背景值的改进及其最优化[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2010, 33(11):1749-1752.
- [13] CAIY H, ZENG W J. Improvement and application of initial value of non-equidistant new information GM(1, 1) model[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 27(7):198-199.
- [14] 高宁, 高彩云. 利用非齐次指数函数构造 GM(1, 1) 模型背景值的新方法[J]. *统计与决策*, 2017(17):24-27.
- [15] 卢捷, 李峰. 基于初始值和背景值改进的 GM(1, 1) 模型优化与应用[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(9):27-33.
- [16] 党耀国, 刘思峰, 刘斌, 等. 关于弱化缓冲算子的研究[J]. *中国管理科学*, 2004(2):109-112.
- [17] 李凯. 灰色预测模型的优化及其应用研究[D]. 上海: 上海财经大学, 2020.
- [18] REN X W, TANG Y Q, LI J, et al. A prediction method using grey model for cumulative plastic deformation under cyclic loads[J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(1):441-457.
- [19] 潘翱翔, 赖健琼. 基于改进灰色预测模型的道路交通事故预测模型研究[J]. *计算机时代*, 2022(5):33-38.
- [20] 彭振斌, 张闯, 彭文祥, 等. GM(1, 1) 模型背景值构造的不同方法与应用[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(6):869-873.
- [21] 孙永荣, 胡应东, 陈武, 等. 基于 GM(1, 1) 改进模型的建筑物沉降预测[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(1):107-110.
- [22] 黄学林, 王观虎, 龙小勇, 等. 机场道面预防性养护评价指标综合改进灰色预测模型[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(12):3228-3238.
- [23] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [24] 袁旦, 刘献, 张小丽. 基于改进灰色模型 GM(1, 1) 的生活用水量预测研究[J]. *陕西水利*, 2020(7):1-3, 16.

(责任编辑 张 镛)