

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2020.0136

韩会明,刘喆玥,刘成林,等.灰色模型的改进及其在气象干旱预测中的应用[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):62-68.
HAN H M, LIU Z Y, LIU C L, et al. Improvement and application of grey model for meteorological drought prediction[J].
South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 62-68. (in Chinese)

灰色模型的改进及其在气象干旱预测中的应用

韩会明¹, 刘喆玥², 刘成林¹, 陈齐强¹, 谢国栋¹

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 南昌 330031; 2. 江西省气象信息中心, 南昌 330096)

摘要:针对传统GM(1,1)模型在数据预处理阶段存在的不足,分析模型误差的产生原因,提出新的数据预处理方法。依据峡江县1958—2018年年降水量资料,通过计算其SPI指数(标准化降水指数)得到干旱年时间序列。在真实的时间序列数据集上对经典灰色模型GM⁰、平移转换预处理灰色模型GM¹、基于平移转换的平均弱化缓冲算子预处理灰色模型GM²进行了对比测试,结果表明:平移转换结合平均弱化缓冲算子弥补了预处理阶段的不足,有效地降低传统模型的误差,改进后的GM²模型的平均预测误差为3.32%,相较于其它两种模型分别降低了44.16%和16.24%。证明了该模型具有更好的预测精度,可应用于干旱年的预测,为区域干旱预测和干旱防治工作提供理论依据。

关键词:灰色模型;干旱;SPI指数;平移转换;平均弱化缓冲算子

中图分类号:P338 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improvement and application of grey model for meteorological drought prediction

HAN Huiming¹, LIU Zheyue², LIU Chenglin¹, CHEN Qiqiang¹, XIE Guodong¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Jiangxi Meteorological Information Center, Nanchang 330096, China)

Abstract: In view of the shortcomings of the traditional Grey Model (1,1) (GM) (1,1) in the data preprocessing stage, a new data preprocessing method was proposed by analyzing the causes of model errors. Based on the annual precipitation data of Xiajiang County from 1958 to 2018, drought year time series was obtained by calculating SPI index (standardized precipitation index). The classical gray model GM⁰, the translational conversion preprocessing gray model GM¹, and the average weakening buffer operator preprocessing gray model GM² based on translation transformation were compared on the real-time series data set. The results showed that the translational conversion combined with the average weakening buffer operator compensated the shortcomings of the preprocessing stage and effectively reduced the error of the traditional model. The average prediction error of the improved GM² model was 3.32%, which was 44.16 and 16.24 percentage points lower than the other two models. It is proved that the model has better prediction accuracy. It can be applied to the prediction of dry years, providing a theoretical basis for regional drought prediction and drought control.

Key words: gray model; drought; SPI index; translational transformation; average weakening buffer operator

收稿日期:2019-04-21 修回日期:2019-09-22 网络出版时间:2019-09-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190927.1136.002.html>

基金项目:江西省研究生创新专项资金项目(YC2018-S121)

作者简介:韩会明(1994—),男,陕西商洛人,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:947348703@qq.com

通信作者:刘成林(1973—),男,江西玉山人,教授,博士,主要从事遥感与水文水资源方面的研究。E-mail:liucl@ncu.edu.cn

干旱是自然灾害中最主要的灾害之一,因其发生的频率高、持续的时间长、波及的范围大,对国民经济尤其是人民的生活生产影响严重^[1],准确的干旱预测有助于水资源管理人员和政府决策者及时应对干旱灾害,减轻灾害损失。虽然干旱灾害的规律性不强,预测难度也较大,但人们对干旱规律的探索从未停止。

常见的干旱预测研究方法有:RBF神经网络^[2]、马尔科夫链^[3]、支持向量机^[4]、灰色系统^[5-7]等,其中,灰色系统是最常用的一种,它是由邓聚龙^[8]教授于1982年提出的,其灰色GM(1,1)模型主要被用于单一主导因子的拟合与预测,并揭示变化规律和可能的发展趋势^[9-11]。邱俊楠等^[12]以榆林市54年降雨资料为基础,对灰色模型残差序列进行修正,建立灰色残差模型,有效的提高了模型精度并预测了未来3步的干旱发生年;魏光辉等^[13]利用温州市53年降雨资料建立了灰色预测灾变模型,经检验模拟的相对误差值为-7.36%~6.31%;王净等^[14]对徐州地区构建了不同响应时间的气象干旱灰色预测模型,对徐州地区年旱和夏旱的模拟误差分别为8.43%和5.44%;通过建立灰色模型对干旱年进行预测为农业灌溉决策和管理提供参考。由于该模型的本身存在一定的局限性,因此优化传统模型,提高预测精度也成为了一些学者的研究重点。目前,国内外学者主要从数据预处理^[15-16]、背景值优化^[17]、建立残差模型^[12]三个方面进行模型优化。本文考虑到实际干旱年时间序列数据波动大,即使通过一次累加,序列的光滑效果仍然不好,致使模型预测精度不理想。因此,将平移转换和平均弱化缓冲算子与灰色模型相结合,改进了传统灰色模型的数据预处理环节,建立改进的灰色模型GM²,将该模型和传统灰色模型GM⁰和平移转换预处理后的灰色模型GM¹进行比较分析,并应用该模型预测峡江地区未来气象干旱年,证明该模型的有效性和可行性。

1 研究区概况与数据方法

1.1 研究区概况及数据来源

峡江县地处吉安市北部,位于东经114°53'21"~115°31'57",北纬27°27'50"~27°45'20",东西宽约64 km,南北长约39.5 km,全县总面积1 287.43 km²。赣江自南向北贯穿境内,将峡江县分为东西两部分,境内地势东南、西北较高,向中部赣江倾斜,地形以丘陵为主,面积约占全县总面积的62%。气候属于中亚热带季风性湿润气候,雨量充沛、光照足、四季分明,多年平均气温17℃,多年平均降雨量

1 611.8 mm,年蒸发量1 515.2 mm。年际年内分配不均,最大年降水量为2 296.2 mm,最小年降水量877.5 mm,雨季集中在3至6月,期间降水占全年的56.3%,7至9月受副热带高压影响偶有雷雨,冬春时节又受到北方的干冷气团影响,降水也很少,尤其近10年,气象灾害较以往年份明显增多。

本文数据来源于江西省气象信息中心所提供的峡江县国家气象站1958—2018年降水量资料,该数据通过质量控制,真实可靠。

1.2 SPI指数的计算原理

SPI指数(标准化降水指数)是用伽玛分布概率来描述降雨量的变化程度,该指数充分地利用了干旱形成期间的决定性因素—降水特征^[18],计算简单,降水数据易于获取,因而被广泛的应用于不同地区旱涝研究^[19-21]。SPI指数计算的详细过程^[22]为

$$SPI = S \frac{t - (c_2 + c_1)t + c_0}{[(d_3t + d_2)t + d_1]t + 1.0} \quad (1)$$

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{G(x)^2}} \quad (2)$$

$$G(x) = \frac{1}{\beta \Gamma(\gamma)} \int_0^x x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} dx, x > 0 \quad (3)$$

式中: x 为时段降雨量; β 和 γ 分别为尺度和形状参数; c_0 、 c_1 、 c_2 、 d_1 、 d_2 、 d_3 分别为 Γ 分布函数转换为累积频率简化近似求解公式的计算参数, $c_0=2.515 517$, $c_1=0.802 853$, $c_2=0.010 328$, $d_1=1.432 788$, $d_2=0.189 269$, $d_3=0.001 308$ 。

由此可以得到SPI指数的值,并通过表1划分干旱级别。

表1 SPI指数干旱等级划分
Tab. 1 Drought classification by SPI index

等级	干旱级别	SPI判别范围
0	正常	SPI > 0.5
1	轻度干旱	-1.0 < SPI ≤ -0.5
2	中度干旱	-1.5 < SPI ≤ -1.0
3	严重干旱	-2.0 < SPI ≤ -1.5
4	特大干旱	SPI ≤ -2.0

1.3 灰色预测模型

由于原始时间序列具有较强的随机性和波动性,不易建立灰色模型,所以在建模之前要对原始时间序列进行处理^[23]。具体建模步骤为^[24-26]

设干旱年时间序列的原始数据为 $X^{(0)}$, $X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)]$,对原始时间序列进行一次累加得到新的时间序列 $X^{(1)}$, $X^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)]$ 。

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

其中序列 $Z^{(1)} = (Z^{(1)}(2), Z^{(1)}(3), \dots, Z^{(1)}(n))$

$$Z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1), \quad k=2, 3, \dots, n \quad (5)$$

灰色 GM(1,1)模型的微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (6)$$

式中: a, b 为参数。

灰色 GM(1,1)模型参数矩阵 $A = [a, b]^T$ 的最小二乘估计为

$$A = [a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y, \quad (7)$$

$$Y = \begin{pmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} -x^{(1)}(2) & 1 \\ -x^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -x^{(1)}(n) & 1 \end{pmatrix}$$

灰色预测模型的时间响应式为

$$\hat{x}(k+1) = \left(x^{(0)} - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a}, \quad k=0,1,2,\dots,n \quad (8)$$

对此式做一阶累减还原得到原始序列 $X(0)$ 的预测模型为

$$\hat{x}^{(0)}(k) = x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k), \quad k=0,1,2,\dots,n \quad (9)$$

$\hat{x}^{(0)}(1) = \hat{x}^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$, 式(7)、(8)即为 GM(1,1)模型进行灰色预测的基本计算公式。

1.4 原始数据序列的预处理

1.4.1 平移转换预处理

平移转换处理是指通过对原始序列每项加上一个常数,改变序列的级比,提高光滑度从而提高模型的精度,所以在建立灰色模型过程中,需选择合适的常数,以提高预测精度^[27]。原始数据序列为: $x^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)]$, 平移转换后的数据序列为 $Y^{(0)} = [Y^{(0)}(1), Y^{(0)}(2), \dots, Y^{(0)}(n)]$, 对 $Y^{(0)}$ 序列做 1.3 节内容中的灰色建模,建立平移转换预处理后的灰色预测模型 GM¹(c)。

平移转换公式为

$$Y^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) + c \quad (10)$$

级比公式为

$$\sigma(k) = \frac{Y^{(0)}(k)}{Y^{(0)}(k-1)} \quad (11)$$

式中: $Y^{(0)}(k)$ 是平移转换后数据序列 $Y^{(0)}$ 的第 K 项, $Y^{(0)}(k-1)$ 是 $Y^{(0)}(k)$ 的前一项。选取合适的常数 c , 使数据序列 Y 的级比 σ 落在可容覆盖区间 $[\exp(-2/n), \exp(2/n)]$ 内。作平移转换后建立模型生成的预测值要进行数据还原, 减去常数 c 得到

时间间隔值。

1.4.2 平均弱化缓冲算子预处理

对原始数据序列进行平移转换预处理, 由于其强度较弱, 只能一定程度上增大序列的光滑性, 因此在此基础上对数据进行弱化缓冲算子预处理。许多学者从不同的角度构建了大量的弱化缓冲算子^[28], 选用平均弱化缓冲算子对数据序列进行预处理, 将 1.4.1 节中进行平移转换预处理后的序列作为原始数据序列, 对其进行平均弱化缓冲算子处理, 再对新的数据序列建立 1.3 节中的灰色模型, 得到新的灰色模型 GM²(c)。定义 1 设原始数据序列 $x^0 = [x^0(1), x^0(2), x^0(n)]$, 令 $x^0 d_1 = (x(1)d_1, x(2)d_1, \dots, x(n)d_1)$, 其中

$$x(k)d_1 = \frac{1}{n-k-1} [x(k) + x(k+1) + \dots + x(n)], \quad k=1,2,\dots,n \quad (12)$$

当 x 为单调增长、减小序列或波动序列时, 则 d_1 为弱化算子, 称之为平均弱化缓冲算子。

2 实例分析

2.1 模型的建立及精度比较

根据峡江地区 61 年的年降雨数据的 SPI 指数计算结果, 若以 1958 年为计算起点, 得到干旱时间序列为 (1, 6, 7, 10, 14, 21, 28, 29, 34, 46, 50, 52, 54, 56, 61), 计算结果见表 2。

表 2 SPI 旱情分析结果
Tab. 2 SPI drought analysis results

年份	时间序列	SPI 指数旱情结果	年份	时间序列	SPI 指数旱情结果
1958	1	轻度干旱	1991	34	中度干旱
1963	6	特大干旱	2003	46	中度干旱
1964	7	中度干旱	2007	50	严重干旱
1967	10	轻度干旱	2009	52	轻度干旱
1971	14	严重干旱	2011	54	特大干旱
1978	21	严重干旱	2013	56	轻度干旱
1985	28	轻度干旱	2018	61	轻度干旱
1986	29	轻度干旱	—	—	—

一般情况下, 原始数据序列不能直接建模, 因为这些数据多是随机的, 没规律的^[29]。灰色模型适用于指数形式增长的序列, 间隔为 1 的相邻干旱年对模型的精度会产生较大误差, 因此, 剔除相邻干旱年中 SPI 值较大即旱情较轻的。由表 2 可知, 1963 年和 1964 年相邻, 1985 年和 1986 年相邻, 且 1963 年 SPI 值小于 1964 年, 1985 年 SPI 值小于 1986 年, 说明 1963 年和 1985 年干旱特征更加明显, 因此剔除

1964 年和 1986 年数据。并且预测步数不宜过长, 1~2步为宜,为了验证模型的好坏,保留最近两次气象干旱年数据作为预测数据进行验证,得到干旱年时间序列(1,6,10,14,21,28,34,46,50,52,54)。对该数据序列不做处理建立的灰色模型记为 GM⁰,对

数据序列做平移转换加上 c 的灰色模型记为 GM¹(c),在平移转换的基础上做平均弱化缓冲算子处理后的模型记为 GM²(c),采用试算法取不同的 c 值,对数据序列建立 3 种灰色模型,计算得到不同模型的时间响应函数表达式,见表 3。

表 3 不同模型的时间响应函数

Tab. 3 Time response function of different models

c 的取值	模型类型	模型参数 a	模型参数 b	时间相应函数
0	GM ⁰	-0.174	12.499	$\hat{x}^{(1)}(k+1)=72.798 \exp(0.174k)-71.798$
100	GM ¹ (100)	-0.045	99.538	$\hat{x}^{(1)}(k+1)=2309.519 \exp(0.045k)-2208.510$
120	GM ¹ (120)	-0.039	119.009	$\hat{x}^{(1)}(k+1)=3157.716 \exp(0.039k)-3036.716$
150	GM ¹ (150)	-0.033	148.437	$\hat{x}^{(1)}(k+1)=4682.046 \exp(0.033k)-4531.046$
200	GM ¹ (200)	-0.026	197.817	$\hat{x}^{(1)}(k+1)=7889.199 \exp(0.026k)-7688.199$
100	GM ² (100)	-0.018	129.309	$\hat{x}^{(1)}(k+1)=7202.534 \exp(0.018k)-7073.806$
120	GM ² (120)	-0.016	149.196	$\hat{x}^{(1)}(k+1)=9438.615 \exp(0.016k)-9289.887$
150	GM ² (150)	-0.014	179.102	$\hat{x}^{(1)}(k+1)=13320.229 \exp(0.014k)-13169.229$
200	GM ² (200)	-0.011	228.965	$\hat{x}^{(1)}(k+1)=21370.503 \exp(0.011k)-21141.776$

利用不同灰色模型的时间响应函数表达式对未来 2 步的干旱年进行预测,将预测的结果与最近两次实际气象干旱年 2013 年和 2018 年的时间序列 56,61 进行比较,其结果见表 4。

表 4 不同灰色模型的预测结果

Tab. 4 Prediction results by different gray models

模型类型	1 步预测结果	2 步预测结果	平均相对误差
GM ⁰	78.948	93.938	0.475
GM ¹ (100)	67.097	74.800	0.212
GM ¹ (120)	66.761	74.225	0.204
GM ¹ (150)	66.365	73.571	0.196
GM ¹ (200)	65.960	72.892	0.186
GM ² (100)	59.524	62.467	0.044
GM ² (120)	59.440	62.346	0.042
GM ² (150)	58.964	61.825	0.033
GM ² (200)	59.317	62.141	0.039

2.2 干旱年预报

在建立预测模型之前,将时间数据 56,61 弥补在原来的时间序列之后,为了保证数据长度的一致性,删除两个最早的原始数据,得到新的时间序列(10,14,21,28,34,46,50,52,54,56,61),对新序列建立数据预处理改进的灰色预测模型 GM²(c),由于时间序列发生改变,适合模型的 c 值也发生改变。比较不同 c 值所建立的 GM²(c)对时间序列的拟合程度,选择较优的 c 值建立预测模型进行预测,这里取常数 $c=200$,得到改进灰色模型 GM²(200)的时间相应表达式为: $\hat{x}^{(1)}(k+1)=30302.477 \times$

$\exp(0.008k)-30063.75$,对预测的 2 步数据进行平移转换还原,其计算结果见表 5。

表 5 GM²(200)模型预测结果

Tab. 5 GM²(200) model prediction results

序号	实际值	平移转换后序列	平移转换后进行弱化处理序列	模拟值
1	10	210	238.727	238.727
2	14	214	241.600	243.392
3	21	221	244.667	245.347
4	28	228	247.625	247.318
5	34	234	250.429	249.304
6	46	246	253.167	251.307
7	50	250	254.600	253.325
8	52	252	255.750	255.360
9	54	254	257.000	257.411
10	56	256	258.500	259.478
11	61	261	261.000	261.563
12	-	-	-	263.664
13	-	-	-	265.781

2.3 结果分析

通过对干旱年时间序列建立传统的灰色模型 GM⁰、平移转换处理后的模型 GM¹(c)、基于平移转换的平均弱化缓冲算子预处理模型 GM²(c)三种模型比较,如表 4 所示, k 值越大,即所预测的时间越往后,GM⁰ 模型的预测结果与实际偏差越大。GM¹(c)预测模型中,加上不同的平移转换常数 c 后,模型的预测误差都小于传统灰色模型 GM⁰,说

明平移转换处理可以提高传统灰色模型的精度,并且 $GM^1(c)$ 模型随着 c 值的增大其模型的预测精度也随之提高,这与文献[30]的结论相符合。 $GM^2(c)$ 模型对发生干旱的时间预测精度在 $GM^1(c)$ 基础上又有较大的提高,对于 $GM^2(c)$ 灰色模型来说, c 值的改变也影响着模型的精度,由于 c 的值不能穷举,所以本文采用试算法,取 c 分别等于 100、120、150、200 时的情况。通过对实际气象干旱年的预测结果对比发现, c 值的增加并不会使模型的精度像 $GM^1(c)$ 模型一样单调递增,当 $c=150$ 时, GM^2 模型的预测结果相较于其它 c 值效果更好,此时的 $GM^2(150)$ 模型对实际气象干旱年 2013 年和 2018 年的预测平均误差为 3.32%,较传统灰色模型 GM^0 模型和 $GM^1(150)$ 模型预测误差减少了 44.16% 和 16.24%,以上结果说明了这种数据预处理的可行性和有效性,本模型对干旱年的预测更加精确。

如表 5 所示,采用改进后的灰色预测模型 $GM^2(c)$,取 $c=200$,对峡江县未来 2 步的气象干旱年进行预测,得到气象干旱年可能出现的时间间隔分别为 63.66、65.78,即峡江地区在 2021 年和 2023 年峡江县可能出现气象干旱。

3 结 论

本文在传统 $GM(1,1)$ 模型基础上引入平移转换和平均弱化缓冲算子数据预处理方法,建立 GM^0 、 GM^1 和 GM^2 三种不同的灰色预测模型,以峡江县气象干旱年预测为例进行验证,通过对模型预测结果进行对比研究得到以下结论。

(1) 在传统灰色模型基础上对数据序列做平移转换处理的灰色预测模型 GM^1 ,给时间序列进行平移处理加上一个常数 c ,模型的精度会发生改变。由于时间序列是单调递增序列,当序列同时加上常数 c , c 越大级比就越接近于 1,序列的光滑度就越好,模型的精度也越高。

(2) 改进了传统灰色模型的预处理阶段,提高序列的光滑比,得到预测结果与实际情况更加吻合,证明了这种数据数据预处理方法的有效性和可行性。

(3) 将 GM^2 模型应用于峡江县气象干旱年预测,结果显示:峡江县在 2021 和 2023 年可能发生气象干旱,应该提高警惕,及时做好防范措施,减小灾害可能带来的影响。

在 $GM^2(c)$ 模型计算过程中,采用试算法,列举了不同 c 值进行预测结果对比,并未探究 c 的取值规律,所以不能选择最优的 c 值,并且模型依据降水

量单一因素进行预测,未来可从确定 c 值的规律和加入其它影响因素进一步研究探索。

参考文献(References):

- [1] 孙立德,孙虹雨. 农业病虫害气象学[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2015. (SUN L D, SUN H Y. Agricultural pest and disease meteorology [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2015. (in Chinese))
- [2] J A LE, H M EL-ASKARY, M ALLALI, et al. Application of recurrent neural networks for drought projections in California[J]. Atmospheric Research, 2017, 188: 100-106. DOI.org/10.1016/j.atmosres.2017.01.002.
- [3] 马齐云,张继权,王永芳,等. 内蒙古牧区牧草生长季干旱特征及预测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 157-163. (MA Q Y, ZHANG J Q, WANG Y F, et al. Characteristics and prediction of drought in growing season in Inner Mongolia pastoral area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(7): 157-163. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2016.232.
- [4] MAJID SHADMAN ROODPOSHI, TAHER SAFARRAD, HIMAN SHAHABI. Drought forecasting in eastern Australia using multivariate adaptive regression spline, least square support vector machine and M5Tree model [J]. Atmospheric Research, 2017(184): 149-175. DOI.org/10.1016/j.atmosres.2016.10.004.
- [5] 方蕾,刘科伟,马锐,等. 基于灰色 $GM(1,1)$ 模型的县域干旱预测-以关中平原腹地合阳县为例[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2014, 45(3): 403-409. (FANG L, LIU K W, MA K, et al. Drought prediction in the county based on gray $GM(1,1)$ model-taking Heyang County in Guanzhong Plain as a case [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2014, 45(3): 403-409. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2014.03.016.
- [6] 谷洪波,刘芷好. 湖南农业旱灾的时间规律分析及重灾年份预测[J]. 湖南科技大学学报: 社会科学版, 2016, 19(5): 110-116. (GU H B, LIU Z Y. Time regularity analysis and trend prediction of agricultural drought disaster in Hunan Province [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Social Science Edition), 2016, 19(5): 110-116. (in Chinese)) DOI: 10.13582/j.cnki.1672-7835.2016.05.019.
- [7] 闫佰忠,肖长来,梁秀娟. 长岭县干旱趋势预测研究[J]. 节水灌溉, 2012, 34(3): 48-50. (YAN B Z, XIAO C L, LIANG X J. Prediction of drought trend in Changling County [J]. Water Saving Irrigation, 2012, 34(3): 48-50. (in Chinese))
- [8] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学

- 出版社,1990. (DENG J L. Grey system theory tutorial [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press,1990. (in Chinese))
- [9] 刘思峰,杨英杰,吴利丰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2014. (LIU S F, YANG Y J, WU L F. Grey system theory and its application[M]. Beijing: Science Press,2014. (in Chinese))
- [10] MUHAMMADKABIR, SAEEDAHMAD, MUHAMMAD-IQBAL, et al. Improving prediction of extracellular matrix proteins using evolutionary information via a grey system model and asymmetric under-sampling technique[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2018 (174): 22-32. DOI. org/10. 1016/j. chemolab. 2018. 01. 004.
- [11] TAŞCI, LEVENT, TUNÇEZ, et al. Monitoring of deformations in open-pit mines and prediction of deformations with the grey prediction model[J]. Journal of Grey System. 2018, 30(4): 152-163.
- [12] 邱俊楠,张鑫,王宏伟,等. 改进的灰色灾变模型在干旱预测中的应用[J]. 人民黄河,2012,34(7): 47-49. (QIU J N, ZHANG X, WANG H W, et al. Application of improved gray catastrophe model to predict drought [J]. Yellow River, 2012, 34(7): 47-49. (in Chinese))
- [13] 魏光辉,胡清华,申莲,等. 灰色 GM(1,1)模型在区域干旱预测中的应用[J]. 沙漠与绿洲气象,2011,5(5): 20-23. (WEI G H, HU Q H, SHEN L, et al. Application of GM(1,1) model in regional drought forecast[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2011, 5(5): 20-23. (in Chinese))
- [14] 王净,贾红,王今殊. 灰色系统理论在徐州地区气象干旱预测中的应用[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版),2011,29(4): 75-78. (WANG J, JIA H, WANG J S. The applied analysis of drought prediction in Xuzhou area based on gray theory[J]. Journal of Jiangsu Normal University(Natural Science Edition), 2011, 29(4): 75-78. (in Chinese))
- [15] QIAN R W, LI L, SHU W, et al. Predicting Beijing's tertiary industry with an improved grey model[J]. Applied Soft Computing, 2017 (57): 482-494. DOI: 10. 1016/j. asoc. 2017. 04. 022.
- [16] HAO H, QIAN Z, ZHI G W, et al. Forecasting the number of end-of-life vehicles using a hybrid model based on grey model and artificial neural network [J]. Journal of Cleaner Production, 2018(202): 684-696. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2018. 08. 176.
- [17] 张伟. 基于背景值优化的 GM(1,1)国内旅游消费预测模型[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2017, 31(12): 203-207. (ZHU W. GM(1,1) Domestic tourism consumption prediction model based on background value optimization[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2017, 31(12): 203-207. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-8425 (z). 2017. 12. 035.
- [18] JOBINTHOMASA, VPRASANNAKUMARB. Temporal analysis of rainfall (1871-2012) and drought characteristics over a tropical monsoon-dominated State(Kerala) of India [J]. Journal of Hydrology, 2016, 534: 266-280. DOI. org/10. 1016/j. jhydrol. 2016. 01. 013.
- [19] 刘维,李祎君,何亮,等. 基于 SPI 判定的东北春玉米生长季干旱对产量的影响[J]. 农业工程学报,2018, 34(22): 121-127. (LIU W, LI Y J, HE L, et al. Effect of growing season drought on spring maize yields in northeast China based on standardized precipitation index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(22): 121-127. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2018. 22. 015.
- [20] 孙秋慧,徐国宾,马超,等. 基于 SPI 干旱指数的海口市干旱变化特征研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 58-65, 81. (SUN Q H, XU G B, MA C, et al. Study on the characteristics of drought in Haikou City based on standardized precipitation index [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(04): 58-65, 81. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0097.
- [21] MADUSANKA THILAKARATHNE, VENKATARAMANA SRIDHAR. Characterization of future drought conditions in the Lower Mekong River basin [J]. Weather and Climate Extremes, 2017, 17: 47-58. DOI. org/10. 1016/j. wace. 2017. 07. 004.
- [22] 李文卿,江源,赵守栋,等. 六盘山地区油松树轮宽度年表与多尺度标准化降水指数的关系[J]. 生态学报,2017, 37(10): 3365-3374. (LI W Q, JIANG Y, ZHAO S D, et al. Response of tree-ring width chronology of Pinus tabulaeformis to multi-scale standardized precipitation index (SPIn) in the Liupan Mountain area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): 3365-3374. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201603140451.
- [23] 刘历波,裴彧,裴同松. 灰色-马尔科夫模型在桥梁运营状况预测中的应用[J]. 河北大学学报(自然科学版),2019, 39(1): 11-17. (LIU L B, PEI Y, PEI T S. Application of Gray-Markov model in prediction of bridge operation condition [J]. Journal of Hebei University(Natural Science Edition), 2019, 39(1): 11-17. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1565. 2019. 01. 003.

- [24] 李义华,杜康,周洁. 基于改进灰色马尔科夫模型的木材需求量预测[J]. 中南林业科技大学学报,2017,37(12):133-138. (LI Y H, DU K, ZHOU J. Prediction of the wood demand by improved grey Markov mode [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(12): 133-138. (in Chinese)) DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.12.021.
- [25] 段智力,牛冬平. 改进灰色 GM(1,1)模型及其应用[J]. 通化师范学院学报, 2017, 38(12): 34-36. (DUAN Z L, NIU D P. Improved grey GM(1,1) model and its Application [J]. Journal of Tonghua Normal University, 2017, 38(12): 34-36. (in Chinese)) DOI:10.13877/j.cnki.cn22-1284.2017.12.007.
- [26] 龚日朝,罗钰婕,王芳,等. 湖南旱灾灰色灾变预测模型与实证研究[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版), 2010, 13(1): 86-90. (GONG R C, LUO Y J, WNAG F, et al. On drought disaster gray prediction model in Hunan and its empirical studies [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Social Science Edition), 2010, 13(1): 86-90. (in Chinese))
- [27] 陈芳,孙亚腾. 弱化缓冲算子修正的民航不安全事件离散灰色预测[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(3): 1022-1025. (CHEN F, SUN Y T. Discrete grey prediction model of the reckless incidents in the civil aviation based on the modification of weakening the buffer operator [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(3): 1022-1025. (in Chinese)) DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2017.03.041.
- [28] 程欢,姚建,明星,等. 等维动态递补灰色模型改进及应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(5): 108-112. (CEHNG H, YAO J, MING X, et al. Improvement and application of equi-dimensional dynamic supplement gray model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(5): 108-112. (in Chinese)) DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2016.05.020.
- [29] 邓丽仙,杨绍琼. 灰色系统理论在滇池流域干旱预测中的应用[J]. 人民长江, 2008, 39(6): 26-28. (DENG L X, YANG S Q. Application of grey system theory in drought prediction in Dianchi Lake basin [J]. Yangtze River, 2008, 39(6): 26-28. (in Chinese))
- [30] 刘冲,杨翠,许兰喜. 收入与物价关系的灰预测分析[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(10): 28-37. (LIU C, YANG C, XU L X. Grey prediction analysis of the relationship between income and price [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015, 45(10): 28-37. (in Chinese))

(上接第 44 页)

- [21] 靖凤伟,杨永国,邓世赞,等. 洪水灾害模拟及评估[J]. 地理空间信息, 2011, 9(4): 122-124. (JING F W, YANG Y G, DENG S Z, et al. Simulation and evaluation of flood disaster [J]. Geospatial Information, 2011, 9(4): 122-124. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-4623.2011.04.044.
- [22] 付意成,魏传江,王启猛,等. 区域洪灾风险评价体系研究[J]. 灾害学, 2009, 24(3): 27-32. (FU Y C, WEI C J, WANG Q M, et al. Study on regional flood risk assessment system [J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(3): 27-32. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2009.03.006.
- [23] HALL J W, SAYERS P B, DAWSON R J. National scale assessment of current and future flood risk in England and Wales [J]. Natural Hazards, 2005(36): 147-165. DOI: 10.1007/s11069-004-4546-7.
- [24] DILLEY M, CHEN R S, Deichmann U, et al. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis [M]. Washington: The World Bank, 2005. DOI: doi: http://dx.doi.org/.