



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.015

史文杰, 李昱, 刘学智, 等. GM(0, N)模型在湿地面积预测中的应用——以莫莫格湿地为例[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 101-107. SHI W J, LI Y, LIU X Z, et al. Application of GM(0, N) model to prediction of wetland area: A case study on Momoge wetland[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 101-107. (in Chinese)

# GM(0, N)模型在湿地面积预测中的应用

——以莫莫格湿地为例

史文杰<sup>1</sup>, 李昱<sup>1</sup>, 刘学智<sup>2</sup>, 张小丽<sup>1</sup>, 张弛<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 广州珠科院工程勘察设计有限公司, 广州 510611)

**摘要:** 预测未来年度湿地面积, 对研究湿地生境变化趋势、保护湿地有重要作用。建立灰色 GM(0, N) 模型旨在提供一种简便的方法, 预测湿地水面面积大小。首先应用灰色关联度分析模型, 量化确定了对湿地面积影响程度较大的相关因素, 分别是: 莫莫格湿地年降水量、嫩江径流量、洮儿河径流量。利用这三个相关因素建立了 GM(0, N) 预测模型, 对莫莫格湿地面积进行了模拟预测。为了提高精度, 对 GM(0, N) 模型进行了修正。利用残差和后验差检验方法对模型作了可靠度分析, 检测结果显示: 修正的 GM(0, N) 模型平均相对误差 9.1%, 后验差检验等级为 1 级, 多元线性回归模型平均相对误差 15.5%, 说明灰色预测模型对于莫莫格湿地水面面积预测具有一定优势。

**关键词:** GM(0, N) 模型; 灰色关联度分析; 湿地面积; 预测; 残差

**中图分类号:** N941.5; Q149 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0101-07

## Application of GM(0, N) model to prediction of wetland area: A case study on Momoge wetland

SHI Wenjie<sup>1</sup>, LI Yu<sup>1</sup>, LIU Xuezhi<sup>2</sup>, ZHANG Xiao<sup>1</sup>, ZHANG Chi<sup>1</sup>

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. The Pearl River Hydraulic Research Institute Surveying & designing Co., LTD, Guangzhou 510611, China)

**Abstract:** The prediction of wetland area in the coming years is critical for studying the change trends of the wetland habitat and preserving the wetlands. We developed a grey GM(0, N) model as a simple and convenient method to predict the water surface area of wetlands. First, we used the grey relational analysis model to quantitatively determine the main correlative factors that greatly influenced the wetland area. They were: annual rainfall of Momoge wetland, runoff volume of Nen River and Taoer River. These three factors were used to establish the GM(0, N) model to predict the area of Momoge wetland. To improve the prediction precision, we modified the GM(0, N) model. Then we conducted the residual test and posterior variance test to evaluate the reliability of the model. The average relative error of the modified GM(0, N) model was 9.1%, and the posterior variance test grade was Grade 1, while the average relative error of the multiple linear regressive model was 15.5%. This suggests that the modified GM(0, N) model has an advantage in a practical application.

**Key words:** grey GM(0, N) model; model; grey relational analysis; wetland area; prediction; residual

收稿日期: 2016-12-12 修回日期: 2017-07-11 网络出版时间: 2017-11-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171116.1130.003.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(2014010142); 国家自然科学基金(51279021)

Funds: Special Research on Public Welfare Industry of Ministry of Water Resources(2014010142); National Natural Science Foundation of China(51279021)

作者简介: 史文杰(1990), 男, 河南漯河人, 主要从事水库调度方面研究。E-mail: 270996776@qq.com

通讯作者: 李昱(1988), 男, 山东泰安人, 博士, 主要从事水库群联合调度方面研究。E-mail: dagongliyu@mail.dlut.edu.cn

湿地被誉为“自然之肾”和地球表层系统最重要的“物种基因库”，可以改善环境，保护生态，蓄滞洪水、减少污染、防止土壤沙化等方面发挥着巨大功能优势<sup>[6]</sup>。然而，当前全球湿地资源面积萎缩较大，很多国家超过 30% 的湿地已经被破坏<sup>[7]</sup>，自然湿地的生态服务功能退化明显。预测湿地未来生境状况，可以为湿地管理提供指导。目前不少学者对湿地生境状况评价方法做了研究<sup>[8-9]</sup>，这些方法都能够较好、准确的评价湿地生境状况好坏，然而这些方法都是野外评价方法，需要观测很多化学或者生物指标，评价过程复杂。此外，这些指标的历史数据可能没有监测，很难利用这些指标研究湿地的变化过程和趋势。通常湿地生境好坏与湿地面积成正比，生境较好时，湿地面积较大，可以用湿地面积粗略的表征湿地生境好坏，进而指导湿地管理决策的制定。

目前预测模型较多，可归纳为数理统计预测模型、人工智能预测模型以及混合预测模型三种，各有利弊<sup>[10]</sup>。如多元线性回归模型归属于数理统计方法，多适用于研究线性问题；人工智能预测一般需要长系列数据以及较长的训练时间<sup>[11]</sup>；混合预测方法预测精度也依赖与数据序列长短。这些方法在无法获得较长数据序列时，预测精度就无法满足。

灰色模型是华中理工大学邓聚龙教授在 1982 年创立的灰色系统理论，是一种研究少数据、贫信息、不确定性问题的新方法<sup>[12-13]</sup>。灰色模型自创立之来在很多领域都得到了应用<sup>[14]</sup>，列举如下：Bai C 和 Joseph Sarkis<sup>[15]</sup> 使用灰色系统模型选择供应商，Your xin L 等<sup>[16]</sup> 在能源消费预测上，使用灰色模型取得较好预测效果，在径流预测上，Trivedi H V 和 Singh J K<sup>[17]</sup> 灰色系统理论也取得了较好效果。

本文旨在探索预测湿地面积大小的方法，进而研究湿地生境变化趋势。然而只获得了 12 组湿地面积数据序列，数据序列较短，但是相关因素数据序列较长且容易获得，所以提出了运用灰色预测模型来预测湿地水面面积。影响湿地面积的相关因素之一选取了与湿地毗邻的河道年径流量，其中年径流量选定为流量大于某一流量阈值时的年来水总量，因为只有河道流量足够大时，才有可能补给沿岸的湿地。类似的相关因素在研究湿地的文献中没有选用过，需要在未来工作中进一步研究。

## 1 灰色模型理论

灰色系统的研究对象是“部分信息已知、部分信息未知”的“小样本”，通过对部分已知信息的生成、

开发，挖掘蕴藏在观测数据序列中的重要信息，实现对研究对象的正确认识。灰色模型理论一般假定数据序列为非负，对于预测模型，一般要求数据序列成指数形式或者通过预处理能转变为指数形式，灰色理论认为数据序列越光滑，越容易寻找一些规律，预测的效果越好。

### 1.1 灰色关联度分析模型

灰色关联度分析模型<sup>[18-19]</sup>是灰色理论的重要组成部分，它是通过灰色关联度大小来衡量自变量和因变量的相关程度，自变量与因变量变化态势一致性越强，关联度越大。其计算步骤如下。

#### (1) 数据预处理。

各因子数据序列需进行无量纲处理，本文采用均值化处理，即，各序列除以序列平均值。公式如下：

$$X_i^{\hat{e}(0)}(j) = \frac{X_i^{(0)}(j)}{X_i} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

$$X_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_i^{(0)}(j) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中： $X_i^{(0)}(j)$  为原始数据， $X_i^{\hat{e}(0)}(j)$  为预处理后的数据 ( $i$  为序列， $j$  为时刻)； $X_i$  为第  $i$  个数据序列均值。 $i = 1$  时为因变量数据序列， $i > 1$  时为自变量数据序列。

#### (2) 灰色关联系数与关联度。

$\gamma_{li}(j)$  为关联系数，定义如式 (3) 所示，其中  $\Delta(j)$ 、 $M$ 、 $m$  定义如式 (4)、式 (5) 所示，参数  $\epsilon$  一般取 0.5。

$$\gamma_{li}(j) = \frac{m + \epsilon M}{\Delta(j) + \epsilon M} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N; j = 1, 2, 3, \dots, n; 0 < \epsilon < 1 \quad (3)$$

$$\Delta(j) = |X_1^{\hat{e}(0)}(j) - X_i^{\hat{e}(0)}(j)| \quad (4)$$

$$M = \max_i \max_j \Delta(j), m = \min_i \min_j \Delta(j) \quad (5)$$

关联系数求其平均值即为关联度，且  $0 < \gamma_{li} \leq 1$ ，记  $\gamma_{li}$  为第  $i$  个自变量与因变量的关联度，即：

$$\gamma_{li} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{li}(j) \quad (6)$$

取与研究目标关联度值较大的因子为其相关因素。

### 1.2 灰色 GM(0, N) 模型

灰色 GM(u, v) 模型是灰色理论的重要组成部分，而 GM(0, N) 模型是 GM(u, v) 模型的一个重要形式之一，0 表示微分方程不含导数，为静态方程，N 表示模型变量的个数。它把研究目标和相关因子建立联系，通过容易获得的相关因子来预测研究目标。GM(0, N) 模型与多元回归模型有较多相似

之处, 同属多元离散模型, 但二者又有着本质性的差别, 多元回归模型直接输入原始数据序列, 而 GM(0, N) 建模则是对原始数据进行一次累加生成操作处理后进行建模, 以使数据序列更加平滑。GM(0, N) 模型具体介绍如下。

(1) 数据预处理。

一次累加生成操作, 能够使数据序列更加平滑, 更具有一致性, 减弱数据随机波动的影响, 使预测精度大大提高<sup>[18]</sup>。如公式(7)所示首先将各序列数据与个序列首数据做商, 对原始数据序列去量纲, 再进行公式(9)操作, 进行一次累加生成作用, 记  $X_i^{(0)}(j)$  为初值化后数据,  $X_i^{(0)}(j)$  为原始数据, 则:

$$X_i^{(0)}(j) = \frac{X_i^{(0)}(j)}{X_i^{(0)}(1)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

记 FAGO 序列为:

$$X_i^{(1)} = (X_i^{(1)}(1), X_i^{(1)}(2), X_i^{(1)}(3), \dots, X_i^{(1)}(k), \dots, X_i^{(1)}(n)) \quad (8)$$

其中:

$$X_i^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k X_i^{(0)}(j) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

(2) GM(0, N) 模型。

GM(0, N) 模型表达式为:

$$X_1^{(1)}(k) = a + b_2 X_2^{(1)}(k) + b_3 X_3^{(1)}(k) + \dots + b_N X_N^{(1)}(k) \quad (10)$$

记参数序列  $\hat{a} = [a, b_2, b_3, \dots, b_N]^T$  为上式中  $a, b_i$  组成,  $\hat{a}$  的最小二乘估计:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (11)$$

其中:  $B$  和  $Y$  分别为:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & X_2^{(1)}(2) & X_3^{(1)}(2) & \dots & X_N^{(1)}(2) \\ 1 & X_2^{(1)}(3) & X_3^{(1)}(3) & \dots & X_N^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_2^{(1)}(n) & X_3^{(1)}(n) & \dots & X_N^{(1)}(n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Y = [X_1^{(1)}(2), X_1^{(1)}(3), \dots, X_1^{(1)}(n)]^T \quad (13)$$

(3) 模型物理意义还原。

由于对模型进行了累加操作, 公式(14)累减作用可以恢复模型原始数据:

$$X_i^{(0)}(k+1) = X_i^{(1)}(k+1) - X_i^{(1)}(k) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (14)$$

为恢复模型原始物理意义将上式求得结果乘以  $X_i^{(0)}(1)$  即可获得模型预测值  $X_i^{(0)}(k)$ 。

1.3 修正的 GM(0, N) 模型

如果上述原始 GM(0, N) 模型残差检验不合格或者误差较大, 可以建立残差修正模型, 可有效提高预测精度。模拟数据与实测数据的差值即为残差,

记为  $\varepsilon(k)$ , 在下文有具体介绍。将  $\varepsilon(k)$  与自变量数据序列再次建立 GM(0, N) 模型。如果  $\varepsilon(k)$  序列某一数据小于零, 取  $b = \min\{\varepsilon(k)\}$ , 令  $\varepsilon'(k) = \varepsilon(k) + |b|$ , 即可将残差序列负值消除, 序列负值消除后再进行建模<sup>[20]</sup>, 即:

$$\varepsilon'(k) = a' + \sum_{i=1}^N b'_i X_i^{(1)}(k), k = 2, 3, \dots, n \quad (15)$$

预测结果还原物理意义即可, 记还原后结果为  $\varepsilon(k)$ , 则

$$X_i^{(0)}(k) = X_i^{(0)}(k) + \varepsilon(k) \quad (16)$$

1.4 精度检验

残差检验和后验差检验法常用来检验灰度预测模型可靠性<sup>[21]</sup>。记  $X_i^{(0)}$  为研究对象的实测序列,  $X_i^{(0)}$  为预测序列。

(1) 残差检验。

残差序列  $\varepsilon(k)$  为原始数据序列  $X_i^{(0)}$  与模拟序列  $X_i^{(0)}$  之差, 相对误差记为  $\Delta_k$ , 记平均相对误差为  $\Delta$ , 公式如下:

$$\Delta_k = \frac{|\varepsilon(k)|}{X_i^{(0)}(k)}, \Delta = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta_k \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (17)$$

检验标准见表 1。

表 1 残差检验标准

Tab. 1 The standards of residual test	
$\Delta$ (%)	模型精度
< 10	好
10~ < 20	合格
20~ < 50	勉强合格
$\geq 50$	不合格

(2) 后验差检验。

后验差检验是对残差概率进行检验, 记原始数据序列的方差为  $S_1^2$ , 残差序列的方差为  $S_2^2$ , 计算公式如下:

$$S_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_i^{(0)}(k) - X_i^0)^2 \quad (18)$$

其中,

$$X_i^0 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_i^{(0)}(k) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (19)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\varepsilon(k) - \overline{\varepsilon(k)})^2 \quad (20)$$

其中,

$$\overline{\varepsilon(k)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(k) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (21)$$

方差比  $C$  和小误差概率  $P$  定义如下:

$$C = S_2/S_1 \quad (22)$$

$$P = \text{Prof}\{| \varepsilon(k) - \overline{\varepsilon(k)} | < 0.6745 S_1\} \quad (23)$$

后验差检验标准见表 2。

表 2 后验差检验标准

Tab. 2 The standards of posterior variance test

模型精度等级	1 级 (好)	2 级 (合格)	3 级 (勉强合格)	4 级 (不合格)
$P$	$0.95 \leq P$	$0.80 \leq P < 0.95$	$0.70 \leq P < 0.80$	$P < 0.70$
$C$	$C \leq 0.35$	$0.35 < C \leq 0.5$	$0.5 < C \leq 0.65$	$0.65 < C$

## 2 模型应用

### 2.1 研究流域

嫩江是中国重要河流之一,流向由北向南,河道较长,干流中下游湿地分布广泛。支流洮儿河在下游汇入,洮儿河流向由西向东。莫莫格湿地位于嫩江和洮儿河交叉口附近,江桥水文站位于嫩江干流,察尔森水文站位于洮儿河上,位置见图 1。



图 1 莫莫格湿地位置示意图

Fig. 1 The location of Momoge wetland

研究区莫莫格湿地位于吉林省白城市镇赉县,经纬度坐标为  $45^{\circ}42'25''N - 46^{\circ}18'0''N$ ,  $123^{\circ}27'0''E - 124^{\circ}4'33''E$ ,保护区总面积  $1440 \text{ km}^2$ 。历史上莫莫格地区水资源丰富,星罗棋布的湖泡多达 54 个,嫩江流经本区  $111.5 \text{ km}$ ,流域面积达  $300 \text{ km}^2$ ,据 1961–2010 年江桥水文站统计,嫩江年均流量  $604.58 \text{ m}^3/\text{s}$ ;洮儿河流经本区  $60 \text{ km}$ ,流域面积达  $700 \text{ km}^2$ ,据 1961–2010 年察尔森水文站统计,洮儿河年均流量  $21.84 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

莫莫格地区社会经济落后,村屯共计 73 个,共有居民 3.9 万人,其中农业人口占绝大多数,农业收入占收入的 80%,剩余为牧业及其他收入,年均居民收入 1500~2000 元。保护区内主要的企事业单位有莫莫格林场、英台采油厂和望月滩渔场。

水源补给主要依赖于流经湿地附近的嫩江径流、洮儿河径流、降水、二龙涛河径流以及呼尔达河径流,近年来,随着二龙涛河上游水库的修建,以及连年干旱,二龙涛河及呼尔达河下游河干,无水进入湿地,莫莫格湿地湖泡水位下降,部分区域水干,湿

地面积大幅度萎缩,伴随着动植物种类、数量减少,生物多样性降低。农田开垦、过度放牧以及保护区内石油开采更加剧了莫莫格湿地生境的恶化。目前区域内主要的水利工程为引嫩入白工程,可为湿地提供常态补水,由白沙滩泵站自嫩江提水经输水总干渠,在三分干支渠处设置有进水闸,由该闸放水进入三分干,在三分干桩号 16+950 m 处右侧堤设置有水闸,通过该闸放水进入莫莫格湿地补水渠。

### 2.2 数据

本文首先从温度、降水、风速、蒸发、湿度、江桥流量、察尔森流量中,定性选择了降水、蒸发、江桥流量、察尔森流量作为模型的相关因素,其中,降水和蒸发变化趋势基本相同,建模时尽量选择从不同方面影响湿地面积变化的因素,所以建模时未选用蒸发因素。

通过分析莫莫格湿地形成原因,将初步选定莫莫格湿地年降水量、嫩江径流量、洮儿河径流量作为相关因子,依次标记为  $f_1, f_2, f_3$ 。然而河道流量较低时,河水不能出槽补给沿岸湿地,本文建模时选取了嫩江江桥水文站流量大于  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  时段的年径流量作为嫩江径流量。如表 3 所示,通过分析大于某一流量阈值的年径流量数据序列与湿地面积数据序列相关关系,发现当阈值选定为  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  时,二者相关关系最大。考虑到河道径流对湿地的补给作用也能影响到湿地面积后一年的大小,因此  $f_2$  数据序列取研究年份与前一年的平均值。同理,选定了洮儿河察尔森水文站流量大于  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  时段的年径流量作为洮儿河径流量,  $f_3$  数据序列亦取研究年份与前一年的平均值。

因素  $f_2, f_3$  中阈值确定方法:在两个因素数据序列中分别选取了 6 个流量值,统计了大于每个流量值的时段数,计算大于每个流量值的年来水量,然后分别计算来水量数据序列与湿地面积数据序列的相关系数,取相关系数较大的数据序列对应的流量值为选定的流量阈值,各系数见表 3。

表 3 河道来水与湿地面积数据序列相关系数

Tab. 3 The correlation coefficient between river flow and wetland area data sequences

江桥流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	600	700	800	900	1 000	1 100
相关系数 $r$	0.48	0.52	0.60	0.49	0.45	0.39
察尔森流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	10	20	30	40	45	50
相关系数 $r$	0.53	0.57	0.62	0.71	0.65	0.55

湿地面积数据选取了 1999–2013 年共 12 组数据(除 2008 年、2010 年和 2012 年外),数据为 land-sat 遥感图像通过处理后,经监督分类提取获得,所有遥感图像取自汛期过后。降水数据从 GLDAS 数

据产品提取后处理所得, 江桥及察尔森站点流量数据从松辽委水文局获得。

### 3 结果与讨论

数据介绍里定性确定了影响湿地水面面积的三个因素, 灰色关联度分析模型被用来量化这三个因素对湿地水面面积的影响程度。湿地水面面积与相关因素  $f_i (i=1, 2, 3)$  的关联度大小记为  $r_i$ , 根据灰色关联度模型计算步骤中式(1)至式(6), 取  $\epsilon=0.5$ , 计算得  $r_i (i=1, 2, 3)$  大小依次为 0.86, 0.73, 0.69。可以看出, 选定的 3 个相关因子与研究对象均有较大的关联性, 建模时均采纳。

#### (1) 湿地面积影响因子与湿地面积相关性分析。

年降水量因子与莫莫格湿地面积相关关系分析。降水直接影响湿地水域面积的大小, 是湿地生境好坏的决定性因素。降水量多, 湿地蒸散发水量亦增多, 蒸散发水量变大又导致湿地降水量增大, 莫莫格湿地面积与降水量有着密切关系。如图 2(a) 所示: 在一定范围内, 湿地面积与年降水量变化趋势相同, 有明显的正相关关系。

径流量因子与莫莫格湿地面积相关关系分析。河道湿地的形成发育一般是河道洪水泛滥的结果, 河水是该类型湿地获取水源的主要方式。莫莫格湿

地位于洮儿河与嫩江交汇处, 与二者关系密不可分, 莫莫格湿地生境好坏直接与二者水量充沛与否息息相关。汛期河道流量大时, 水位达到一定高度时, 河道直接漫滩进入湿地。从图 2 可以看出, 嫩江、洮儿河来水量在一定范围内与湿地面积呈正相关。

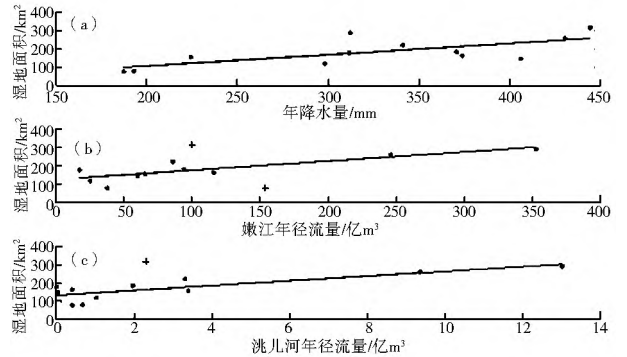


图 2 湿地面积影响因子与湿地面积相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between the three correlative factors and the water surface area of Momoge wetland

#### (2) 模型建立。

##### a. 初始模型。

为了研究不同因子组合时模型模拟效果, 分别选取两种相关因子 ( $N=3$ ), 共三种情况; 三种相关因子时 ( $N=4$ ) 共一种情况; 将四种情形分别建立了 GM(0, N) 预测模型, 建模结果及检验情况见表 4。

表 4 模型建立及检验结果

Tab. 4 The examination results of different models

模型	因子选取	模型简记	建立模型	平均相对误差 (%)	后验差
GM(0, 3)	$(f_1, f_2)$	GM <sub>1</sub>	$X^{(1)}(k) = 0.2735 + 0.4596X_2^{(1)}(k) + 0.2721X_3^{(1)}(k)$	19.6	$C=0.53, P=0.83$
	$(f_1, f_3)$	GM <sub>2</sub>	$X^{(1)}(k) = 0.3302 + 0.4989X_2^{(1)}(k) + 0.2808X_4^{(1)}(k)$	16.7	$C=0.48, P=0.83$
	$(f_2, f_3)$	GM <sub>3</sub>	$X^{(1)}(k) = -0.5638 + 1.2048X_2^{(1)}(k) + 1.0562X_4^{(1)}(k)$	56	$C=2.2, P=0.5$
GM(0, 4)	$(f_1, f_2, f_3)$	GM <sub>4</sub>	$X^{(1)}(k) = 0.2924 + 0.4501X_2^{(1)}(k) + 0.2859X_3^{(1)}(k) + 0.2374X_4^{(1)}(k)$	18.7	$C=0.51, P=0.83$

从表 4 可以看出: 由  $f_2, f_3$  相关因子与湿地面积序列建立模型, 模型平均相对误差最大, 模型检验结果不通过, 另外几种组合模型平均相对误差差别不大, 均在允许范围之内, 均能较好的模拟湿地面积, 可以看出由因子  $f_1, f_3$  组成的模型 GM<sub>2</sub> 平均相对误差最小, 为提高模型精度, 进一步改进了 GM<sub>2</sub> 模型。

##### b. 改进的 GM<sub>2</sub> 模型。

初始 GM<sub>2</sub> 模型为:

$$X^{(1)}(k) = 0.2735 + 0.4596X_2^{(1)}(k) + 0.2721X_3^{(1)}(k) \quad (24)$$

由上式模拟结果, 利用残差序列对初始 GM<sub>2</sub> 模型修正后为:

$$\hat{\epsilon}(k) = 1.6886 + 1.0229X_2^{(1)}(k) - 0.8942X_3^{(1)}(k) \quad (25)$$

改进后的模型平均相对误差 9.1%, 比初始模

型平均相对误差大大降低, 方差比  $C=0.304$ , 可知模拟结果波动性较小, 小误差概率  $P=1$ , 模型精度较好。预测模型模拟结果和实测数据做了对比, 见图 3。

##### c. 对比模型: 多元线性回归模型。

为了与灰色模型对比分析, 本节将  $f_1, f_3$  因子数据序列与湿地面积数据序列建立了多元线性回归模型, 公式如下:

$$y(k) = 52.359X_1^{(0)}(k) + 1037.97X_3^{(0)}(k) - 1727.15, \quad k=1, 2, 3, \dots, n \quad (26)$$

式中:  $y(k)$  表示时间序列中第  $k$  时刻湿地水面面积模拟值;  $X_1^{(0)}(k), X_3^{(0)}(k)$  分别表示  $f_1, f_3$  两因素原始数据序列。

##### d. 计算结果对比分析。

计算结果表明, 多元线性回归模型平均相对误

差 15.5%，略高于灰度预测模型，方差比  $C = 0.678$ ，检验不合格，小误差概率  $P = 0.917$ ，可以看出，多元线性回归模型模拟结果波动性较大，结果可靠性差，灰度预测模型效果更优。几种模型模拟结果对比，见图 3。

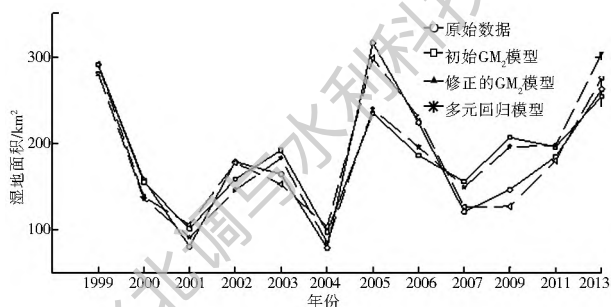


图 3 模拟结果比较

Fig. 3 Comparison of simulation results

### (3) $N$ 值的选取讨论。

以下用  $e_j$  表示由相关因素  $f_i, f_j$  建立的初始 GM(0, 3) 模型的平均相对误差， $e_{123}$  表示由相关因素  $f_1, f_2, f_3$  建立的初始 GM(0, 4) 模型的平均相对误差，由灰色关联度计算以及表 3 中四个模型检验结果可知，关联度  $r_1 > r_2 > r_3$ ，其中  $r_1$  远大于  $r_2$ ，但  $r_1, r_3$  相差不大。平均相对误差  $e_{13} < e_{12} < e_{123} < e_{23}$ ，前三个相差不大，但都远小于第四个。当相关因素  $f_1$  没被选用时，预测误差大大升高，表明选取  $N$  值时，要尽量选取和研究对象关联度较大的相关因素。理论上要尽量多选取能从不同方面影响研究对象大小的影响因子，然而有时并不代表  $N$  值越大越好，当  $N$  值较大时，由于数据序列较短，或者存在数据的不精确性，增大了模型误差。

### (4) 灰度模型典型误差分析。

模型模拟结果通过对比分析，GM<sub>2</sub> 模型初次建模时，2005 年湿地面积模拟数据模拟误差较大，预测值比实测值小了 82 km<sup>2</sup>，相对误差高达 25.9%，查阅了相关资料发现，莫莫格湿地在 2000 年后，气候持续干旱，降水量极少，毗邻的洮儿河也来水量极少，湿地面积大大萎缩，2004 年湿地水面面积仅有 78.2 km<sup>2</sup>，湿地资源衰退，生物多样性锐减，功能弱化，为了改善湿地生境状况，加强湿地保护，吉林政府采取了紧急补水措施对莫莫格湿地进行人工补水，2005 年湿地面积有所恢复，而灰度预测模型未将人工补水因素计入模型，这可能是导致模型预测结果相对误差较大的原因。

## 4 结论

本文根据灰色关联度模型，定量分析了相关因

素对研究对象的影响程度，然后建立了 GM(0, N) 模型，利用比较容易获得的相关因素变量，对湿地面积进行模拟。检验结果表明模拟效果较好，优于多元回归模型。在今后的工作中，对易得到的、数据序列较长的相关因素数据进行预测，再运用灰度预测模型预测出湿地面积，为湿地管理决策者提供湿地变化趋势信息，对湿地的补水管理有一定的指导意义。灰度 GM(0, N) 预测湿地面积模型不需要很长的数据序列，可以快速、方便的对湿地面积进行预测，相关方法可以运用到其他研究。

### 参考文献(References):

- [1] RICHARDSON C J. The role of wetlands in storage, release, and cycling of phosphorus on the landscape: a 25-year retrospective[J]. Phosphorus biogeochemistry in subtropical ecosystems, CRS Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 1999: 47-68.
- [2] 崔保山, 刘兴土. 湿地恢复研究综述[J]. 地球科学进展, 1999(4): 45-51. (CUI B S, LIU X T. Review of wetland restoration studies[J]. Advance in Earth Sciences, 1999(4): 45-51. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1007-8166.1999.04.008.
- [3] 杨永兴. 国际湿地科学研究进展和中国湿地科学研究优先领域与展望[J]. 地球科学进展, 2002(4): 508-514. (YANG Y X. New knowledge on the progress of international wetland science research and priority field and prospect of chinese wetland science research[J]. Advance in Earth Sciences, 2002(4): 508-514. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1007-8166.2002.04.008.
- [4] 张永泽, 王炬. 自然湿地生态恢复研究综述[J]. 生态学报, 2001(2): 309-314. (ZHANG Y Z, WANG X. A review of ecological restoration studies on natural wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001(2): 309-314. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2001.02.022.
- [5] 韩大勇, 杨永兴, 杨杨, 等. 湿地退化研究进展[J]. 生态学报, 2012(4): 289-303. (HAN D Y, YANG Y X, YANG Y, et al. Recent advances in wetland degradation research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012(4): 289-303. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201012011707.
- [6] 李益敏, 李卓卿. 国内外湿地研究进展与展望[J]. 云南地理环境研究, 2013(1): 36-43. (LI Y M, LI Z Q. Progress and prospect of research on wetlands at home and abroad[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2013(1): 36-43. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-8752.2013.01.007.
- [7] JUNK W J, AN S, FINLAYSON C M, et al. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis[J]. Aquatic Sciences, 2013, 75(1): 151-167. DOI: 10.1007/s00027-012-0278-z.
- [8] BRINSON M M, HAUER F R, LEE L C, et al. A guidebook for application of hydrogeomorphic assessments to riverine wetlands[R]. DTIC Document, 1995.
- [9] STEEDMAN R J. Modification and assessment of an index of biotic integrity to quantify stream quality in southern Ontario

- [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 1988, 45(3): 492-501. DOI: 10.1139/f88-059.
- [10] ZHANG G P. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model[J]. Neurocomputing, 2003, 50: 159-175. DOI: 10.1016/S0925-2312(01)00702-0.
- [11] JAIN A, Kumar A M. Hybrid neural network models for hydrologic time series forecasting[J]. Applied Soft Computing, 2007, 7(2): 585-592. DOI: 10.1016/j.asoc.2006.03.002.
- [12] 邓聚龙. 灰色系统理论简介[J]. 内蒙古电力, 1993(3): 51-52. (DENG J L. Introduction to the grey system theory[J]. Inner Mongolia Electric Power, 1993(3): 51-52. (in Chinese))
- [13] 刘思峰. 灰色系统理论的产生与发展[J]. 南京航空航天大学学报, 2004(2): 267-272. (LIU S F. Emergence and development of grey system theory and its forward trends[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004(2): 267-272. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-2615.2004.02.027.
- [14] LIU S, FORREST J, YANG Y. A brief introduction to grey systems theory[J]. Grey Systems: Theory and Application, 2012, 2(2): 89-104. DOI: 10.1109/GSIS.2011.6044018.
- [15] BAI C, SARKIS J. Integrating sustainability into supplier selection with grey system and rough set methodologies[J]. International Journal of Production Economics, 2010, 124(1): 252-264. DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.11.023.
- [16] LOU Y X, ZHUANG L T, CAI A H, et al. Grey GM(1, 1) model with function transfer method and application to energy consuming prediction[J]. Kybernetes, 2004, 33(2): 322-330.
- [17] TRIVEDI H V, SINGH J K. Application of grey system theory in the development of a runoff prediction model[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 521-526. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2005.09.005.
- [18] 刘思峰, 谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 第6版. 北京: 科学出版社, 2013: 217. (LIU S F, XIE N M. Grey system theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2013: 217. (in Chinese))
- [19] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013(8): 2041-2046. (LIU S F, CAI H, YANG Y J, et al. Advance in grey incidence analysis modeling[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013(8): 2041-2046. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-6788.2013.08.018.
- [20] 易德生, 郭萍. 灰色理论与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992. (YI D S, GUO P. Grey theory and method[M]. Beijing: Oil Industry Press, 1992. (in Chinese))
- [21] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中理工大学, 2002. (DENG J L. Grey forecasting and decision[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002. (in Chinese))

(上接第 80 页)

- [27] 苏毅, 杨延梅, 岳波, 等. 典型废矿物油的产生工艺及其重金属浓度特征[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(2): 106-113. (SU Y, YANG Y M, YUE B, et al. Study on generation processes of used mineral oil and their heavy metal concentration characteristics[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5(2): 106-113. (in Chinese))
- [28] 李霞, 张慧鸣, 徐霞, 等. 农田 Cd 和 Hg 污染的来源解析与风险评估研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1314-1320. (LI X, ZHANG H M, XU X, et al. Source apportionment and risk assessment of Cd and Hg pollution in farmland[J]. Journal of Agro Environment Science, 2016, 35(7): 1314-1320. (in Chinese))
- [29] 董灿. 我国人为源大气汞排放清单的分析研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015, 26-27. (DONG C. Anthropogenic atmospheric mercury emissions inventory and analysis in China[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015, 26-27. (in Chinese))
- [30] CHEN M, ZHENG Z H, FU D F, et al. Characteristics of Hg pollution in urban stormwater runoff in Nanjing city, China[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2014, 30(2): 158-163.
- [31] 李珊, 李洋, 梁汉东, 等. 北京城郊燃煤汞排放及其对当地空气环境的影响[J]. 环境科学研究, 2014, 27(12): 1420-1425. (LI S, LI Y, LIANG H D, et al. Atmospheric mercury emissions from domestic coal and impacts on local environment of Suburban Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(12): 1420-1425. (in Chinese))