

基于初值优化的灰色-马尔科夫 傍河水源可靠性分析

潘俊, 梁海涛, 马悦, 孟思翹

(沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 沈阳 110168)

摘要: 傍河水源取水可靠性论证需要对河流的径流量进行分析, 为提高河流径流量预测的准确性, 本文提出了基于初值优化的灰色-马尔科夫模型来预测河流流量状态的方法, 该方法分别将系列第一时刻的数据、最后时刻的数据以及前一时刻的数据作为初始条件, 对各预测结果进行了加权平均, 建立优化后的 GM(1,1) 模型, 再用马尔科夫模型对灰色预测结果进行修正。运用该模型对辽河的巨流河水文站 2000-2010 年 1 月和 2 月的径流量预测值与实际值进行对比, 预测精度较高。表明初值优化的灰色-马尔科夫模型预测方法可行, 其预测较准确。文中利用该模型预测了未来 10 年区段枯水期的河流径流量, 进而分析了区段内拟建傍河水源地取水的可靠性, 为拟建水源地取水工程的水资源论证提供了技术依据。

关键词: 灰色 GM(1,1); 初值优化; 马尔科夫链; 傍河水源; 可靠性分析

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)05-0062-04

Analysis of reliability of riverside water source of Grey-Markov based on optimization of initial value

PAN Jun, LIANG Haitao, MA Yue, MENG Siqiao

(School of Municipal and Environment Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The reliability demonstration analysis of intaking water from riverside water resource requires the analysis of river runoff. In order to enhance the accuracy of predicting runoff of the river, the paper proposed a method of predicting river runoff state by using grey-markov model based on initial value optimization. the method took series data of the first duration, data of the last duration and data before the last duration as the initial condition. The prediction results were weighted average. The optimized GM(1,1) model was established and the grey prediction results were modified by the markov model. The model was utilized to compare the runoff predicted results and runoff actual results of Juliu river hydrological station of Liaohe river from 2000 to 2010 in January and February, the prediction precision was high. It proved that the grey-markov model of initial value optimizing is feasible and the prediction is more accurate. The paper used the model to predict the dry river runoff in future 10 years and analyzed the reliability of water intake from a riverside water resource which will be constructed and provided the technical basis for the water resources argumentation of proposed water intaking engineering.

Key words: gray GM(1,1); optimization of initial value; markov chain; riverside water source; reliability analysis

1 研究背景

傍河开采地下水是地下水开发的一种重要开发模式^[1-3]。傍河水源地分布很广,我国约有 300 个

傍河地下水水源地^[4],北方许多城市供水水源地都属于这一类。傍河水源地利用袭夺河水原理^[5-6],激发河水对含水层的入渗补给,来补充地下水开采资源,同时利用含水层的过滤功能达到净化水质作

收稿日期:2015-04-10; 修回日期:2015-05-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41072190);环保公益性行业科研专项经费重大项目(201009009)

作者简介:潘俊(1962-),男,辽宁大连人,博士,教授,主要从事水文及水资源和环境影响评价研究。

用^[7-9],是地表水与地下水联合开发的一种主要模式之一^[10]。傍河型地下水水源地的论证目标在于地下水允许开采量,论证重点在于地下水与河水的联系程度以及水源地开采对河流的影响^[11]。我国汛期河川径流量占年径流的70% - 80%,如何确定合理的开采量,使得枯水期河川径流量能够满足傍河水源袭夺的河水量或者使得在枯水季节开采的地下水在丰水季节能够得到完全补充,这是傍河水源地地下水资源评价中的主要问题^[1]。所以在傍河水源地资源评价过程中常常要对开采过程中河流枯水期径流量进行预报和分析,进而来评价傍河水源地取水的可靠性^[12-13]。

众所周知,河川径流量为一随机变量,其影响因素众多复杂。径流量预测的研究方法总体上可归纳为传统线性分析方法,不确定性分析方法以及非线性分析方法,其中线性分析方法主要指以随机理论为基础的传统分析方法,不确定性分析方法有随机分析方法、模糊分析方法、灰色系统方法以及它们的耦合^[14]。灰色预测具有原理简单、算法简便、样本数量要求低、短期预测精度高等优点^[9],而GM(1,1)模型作为灰色预测理论的核心,被广泛应用,但是传统的GM(1,1)模型预测精度相对较差,因此有人提出优化初值来提高预测精度^[10]。该方法在遵循新信息优先的理论前提下,分别将第一个时刻的数据 $x(1)(1)$ 、最后时刻的数据 $x(1)(n)$ 以及前一个时刻的数据 $x(1)(k-1)$ 作为初始条件建立GM(1,1)模型,对3个预测结果进行了合理加权平均,得到了优化后的GM(1,1)模型。鉴于径流成因的复杂性,并且灰色预测对随机波动大的数据序列预测准确度低,用单一方法预测存在一定的局限性,而马尔科夫模型比较适合于随机波动性较大的预测问题,因此笔者在优化GM(1,1)模型的基础上,引入马尔科夫模型对灰色预测结果进行修正,建立了基于初值优化的灰色马尔科夫模型预测河川径流量未来的丰枯变化情况。并以辽河巨流河至毓宝台区段的新民玖龙纸业拟建傍河水源地为例,采用该模型对区段2010-2020年10年间枯水期(1月和2月)的径流量进行了预报,来分析辽河在1-2月份径流量对该水源的保证程度。根据资料2月份径流量普遍比1月小,因此本文仅计算2月份可靠性分析。通过利用模型计算的2000-2010年2月的径流量预测值与实际值误差对比,表明基于初值优化的灰色-马尔科夫模型预测可应用于傍河取水,从而为该水源取水工程水资源论证提供了技术

依据。

2 初始条件优化的灰色GM(1,1)-马尔科夫模型

2.1 初始条件优化的灰色GM(1,1)模型

根据文献[15],可知预测量的预测公式为:

$$\begin{aligned} x^{(0)}(k+1) &= x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k) \\ &= [x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}]e^{-ak}(1 - e^{-a}) \\ &\quad (k = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: a 为发展灰数; u 为内生控制灰数。

由(1)式可以看出,GM(1,1)模型的预测不仅与 u, a 值有关,还与初值的选取有关,因此如何选取初值至关重要。常用的初值选取方法有3种,分别为时间序列中最早值 $x^1(1)$ (模型1)、最近值 $x^1(k)$ (模型2)及其前一个时刻数据 $x^1(k-1)$ (模型3),将3种方法的初值带入(1)式,便可得出3种方法的预测值。3种初值选取方法预测公式具体见文献[15]:

为了全面考虑新旧信息对于预测结果的影响,将对3种不同初值方法模拟出来的结果进行加权,加权后作为模型4,不同方法的权重可以根据其预测结果准确度来确定。模型4的预测公式为:

$$\begin{cases} x^{(0)}(k)_4 = m_1 x^{(0)}(k)_1 + m_2 x^{(0)}(k)_2 + \\ \quad m_3 x^{(0)}(k)_3 \\ m_1 + m_2 + m_3 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 马尔科夫链修正优化灰色预测模型

马尔科夫链是一类特殊的随机过程,它最重要的特征就是“无后效性”,也就是要确定将来的状态,只需要知道它现在的状态就足够了,不需要对它以前的状态有所认识。因其预测的对象是一个随机变化的动态系统,且能缩小预测区间,因此不但可以反映系统各状态之间的内在规律,而且能较好的描述随机波动性较大的预测问题。因此,马尔科夫模型可以弥补灰色预测模型对随机波动大的数据序列预测准确度低的不足。

马尔科夫模型的基本定义及原理见文献[16]

2.3 建立灰色-马尔科夫模型进行可靠性研究的步骤

(1)根据多年实际数据,建立起灰色预测模型。

(2)实际值 $x^{(0)}(k)$ 预测结果 $\hat{x}^{(0)}(k)$ 相减得出残差值,进而求出相对残差值

$$\varepsilon_k = \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \times 100\% \quad (3)$$

(3)将相对残差值进行分级,以便于进行马尔科夫转移修正。因为研究区实际径流量数据波动较大,因此本文采用最优分级的方法按照相对误差值的大小进行分级,而未采用会弱化极值的平均值以及方差的方法进行分级。

(4)根据分级后的相对残差值计算出状态转移频数矩阵 M :

$$M = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $P_{ij} = f_{ij} / \sum_{j=1}^m f_{ij}$, f_{ij} 为第 i 状态经一步转移为第 j 状态的频数。

(5)根据马尔科夫转移状态修正灰色模型预测结果,修正值取变动区间的最小值,并对预测结果进行准确度检验和分析。

(6)根据修正后的结果进行未来水量预测,判断其可靠性。

3 实例分析

新民玖龙纸业项目拟在辽河新民段的巨流河大桥至毓宝台大桥区间的辽河漫滩区建立傍河水源地,拟取水量为 $4.0 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。通过建立数学模型并采用 Modflow 软件模拟分析了该水源取水量 $4.0 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 情况下,枯水期需要辽河流量为 $0.065 \text{ m}^3/\text{s}$,丰水期需要辽河流量为 $0.092 \text{ m}^3/\text{s}$ 。如果如文献^[11]的结论“一个稳定而理想的傍河型地下水水源地的开采补给量的组成应该以河水袭夺量为主导,而且河水袭夺量占该河径流总量的比例应该约束在 30% 以内”,则可以计算该河段辽河流量径流量至少要大于 $0.217 \text{ m}^3/\text{s}$ 即可保证该水源水量的可靠。

3.1 初值优化的灰色-马尔科夫修正预测结果

根据以上所述步骤,首先依据辽河巨流河水文站 1976-2000 年水文实测资料,计算出 $a = -0.052$, $u = 5.76$ 。因为 $a = -0.052$, 则该 GM(1, 1) 模型适用于中长期的模拟预测^[11]。具体分析步骤是:根据 1976-2000 年 2 月径流资料建立灰色预测模型,采用实测的 2001-2010 年 2 月径流资料进行模型验证,4 种不同灰色 GM(1, 1) 模型预测结果相对误差见表 1。

表 1 四种模型平均相对误差 %

模型类型	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
相对残差	53.50	53.31	64.65	50.24

然后进行马尔科夫模型的修正。根据辽河巨流河水文站 1976-2000 年水文实测资料的特点可以将序列划分为枯水年、偏枯水年、平水年、偏丰水年、丰水年 5 个状态,因此本文将 1976-2000 年相对残差值实际数据按照 5 级进行最优分级,1~5 级依次为: $[-253\%, -138\%]$, $[-138\%, -30\%]$, $[-30\%, -1\%]$, $[-1\%, 8\%]$, $[8\%, 61\%]$ 。

根据计算结果得出 2000 年相对误差处于第 2 级,根据数据进行状态转移,结果为下一年 2001 年 2 月份相对误差值处于 2 级,即 $[-138\%, -30\%]$,同理可以预测 2001-2010 年的相对误差的级别,然后再根据马尔科夫转移,一步概率转移矩阵如下:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.500 & 0.500 & 0 & 0 \\ 0.167 & 0.333 & 0.333 & 0 & 0.167 \\ 0 & 0.500 & 0 & 0.167 & 0.333 \\ 0 & 0.333 & 0 & 0 & 0.667 \\ 0.071 & 0.071 & 0.214 & 0.143 & 0.500 \end{bmatrix}$$

对 2001-2010 年的河水径流量进行修正,其结果见表 2。

表 2 马尔科夫模型修正结果

时间	实际值	模型 4	相对残	修正后	相对残
		预测结果	差/%	预测结果	差/%
2001	5.47	12.12	-121.61	7.21	-31.79
2002	6.82	11.46	-67.98	6.81	0.10
2003	3.12	12.02	-285.39	7.15	-129.19
2004	8.18	11.27	-37.73	6.70	18.09
2005	10.80	12.82	-18.71	7.62	29.40
2006	12.90	13.74	-6.49	8.17	36.67
2007	7.99	14.52	-81.75	8.64	-8.09
2008	13.50	13.46	0.26	8.01	40.69
2009	10.30	15.16	-47.16	9.01	12.49
2010	9.01	14.56	-61.60	8.66	3.89

经马尔科夫模型修正,2001-2010 年径流量预测平均相对误差值为 31.03%,由于模型 4 的 50.24%,可见经马尔科夫模型修正后,模型的预测精度有了很大提升,径流量的预测更加准确。

3.2 可靠性分析

对该地区取水可靠性分析,首先需采用上述方法进行径流量预测。根据已有的水文资料以 1976-2010 年的径流量数据为基础,建立灰色预测模型,得到 $a = -0.005$, $u = 8.87$ 。其中对该地区的 2011-2020 年径流量进行预测,且根据河水袭夺量占该河径流总量的比例应该约束在 30% 以内,计算允许袭夺河水量,为了保证水量充足,本次预测结果

采用最小值代替常用的平均值。

具体结果如表3:

表3 2011-2020年径流量预测结果 m^3/s

时间	预测结果	允许袭夺河水量
2011	7.44	2.23
2012	7.51	2.25
2013	7.57	2.27
2014	7.64	2.29
2015	7.71	2.31
2016	7.78	2.33
2017	7.85	2.36
2018	7.92	2.38
2019	8.00	2.40
2020	8.07	2.42

一个稳定而理想的傍河型地下水水源地的开采补给量的组成应该以河水袭夺量为主导,而且河水袭夺量占该河径流总量的比例应该约束在30%以内。

由上可知需要辽河渗漏量为 $0.217 \text{ m}^3/\text{s}$,而预测后渗漏量都大于 $0.217 \text{ m}^3/\text{s}$,保证率可达到100%,可以保证取水量,用水可靠。

3.3 模型预测分析

(1)4种模型中,模型3的预测准确率最差,说明以 $x^1(k-1)$ 作为初值,虽然也可以反映这种可能存在的规律,但是其预测更依赖于上一年12月份的观测值,而与上一年2月份的关联程度较小,因此对于前后数据依赖较小的预测,该方法的预测精度并不高。而模型2的准确率相对较高,因此将模型2赋予最高权重。

(2)为了全面考虑新旧信息对于径流量的影响,采用加权方法对3种初值方法进行加权处理,并根据以 $x^1(k)$ 为初值的模型2的预测结果较为准确而赋予最大权重值。加权后的预测结果准确率有所提升。且对于这种波动较大的数据,经过马尔科夫模型进行修正之后,其模拟预测值准确率有了很大提高。

4 结语

(1)将灰色系统GM(1,1)预测模型与马尔柯夫模型预测方法结合起来应用,为认识水文规律提供了一条新途径,其优点在于能充分利用历史数据给予的信息,弱化了这一循环系统有许多不确定因素干扰,从而拓宽了灰色系统预测与马尔柯夫模型预测的应用范围。

(2)针对灰色GM(1,1)模型对波动性数据序列

预测误差偏大的不足,引入马尔科夫模型对加权GM(1,1)模型的预测误差进行修正,提高了预测准确率。该方法可以应用于其他傍河取水的水源地用水可靠性预测研究。

(3)该方法应用于傍河取水的水源地取水可靠性评价问题中,是对于傍河取水可靠性研究的新尝试,经过与实际结果比对,其预测结果准确度较高,可信程度高。

参考文献:

- [1] 刘国东,丁晶. 傍河水源地地下水资源评价方法述评[J]. 水科学进展 1998,9(3):289-295.
- [2] 束龙仓,刘波,刘猛,等. 傍河水源地水位降落漏斗的扩展分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(1):6-9.
- [3] 韩再生. 傍河地下水水源地的若干问题[J]. 工程勘察,1996(4):24-26.
- [4] Wilson J L. Induced infiltration in aquifers with ambient flow[J]. Water Resources Research, 1993, 29(10):3503-3512.
- [5] 沈照理. 水文地质学[M]. 北京:科学出版社,1985:569-574.
- [6] 李金荣,李金玲,杨振放. 河流渗滤系统对硝态氮污水的净化作用研究[J]. 水文地质工程地质,2007,34(1):24-29.
- [7] Kuehn W, Muelier U. Riverbank filtration: an overview[J]. Journal-American Water Works Association,2000,92(12):60-69.
- [8] Ray C, Grischek T, Schubert J, et al. A perspective of riverbank filtration[J]. Journal-American Water Works Association,2002, 94(4):149-162.
- [9] 刘国义,周志祥,秦延军,等. 傍河取水水源地地下水资源评价及实例研究[J]. 安全与环境工程,2008,15(2):37-39.
- [10] 戴长雷,迟宝明,陈鸿雁. 傍河型地下水水源地论证[J]. 工程勘察,2005(2):26-28,32.
- [11] 潘俊,陈欣,孙才志. 年调节平原型水库与地下水联合调蓄分析[J]. 水文地质工程地质,2004,31(2):67-71.
- [12] 潘俊,骆阳,陈显利. 地表、地下水联合调蓄供水的风险性[J]. 中国给水排水,2004,20(11):49-51.
- [13] 王鑫,徐淑琴,李洪涛. 河川径流预测方法比较研究[J]. 中国农村水利水电,2014(4):98-100+104.
- [14] 何俊,刘会茹. GM(1,1)初始条件改进的研究及在预测中的应用[J]. 统计与决策,2013(17):76-77.
- [15] 李智超. 灰色马尔科夫模型在年降水量预测中的应用[J]. 人民黄河,2014,36(7):34-37.