

技术方法

DOI:10.3969/j.issn.0253-3626.2012.12.020

灰色模型在肺癌死亡率预测中的应用

周春磊¹, 周 敏²

(1. 重庆市疾病预防控制中心消毒与媒介生物控制所, 重庆 400042; 2. 自贡市疾病预防控制中心疾控科, 自贡 643000)

【摘 要】目的: 运用灰色模型(Grey model, GM)预测自贡市肺癌死亡率, 探索数据波动较大的情况下, 适用的 GM 预测方法。方法: 根据自贡市 1985–2009 年肺结核发病率数据分别建立常规灰色模型[Conventional GM(1, 1)], 动态灰色模型[Dynamic GM(1, 1)]和新陈代谢灰色模型[Metabolizing GM(1, 1)], 选择合适肺癌死亡率的预测模型并进行外推预测。结果: 检验性预测中, 常规 GM(1, 1)预测精度为 2 级, 动态 GM(1, 1)和新陈代谢 GM(1, 1)预测精度为 1 级, 预测值相对误差依次为 26.00%、5.07% 和 4.06%。采用新陈代谢 GM(1, 1)对自贡市肺癌死亡率进行外推预测, 2011–2014 年自贡市肺癌死亡率分别为 81.31/10 万、95.88/10 万、113.06/10 万、133.32/10 万。结论: 针对自贡市肺癌死亡率数据波动的情况, 采用新陈代谢 GM(1, 1)进行预测是比较适用的方法。

【关键词】灰色模型(1, 1); 灰色模型 GM(1, 1); 新陈代谢灰色模型(1, 1); 肺癌; 预测

【中国图书分类法分类号】R181.2

【文献标志码】A

【收稿日期】2011–12–15

Application of grey model in forecasting incidences of lung cancer

ZHOU Chunlei¹, ZHOU Min²

(1. Department of Media Biological Control and Disinfection, Chongqing Center for Disease Control and Prevention; 2. Department of Disease Control, Zigong Center for Disease Control and Prevention)

【Abstract】Objective: To apply the grey model (GM) in predicting the incidences of lung cancer in Zigong city and to explore the applicable predictive method with fluctuant data. Methods: The conventional GM(1, 1), dynamic GM(1, 1) and metabolic GM(1, 1) were established respectively based on the incidences of lung cancer in Zigong city from 1985–2009. The most applicable mortality forecasting model was applied to do the predication. Results: The results of the prediction showed that the predictive precision of the

作者介绍: 周春磊(1986–), 男,
研究方向: 传染病控制。

(21): 806–808.

Fan F, Lu Y Q. Determination of Lamivudine-resistant mutation of hepatitis B virus by realtime quantitative PCR and analysis of relationship between mutation and clinical indexes[J]. Chinese Journal of Biologicals, 2008, 9(21): 806–808.

[3] Shendure J, Mitra R D, Varma C, et al. Advanced sequencing technologies: methods and goals[J]. Nat Rev Genet, 2004, 5(5): 335–344.

[4] 徐保红, 李秀娟, 杨 芳, 等. PCR-焦磷酸测序法快速鉴定副溶血性弧菌[J]. 预防医学情报杂志, 2011, 27(1): 78–80.

Xu B H, Li X J, Yang F, et al. Detection of Vibrio parahaemolyticus by PCR and Pyrosequencing[J]. Journal of Preventive Medicine Information, 2011, 27(1): 78–80.

[5] 郑金梅, 赵龙凤, 杨 松, 等. 焦磷酸测序法在 HBV 阿德福韦酯耐药检测中的应用[J]. 解放军医学杂志, 2010, 35(10): 1199–1204.

Zheng J M, Zhao L F, Yang S, et al. Application of pyrosequencing in detection of HBV resistance to adefovir dipivoxil[J]. Medical Journal of Chinese People's Liberation Army, 2010, 35(10): 1199–1204.

[6] 倪红兵. 焦磷酸测序技术及其应用进展[J]. 国外医学·临床生物

化学与检验学分册, 2005, 26(9): 600–602.

Ni H B. Progress in pyrosequencing and its application[J]. Foreign Medical Sciences. Section of Clinical Biochemistry and Laboratory Medicine, 2005, 26(9): 600–602.

[7] 虞闰六, 任绪义, 王 敏. 乙肝病毒常见耐药位点突变高通量检测方法的建立与应用[J]. 实用检验医师杂志, 2010, 9(2): 137–142.

Yu R L, Ren X Y, Wang M. Establishment and application of a high-throughput method for detection of HBV drug resistant situs mutation[J]. Chinese Journal of Laboratory Pathologist, 2010, 9(2): 137–142.

[8] Punia P, Cane P, Teo C G, et al. Quantitation of hepatitis B lamivudine resistant mutants by realtime amplification refractory mutation system PCR[J]. J Hepatol, 2004, 40(6): 986–992.

[9] Yang Z J, Tu M Z, Liu J, et al. Comparison of amplicon sequencing, pyrosequencing and realtime PCR for detection of YMDD mutants in patients with chronic hepatitis B[J]. World J Gastroenterol, 2006, 12(44): 7192–7196.

(责任编辑: 关蕴良)

conventional GM(1,1) was the second grade and those of the metabolic GM(1,1) and dynamic GM(1,1) were the first grade. The relative error of the predictive value in three models was 26.00%, 5.07% and 4.06%. The metabolic GM(1,1) was applied to predict the mortality rate of lung cancer from 2011 to 2014 in Zigong city and the results were 81.31/100 000, 95.88/100 000, 113.06/100 000 and 133.32/100 000 respectively. **Conclusion:** The data of mortality in Zigong city is fluctuant, therefore, metabolic GM(1,1) is an applicable method for prediction.

【Key words】grey model(1,1); dynamic GM(1,1); metabolic GM(1,1); lung cancer; forecast

肺癌是最常见的肺原发性恶性肿瘤。近 50 年来,世界各国特别是工业发达国家,肺癌的发病率和病死率均迅速上升,死于癌症的男性病人中肺癌已居首位^[1]。我国由于飞速的工业化进程及烟草业迅猛发展,肺癌已经成为威胁人们健康的一大杀手。因此,掌握当前肺癌的死亡趋势与特征,推断其未来的变化趋向,可以为相关部门制定有针对性的防控措施提供科学依据。

本文采用灰色模型(Grey model, GM)对自贡市 1985–2009 年肺癌死亡资料进行统计分析。建立常规灰色模型[Conventional GM(1,1)], 新陈代谢灰色模型[Metabolizing GM(1,1)]和动态灰色模型[Dynamic GM(1,1)], 对肺癌死亡率数据进行灰色拟合, 旨在探索波动幅度较大的数据的 GM 预测方法, 并选取误差最小的一种方法对自贡市 2011–2014 年肺癌死亡率进行预测。

1 资料与方法

1.1 资料来源

肺癌死亡资料来自居民病伤死亡报告监测网络。将各医院报告的死亡医学证明书经调查核实均为根本死因后 7 d 内逐级上报市疾病预防控制中心, 对于死亡原因填写不全或不明者, 由区疾病预防控制中心生命统计医师向治疗单位进行病史核查或入户调查, 按照 ICD-9 标准(2003 年以后采用 ICD-10 标准)进行死因分类, 按卫生部统一报表要求整理分析。自贡市从 1985 年起开展死因统计以来, 有较完整的死因调查报告网和较严密的死因调查、审核制度, 数据的质量保证体系完整, 资料可靠。有关人口统计数据来源于自贡市统计部门。

1.2 描述性研究

对肺癌死亡率进行不同人群的流行病学描述, 分析肺癌死亡率的流行病学分布特征, 包括肺癌死亡率的时间趋势和肺癌死亡患者的人群分布。

1.3 灰色系统模型建立方法

根据 1985–2009 年自贡市肺癌死亡率数据, 分别建立常规 GM(1,1), k 维动态 GM(1,1) 和 k 维的新陈代谢肺癌死亡

率的预测模型。选择其中精度最高, 预测值最接近实际的模型, 作为自贡市肺癌死亡率的预测模型, 并进行外推预测。经过计算, 本次研究选择建立常规 GM(1,1), 7 维动态 GM(1,1) 和 7 维的新陈代谢肺癌死亡率的预测模型。

1.3.1 常规的 GM(1,1) 模型 设 $x^{(0)}$ 为原始序列, 有

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

对 $x^{(0)}$ 进行一次累加生成, 即 1-AGO, 得到生成序列:

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

$$\text{其中, } x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n。$$

由 $x^{(1)}$ 构造背景值序列, $Z^{(1)} = z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)$

$$\text{其中, } z^{(1)}(n) = \frac{1}{2} (x^{(1)}(k-1) + x^{(1)}(k)), k=2, 3, \dots, n。$$

得到 GM: $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$ 的白化方程(影子方程):

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

(a, b) 为 GM(1,1) 模型一级参数包, 表示为向量或序列, 即

$$P_1 = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad P_1 = (a, b),$$

根据最小二乘准则, 参数列矩阵算式如下:

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad Y_N = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix},$$

GM(1,1) 模型的时间响应函数为: $\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak} + \frac{b}{a}, k=1, 2, \dots, n。$

预测值时间响应函数为:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) = (1-e^a)(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-ak}$$

1.3.2 新陈代谢 GM(1,1) 模型和动态 GM(1,1) 模型 由原始序列 $X^{(0)} = x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)$ 建立 GM(1,1) 模型, 得预测值 $x^{(0)}(n+1)$, 将最新信息 $x^{(0)}(n+1)$ 加入序列并去掉信息 $x^{(0)}(1)$ 。由 $X^{(0)} = x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n+1)$ 建立的 GM(1,1) 模型为新陈代谢 GM(1,1) 模型。

在实际建模中, 原始序列的数据不一定全部用来建模。选择不同长度(维度)序列建模, 能够得到不同预测值^[2]。因此, 有必要首先建立不同长度的 GM(1,1) 模型, 从中选取适当维

数的新陈代谢 GM(1,1)模型进行预测^[9]。

通常建模会将最新的数据作为建模序列的右端点,即“原点”。以“原点”为基础,在满足 GM 建模需要的最小长度序列基础上^[9],建立不同维数的 GM(1,1)模型,称之为动态 GM(1,1)模型^[9]。在动态 GM(1,1)模型中,选择模型精度最高的 k 维动态 GM(1,1)模型($k=5,6,\cdots,n$)作为基础模型,建立 k 维的新陈代谢 GM(1,1)模型^[3,5]。

1.3.3 预测效果评价(精度检验) GM(1,1)模型的拟合精度,通常由平均相对误差,后验差比值(C 值)和小误差频率(P 值)等指标的大小来判定。

残差: $q^{(k)}=x^{(0)}(k)-\hat{x}^{(0)}(k)$

相对误差: $\varepsilon(k)=\frac{q^{(k)}}{x^{(0)}(k)}\times 100\%=\frac{x^{(0)}(k)-\hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)}\times 100\%$

平均相对误差: $\varepsilon(avg)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n|\varepsilon(k)|$

精度 $p^0=(1-\varepsilon(avg))\times 100\%$

后验差比值: $C=S_2/S_1$,其中:

$S_1^2=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n(x^{(0)}(k)-\bar{x})^2$ $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^nx^{(0)}(k)$,

$S_2^2=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n'}(q^{(k)}-\bar{q})^2$ $\bar{q}=\frac{1}{n'}\sum_{k=1}^{n'}q^{(k)};n'<n$

小误差频率: $P=P\{|q^{(k)}-\bar{q}|<0.674\ 5S_1\}$

模型精度分类见表 1,模型精度级别= $\max\{C$ 所属等级; P 所属等级}。

1.4 软件选用

上述计算均在 EXCEL2003 软件上实现。

表 1 模型精度检验分类

Tab.1 Classification of the predicative precision of the models		
模型精度等级	C 值	P 值
1 级(好)	0.35	0.95
2 级(合格)	0.50	0.80
3 级(勉强)	0.65	0.70
4 级(不合格)	0.80	0.60

2 结 果

2.1 肺癌死亡率的时间趋势

自贡市 1985 年肺癌死亡率为 9.48/10 万,至 2008 年达到 49.82/10 万,上升了 4.25 倍。1995 年肺癌死亡率最低,为 8.08/10 万;2008 年最高,为 49.82/10 万,死亡率呈现上升趋势,根据年均增长公式(n 年数据的增长率= $[(\text{本期}/\text{前 } n \text{ 年})^{1/(n-1)}-1]\times 100\%$),自贡市肺癌死亡率的年均增长率为 7.48%。1985-2009 年男、女性肺癌累计死亡率分别为 33.40/10 万、9.89/10 万,总累计死亡率为 20.79/10 万。

2.2 肺癌死亡患者的人群分布

1985-2008 年自贡市因肺癌死亡的男性为 12 687 例,累计死亡率为 33.40/10 万,女性为 4 340 例,累计死亡率为 9.89/10 万,男性高于女性,男女累计死亡率之比为 3.38:1,其中男性年均增长率为 8.19%,女性年均增长率为 6.40%。从年龄结构分析,肺癌累计死亡率随年龄增长而升高,由 40 岁起呈明显上升,45 岁开始加速上升,至 65 岁年龄组达到高峰,男女上升趋势比较一致。见表 2。

表 2 1985-2008 年自贡市肺癌死亡患者年龄别、性别累计死亡率

Tab.2 Age, sex and accumulative mortality of patients died from lung cancer from 1985 to 2008 in Zigong city									
年龄组 (岁)	男性			女性			合计		
	人口数	死亡数	死亡率 (1/10万)	人口数	死亡数	死亡率 (1/10万)	人口数	死亡数	死亡率 (1/10万)
<5	6 663 328 163	3	0.090	3 023 613	1	0.033	6 351 776	4	0.063
5~9	2 705 959	0	0	2 561 527	1	0.039	5 267 486	1	0.019
10~14	2 932 340	1	0.034	2 773 138	0	0	5 705 478	1	0.018
15~19	4 688 343	7	0.149	4 526 797	1	0.022	9 215 140	8	0.087
20~24	4 230 512	25	0.591	4 176 278	8	0.192	8 406 790	33	0.393
25~29	3 165 127	50	1.580	2 942 720	21	0.714	6 107 847	71	1.162
30~34	2 868 200	133	4.637	2 491 097	51	2.047	5 359 297	184	3.433
35~39	3 365 279	253	7.518	3 074 467	96	3.123	6 439 746	349	5.420
40~44	2 440 937	471	19.296	2 119 857	173	8.161	4 560 794	644	14.120
45~49	1 933 657	837	43.286	1 693 928	246	14.523	3 627 585	1 083	29.855
50~54	1 760 778	1 239	70.367	1 539 939	374	24.287	3 300 717	1 613	48.868
55~59	1 517 465	1 692	111.502	1 348 516	463	34.334	2 865 981	2 155	75.192
60~64	1 231 215	2 093	169.995	1 154 782	594	51.438	2 385 997	2 687	112.615
65~69	854 198	1 925	225.358	889 650	657	73.849	1 743 848	2 582	148.063
70~74	522 547	1 794	343.318	5 574 889	631	11.319	6 097 436	2 425	39.771
75~	438 948	2 164	492.997	4 000 485	1 023	25.572	4 439 433	3 187	71.789
合计	37 983 668	12 687	33.401	43 891 684	4 340	9.888	81 875 352	17 027	20.796

2.3 肺癌死亡率预测模型的建立

2.3.1 检验性预测 以 2008 年自贡市肺癌死亡率数据为原点,分别建立常规 GM(1,1)模型, k 维动态 GM(1,1)模型和 k 维新陈代谢 GM(1,1)模型。对 2009 年该市肺癌死亡率 (59.00/10 万) 进行检验性预测,比较 3 种模型预测准确性。

2.3.1.1 常规 GM(1,1)预测模型 对 1985–2008 年肺癌死亡率数据建立常规 GM(1,1)模型 (图 1),其时间响应函数为:

$$x^{(1)}(k+1) = -88.848 \ 91e^{0.078 \ 2k} - 79.367, k=1, 2, \dots, n_0 \text{ (模型 M1)}$$

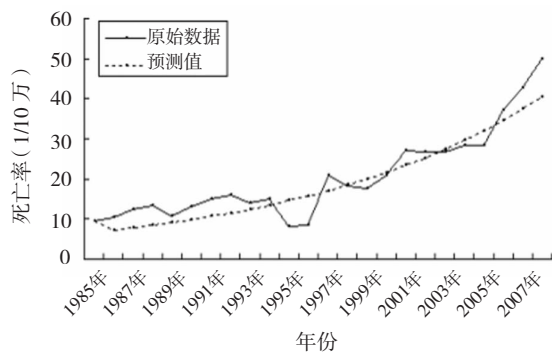


图 1 常规 GM(1,1)(模型 M1)预测曲线

Fig.1 Predictive cure of conventional GM(1,1) model(model M1)

2.3.1.2 K 维动态动态 GM(1,1)模型 以 2008 年数据为原点,建立不同维度的动态 GM(1,1)模型,比较各个模型的预测精度,本文中均采用残差检验,根据平均相对误差大小确定 k 值 (图 2)。

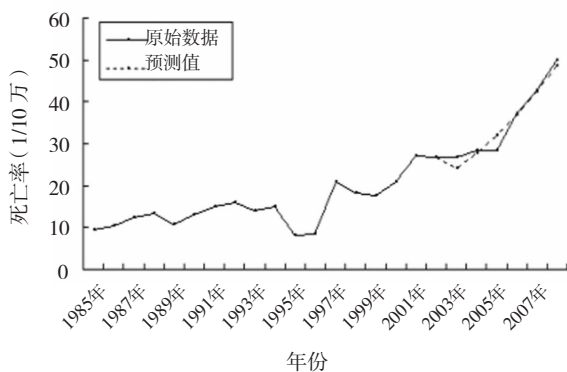


图 2 K 维动态 GM(1,1)(模型 M2)预测曲线($k=7$)

Fig.2 Predictive curve of dynamic GM(1,1) (model M2) ($k=7$)

当 $k=7$ 时,由序列 $X^{(0)} = [26.76, 26.89, 28.33, 28.42, 37.02, 42.66, 49.82]$,构建的动态 GM(1,1)模型平均相对误差最小。模型的时间响应函数为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 161.564 \ 1e^{0.139 \ 7k} - 134.805, k=1, 2, \dots, n_0 \text{ (模型 M2)}$$

2.3.1.3 新陈代谢 GM(1,1)模型 将模型 2 中 2009 年肺癌死亡率预测值为 56.01/10 万,即 $x^{(0)}(n+1)$ 。将 $x^{(0)}(n+1)$ 纳

入 7 维序列 $x^{(0)}$ 并去掉 $x^{(0)}(1)=26.76$,保持维数 $k=7$ 不变,构建新的 7 维序列:

$X^{(0')} = [26.89, 28.33, 28.42, 37.02, 42.66, 49.82, 56.01]$ 。对序列 $X^{(0')}$ 建立常规 GM(1,1)模型 (图 3),即新陈代谢 GM(1,1)模型,其时间响应函数为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 167.663 \ 6e^{0.148 \ 8k} - 140.776, k=1, 2, \dots, n_0 \text{ (模型 M3)}$$

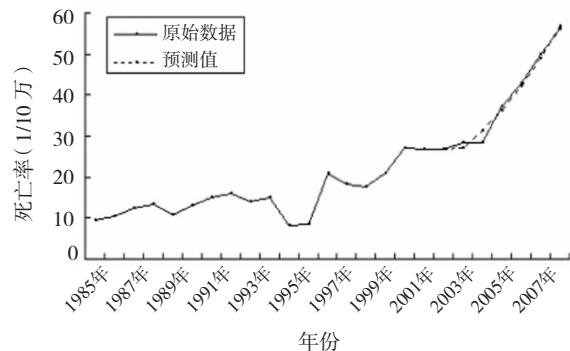


图 3 新陈代谢 GM(1,1)(模型 M3)预测曲线($k=7$)

Fig.3 The predictio curve of Dynamic GM(1,1) ($k=7$)

2.3.1.4 3 种模型的预测准确性比较 如表 3 所示,3 个模型中 M2 和 M3 预测精度均为 1 级, M1 为 2 级,7 维新陈代谢态 GM(1,1) (模型 M3) 后验差比值低于 7 维动态 GM(1,1) (模型 M2) 和常规 GM(1,1) (模型 M1)。

表 3 模型 M1、模型 M2 和模型 M3 预测精度的比较

Tab.3 Comparison on predictive precision among model M1, M2 and M3

模型	后验差 比值	小误差 频率	2009 年预测 值(1/10 万)	2009 年实际 值(1/10 万)	残差	相对 误差
M1	0.350	0.833	43.66	59.00	15.31	26.00%
M2	0.222	1	56.01	59.00	2.99	5.07%
M3	0.137	1	56.61	59.00	2.39	4.06%

因此在预测自贡市 2009 年肺癌死亡率的准确性上,模型 M3 的预测值相对误差低于模型 M1 和模型 M2,而模型 M1 相对误差最大。根据结果,将 7 维新陈代谢 GM(1,1) 作为该市肺癌发病率预测模型。

2.3.2 建立自贡市 2009 年以后的肺癌死亡率预测模型 以 2009 年数据为原点,序列 $X_1^{(0)} = [26.89, 28.33, 28.42, 37.02, 42.66, 49.82, 59.00]$ 建立 7 维的新陈代谢 GM(1,1) 模型,其时间响应函数为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 152.192 \ 5e^{0.159 \ 6k} - 125.305, k=1, 2, \dots, n_0$$

模型 M3 中 2010 年肺结核发病率预测值为 68.62/10 万,即 $x^{(0)}(n+1)$,纳入序列 $X_1^{(0')}$ 并去掉 $X_1^{(0')} = 26.89$,保持维数 $k=7$ 不变,构建新的 7 维序列 $X_1^{(0)}(1) = [28.33, 28.42, 37.02, 42.66, 49.82, 59.00, 68.62]$ 根据 $X_1^{(0)}$ 建立常规 GM(1,1) 模型,即新陈代谢 GM(1,1) 模型,其时间响应函数为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 168.85e^{0.164 \ 8k} - 140.52, k=1, 2, \dots, n_0 \text{ (模型 M4)}$$

模型 M4 中,2010 年肺结核发病率预测值为:68.96/10 万。

2.4 肺癌死亡率外推预测

用预测精度为 1 级的 7 维新陈代谢 GM(1,1)模型对自贡市 2011–2014 年肺结核发病率进行短期预测,外推预测显示,该市 2011–2014 年肺癌死亡率分别为 81.31/10 万、95.88/10 万、113.06/10 万、133.32/10 万,呈现略微增长的发展趋势。

3 讨论

诞生于 20 世纪 80 年代的灰色系统理论,以“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象。GM 是在灰色系统理论中核心的模型体系。其中,单变量一阶线性微分方程模型 GM(1,1)是应用最为广泛的预测模型,其具有微分、差分、指数兼容等性质,突破了一般模型要求数据多、一般得不到“微分”性质的局限^[6]。动态 GM(1,1)和新陈代谢 GM(1,1)是常规 GM(1,1)的一种优化形式,它在继承了常规 GM(1,1)的优点的基础上更好的考虑了那些随着时间的推移,不断进入系统的随机扰动或者驱动因素对系统的影响^[3]。因而,相对于常规 GM(1,1),能够更好的反映系统将来的发展趋势。

新陈代谢 GM(1,1)除了具有 GM 计算简单、所需数据少、无需先验信息等特点外,还因为它不断更新建模数据,去除陈旧数据,使得预测精度得以提高,预测值比常规 GM(1,1)更接近于实际值。但新陈代谢 GM(1,1)的局限性在于,它适用于具有较强指数规律的序列,只能描述相对单调的变化过程^[3]。由于本次使用的肺癌死亡率资料波动性较大,尤其 1995–1996 年数据出现突然减小,因此最后得到的常规 GM(1,1)预测精度较低。新陈代谢后的 GM(1,1),预测的准确性明显得到了提高。在原点数据由 2009 年死亡率变为 2010 年死亡率时,所建立的两个 7 维动态 GM(1,1)模型 M3 和 M4。M4 建模序列实际上是以 M3 建模序列为基础,将纳入

序列的最新信息即 2010 年肺癌死亡率的预测值为原点,进行新陈代谢而成。因此,模型 M4 是基于新陈代谢的动态 GM(1,1)^[7]。M3 与 M4 进行比较可以发现,新陈代谢后的 GM(1,1),预测的准确性明显得到了提高。随时将最新数据的纳入到建模序列中来是保障所建模型预测准确性的重要措施。

参 考 文 献

- [1] 沈洪兵,俞顺章.我国肺癌流行现状及其预防对策[J].中国肿瘤,2004,13(5):283–285.
Shen H B, Yu S Z. Epidemiological status of lung cancer in China and strategies for prevention[J]. China Cancer, 2004, 13(5): 283–285.
- [2] 尹逊震.灰色模型的改进及其应用[D].南京信息工程大学,2007.
Yin X Z. The improvement of the grey model and its application[D]. Nanjing University of Information Science & Technology, 2007.
- [3] 白先春,李炳俊.基于新陈代谢 GM(1,1)模型的我国人口城市化水平分析[J].统计与决策,2006,5(5):40–41.
Bai X C, Li B J. The analysis of China's population urbanization level based on metabolizing GM(1,1) model[J]. Statistics and Decision, 2006, 5(5): 40–41.
- [4] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中科技大学出版社,1990:200–212.
Dng J L. The theory tutorial of grey system[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology (HUST) Press, 1990: 200–212.
- [5] 冯伟,赵利平,王佳,等.优化的新陈代谢 GM(1,1)模型在港口吞吐量预测中的应用[J].水道港口,2008,24(4):301–304.
Feng W, Zhao L P, Wang J, et al. Application of optimized metabolizing GM(1,1) in forecasting the incidence of port throughput[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2008, 24(4): 301–304.
- [6] 肖新平,宋中民,李峰.灰技术基础及其应用[M].北京:科学出版社,2005:45–47.
Xiao X P, Song Z M, Li F. Foundation and application of grey technology[M]. Beijing: Science Press, 2005: 45–47.
- [7] 李涛,花向红,刘金标,等.基于新陈代谢的动态灰色模型及其应用[J].城市勘测,2008,3(4):135–137.
Li T, Hua X H, Liu J B, et al. The dynamic grey model on the basis of metabolism and its application[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2008, 3(4): 135–137.

(责任编辑:关蕴良)