

## ·论 著·

## 灰色模型预测深圳市售粮食镉含量并评估人群暴露水平

王舟, 黄薇, 潘柳波, 吴晓敏, 罗贤如

**摘要:**目的 建立深圳市未来4年市售粮食中镉含量预测数学模型,评估人群暴露水平,以了解其可能风险。方法 运用2004~2011年深圳市食品安全风险监测粮食中镉含量数据,对深圳市未来4年市售粮食中镉含量应用灰色预测模型进行预测,与深圳市膳食调查人群粮食消费量相结合,评估人群镉暴露水平。结果 灰色预测显示2012~2015年深圳市售粮食镉含量以及人群粮食镉暴露量均呈上升趋势,每人每天镉的平均暴露量占PTDI值的0.64%~32.91%。结论 虽然深圳市民每人每日镉暴露量未超过PTDI值,但是呈明显上升趋势,所以深圳市居民通过粮食摄入镉仍然存在一定风险。

**关键词:** 镉;污染趋势;灰色预测模型;人群暴露水平

中图分类号 R155.5 文献标识码 A 文章编号 1009-9727(2012)11-1313-04

Predicting the cadmium contents in grains and evaluate crowd exposure level in people of Shenzhen by Gray forecasting model. WANG Zhou, HUANG Wei, PAN Liu-bo, et al. (Shenzhen Center for Disease Control and Prevention, Guangdong Shenzhen 518055)

**Abstract:** Objective To establish the anticipation mathematical model to predict the cadmium contents of grains for the coming 4 years in Shenzhen, and evaluate crowd exposure level to understand its possible risk. **Methods** According to the data of cadmium contents of grains from Shenzhen food safety monitoring in 2004~2011 years, gray forecasting model the consumption of grains of denizen in Shenzhen was applied to predict the cadmium contents of grains for the coming 4 years, and to evaluate the exposure level of crowd. **Result** The gray forecasting model displayed that cadmium contents of grains of 2012~2015 years and crowd exposure quantity presented ascend trend. Each cadmium exposure accounted for PTDI 0.64~32.91%. **Conclusion** Although the daily cadmium exposure did not exceed the value of PTDI, but showed an upward trend, so the residents in Shenzhen City through the food intake of cadmium exist risks.

**Key words:** Cadmium, Pollution status, Gray forecasting model, Crowd exposure level

人体内的镉主要来自食用受镉污染的食品,镉具有蓄积性毒物,一般环境中镉的含量较低,但通过食物链富集后镉含量可达到相当高的浓度。人体通过食物摄入镉之后,可长期蓄积在心、肾、肺等器官,由于镉排泄缓慢,对肾脏可产生慢性损害<sup>[1]</sup>。2010年6月8~17日,国际粮农组织和世界卫生组织(FAO/WHO)专家委员会在日内瓦召开的73次会议上,将镉的耐受量改为暂定每月耐受摄入量(PTMI)为0.025mg/kg.bw,比原制定的指标更加严格。本文利用2004~2011年深圳市食品安全风险监测粮食中镉含量数据,对未来4年深圳市售粮食镉含量进行预测,与本市居民膳食调查每人每日粮食消费量相结合,得出人群通过食用粮食的镉暴露量,对其风险进行评估,以预测其污染趋势以及对人体的危害。

## 1 材料和方法

1.1 样品 2004~2011年深圳市食品安全风险监测粮食类食品中镉含量数据。

1.2 数据处理<sup>[2]</sup> 对于数据中的未检出数据采用检出下界的1/2填充,那么镉含量的均值计算就可以修正为:均值=大于检出下界的镉含量均值×检出率+

检出下界 $\times 1/2 \times (1 - \text{检出率})$ 。

1.3 预测方法 运用DPS数据处理系统中的灰色模型进行计算。

### 1.4 人群镉暴露量计算及评估

1.4.1 暴露量的计算<sup>[3]</sup> 粮食中镉的平均暴露量=每人每日粮食消费量 $\times$ 粮食中镉的平均检测值。

1.4.2 食物消费量 采用2008年深圳市居民户膳食调查中每人每日粮食消费量数据<sup>[4]</sup>。

1.4.3 膳食暴露量评估 FAO/WHO专家委员会将镉的耐受量暂定每月耐受摄入量(PTMI)为0.025mg/kg.bw。城市居民体重统一按60kg计算,折算后相当于每人每日允许摄入量(PTDI)为50.00 $\mu$ g。

1.5 灰色预测模型 人们将部分信息已知,部分信息未知的系统称为灰色系统。无规的离散时空数列是潜在的,是有规序列的一种表现,通过生成变换可将无规序列变成可以满足灰色建模条件的有规序列。所以,灰色系统理论建模实际上是对生成数列的建模<sup>[5]</sup>。

以2004年为第1年,2005年为第2年,依次类推,这样就得到了时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

作者单位 深圳市疾病预防控制中心 广东 深圳 518020

作者简介 王舟(1977~),女,硕士,副主任医师,主要从事营养与食品卫生工作。

1.5.1 GM(1,1)模型<sup>[6]</sup> 设给定原始时间序列 $x^{(0)}(t)$ 有 $n$ 个观测值 $x^{(0)}(t)=\{x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\dots,x^{(0)}(n)\}$ ,GM(1,1)模型计算步骤如下:

1)数据处理 将原始数列 $x^{(0)}(t)$ 做累加生成,即

$$x^{(1)}(t)=\sum_{i=1}^t x^{(0)}(i), t=1,2,\dots,n, \text{ 得到一个新序列 } x^{(1)}(t)=\{x^{(1)}(1),x^{(1)}(2),\dots,x^{(1)}(n)\}$$

2)GM(1,1)模型的动态微分方程式: $\frac{dx^{(1)}}{dt}+ax(1)=\mu$

$\mu$ , 公式中 $a$ 是发展灰数, $\mu$ 是内生控制灰数;

3)形成数据矩阵 $B$ 与数列 $Y_n$ . 设 $\hat{a}$ 为待估参数向量,

$\hat{a}=\begin{bmatrix} a \\ \mu \end{bmatrix}$  利用最小二乘法求解得 $\hat{a}=(B^T B)^{-1} B^T Y_n$ , 其中

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

$$Y_n=[x^{(0)}(2),x^{(0)}(3),\dots,x^{(0)}(n)]^T$$

4)建立时间响应模型: $\hat{x}^{(1)}(t)=(x^{(0)}(1)-\frac{\mu}{a})e^{-at}+\frac{\mu}{a}$ ;

5)将时间响应离散化: $\hat{x}^{(1)}(k+1)=(x^{(0)}(1)-\frac{\mu}{a})e^{-ak}+\frac{\mu}{a}$ ;

$$\frac{\mu}{a};$$

6)将 $k$ 值代入离散模型计算预测累加值 $\hat{x}^{(1)}(t)$ ;

7)将预测的累加值还原成预测值: $\hat{x}^{(0)}(k)=\hat{x}^{(1)}(k)-\hat{x}^{(1)}(k-1)$ ;

8)模型检验

9)当 $t=N,N+1,\dots,N+q+1$ 即可得到 $q$ 步预测。

1.5.2 GM(1,1)预测模型检验 灰色理论建模,一般是采用残差检验和后验差检验。所谓残差检验,是一种直观检验、也可以称为算术检验,是模型精度按点的检验;后验差检验属于统计检验,是根据残差的概率分布进行的检验。

1)残差检验

按预测模型进行计算 $\hat{x}^{(1)}(t)$ ,进行累减生成 $\hat{x}^{(0)}(t)$ ,然后计算原始序列 $x^{(0)}(t)$ 与 $\hat{x}^{(0)}(t)$ 的残差序列和相对误差序列:

$$\varepsilon^{(0)}(i)=x^{(0)}(i)-\hat{x}^{(0)}(i) \quad i=1,2,\dots,n$$

$$\Delta(i)=\left|\frac{\varepsilon^{(0)}(i)}{x^{(0)}(i)}\right| \times 100\%, i=1,2,\dots,n$$

2)后验差检验

$$\text{原始序列均值: } \bar{x}^{(0)}=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^t x^{(0)}(i)$$

$$\text{原始序列标准差: } s_1=\sqrt{\frac{\sum [x^{(0)}(i)-\bar{x}^{(0)}]^2}{n-1}}$$

$$\text{残差均值: } \bar{\varepsilon}^{(0)}=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^t \varepsilon^{(0)}(i)$$

$$\text{残差标准差: } s_2=\sqrt{\frac{\sum [\varepsilon^{(0)}(i)-\bar{\varepsilon}^{(0)}]^2}{n-1}}$$

均方差之比是残差标准差与原始序列标准差之比:

$c=\frac{s_2}{s_1}$ , 对于给定的 $c_0>0$ ,当 $c<c_0$ 时,称模型为均方差比合格模型。

小误差概率 $p=P\{|\varepsilon^{(0)}(i)-\bar{\varepsilon}^{(0)}|<0.6745s_1\}$ ,对于给定的 $p_0>0$ ,当 $p>p_0$ 时,模型为小误差概率合格模型。具体评判标准见表1。

如果建立的模型经残差检验和后验差检验都能通过,则可以采用该模型进行预测,否则,需要对其进行残差修正。

## 2 结果

2.1 灰色预测结果 以2004年-2011年深圳市售粮食平均镉含量作为原始序列,根据GM(1,1)预测模型的计算步骤,得到模型检验结果。

1)灰色预测模型

参数:  $a=0.182052$   $b=0.000922$

$$x(t+1)=0.011174e^{0.182052t}-0.005065$$

由表2可见,灰色预测模型对粮食镉含量的预测效果较好,可以利用其进行预测。

2)预测结果,见表3,4,图1。

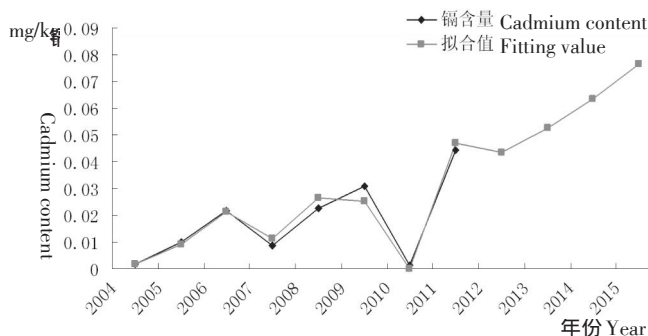


图1 灰色预测模型预测结果

Fig 1 Grey model prediction

从预测结果来看,未来4年深圳市售粮食中镉含量总体成上升趋势。

2.2 深圳市人群粮食镉暴露量评估 通过2004~2011年深圳市食品安全风险监测粮食中镉含量平均值,以及未来4年深圳市售粮食中镉含量预测值,与深圳市膳食调查每人每日粮食消费量(214.8g/d/p)相

表 1 评判标准

Table 1 Evaluation standard

模型精度等级 Model precision grade	相对误差 Relective error	小误差概率 Little probability of error	均方差比值 Mean square error
一级 (好)Grade one(Excellent)	0.01	0.95	0.35
二级 (良好)Grade two(good)	0.05	0.80	0.50
三级 (合格)Grade three(qualified)	0.10	0.70	0.65
四级 (不合格)Grade four(unqualified)	0.20	0.60	0.80

表 2 灰色预测建模分析结果

Table 2 Analysis results of gray prediction model

食品种类 Kinds of food	均方差比值 Mean square error	小误差概率 Little probability of error	精度级别 Accuracy Grade
粮食 Grains	0.2298	1.0000	一级 Grade one

表3 2004~2011年深圳市售粮食平均镉含量及拟合值 (mg/kg)

Table 3 Average cadmium content and the fitted value of commissariat in Shenzhen market from 2004 to 2011 (mg/kg)

年份 Year	镉含量 Cadmium content	拟合值 Fitting value	年份 Year	镉含量 Cadmium content	拟合值 Fitting value
2004	0.0016	0.0016	2008	0.0228	0.0267
2005	0.0098	0.0093	2009	0.0308	0.0252
2006	0.0217	0.0213	2010	0.0015	0.0000
2007	0.0089	0.0114	2011	0.0445	0.0468

表 4 2012~2015年深圳市粮食中镉含量预测结果(mg/kg)

Table 4 The forecast result of grain cadmium content in Shenzhen from 2012 to 2015( mg/kg )

灰色预测模型 Grey forecasting model	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
GM(1,1)	0.0433	0.0526	0.0635	0.0766

结合 ,求出本市居民每人每日粮食镉暴露量。并与 FAO/WHO 规定的每人每日允许摄入量(PIDI) 50.00 $\mu$ g 相比较 ,发现深圳市人群通过食用粮食镉暴露量呈上升趋势 ,占 PTDI 值的 0.64%~32.91%。见下表 5。

表 5 2004~2015年深圳市人群粮食镉暴露量评估

Table 5 Grain cadmium exposure assessment of population in Shenzhen city from 2004 to 2015

年份	镉含量(mg/kg)	粮食镉暴露量( $\mu$ g/d/p)	占 PTDI(%)
Year	Cadmium content	Grain cadmium exposure	
2004	0.0016	0.34368	0.69
2005	0.0098	2.10504	4.21
2006	0.0217	4.66116	9.32
2007	0.0089	1.91172	3.82
2008	0.0228	4.89744	9.79
2009	0.0308	6.61584	13.23
2010	0.0015	0.32220	0.64
2011	0.0445	9.55860	19.12
2012	0.0433	9.30084	18.60
2013	0.0526	11.29848	22.60
2014	0.0635	13.63980	27.28
2015	0.0766	16.45370	32.91

3 讨论

近年来食品安全问题备受关注 ,健康饮食不容忽视。粮食作为人们维持生存最重要的食品具有食用量大、食用频率高的特点 ,一旦粮食受到污染 ,将给人体健康带来严重的隐患。因此我们根据 2004~2011 年深圳市食品安全风险监测粮食中镉含量 ,对未来 4 年深圳市售粮食中镉含量的变化趋势和人群的可能暴露风险进行评估 ,对其危害进行预测。

粮食中镉污染在时间上存在积累效应 ,然而镉含量数据存在大量 未检出 的情况 ,粮食中镉含量又受多种因素的影响 ,而且还存在一些不完全的数据。灰色预测模型 GM(1 ,1)弱化了系统的随机性 ,使紊乱的原始序列呈现某种规律 ,规律不明显的变得较为明显 ,建模后还能进行残差辨识 ,即使较少的历史数据 ,任意随机分布 ,也能得到较高的预测精度。因此 ,本次采用灰色预测模型进行预测 ,得出均方差比值为 0.2298 ,小误差概率为 1.000 ,精度级别为一级 ,拟合良好 ,显示深圳市未来 4 年市售粮食镉污染呈上升趋势。

根据 2004~2011 年深圳市食品安全风险监测粮食中镉的实测平均值 ,得出未来 4 年深圳市售粮食中镉含量预测值 ,结合 2008 年深圳市居民膳食调查中每人每日粮食摄入量 214.8g/d ,评估深圳市居民粮食中镉的平均暴露水平。得出 2012~2015 年深圳市

居民每人每天镉的平均暴露量为9.3008~16.4537 $\mu\text{g}$ , 呈上升趋势,与镉的PTDI值比较,占PTDI值的18.60%~32.91%,但仍提示深圳市居民通过食用粮食类食品摄入镉存在一定风险。

#### 参考文献:

- [1] Wen J, Li H, Dai CF, et al. Risk assessment of cadmium in food in Guangdong Province[J]. South China J Prev Med, 2008, 34(1): 63-64. (In Chinese)  
(闻剑, 李海, 戴昌芬, 等. 广东省食品中镉的危害评估[J]. 华南预防医学, 2008, 34(1): 63-64.)
- [2] Zhang WP. Statistical methods of the data below the detection limit in Environmental monitoring[J]. Shanghai Environmental Science, 1993, 12(11): 38-40. (in Chinese)  
(张文平. 环境监测中低于检出限数据的统计处理方法[J]. 上海环境科学, 1993, 12(11): 38-40.)
- [3] Gao RJ, Chen LZ, Zhang WJ. Review on Pesticide Residues Acute Dietary Risk Assessment [J]. Food Science, 2007, 28(2): 363-368. (In Chinese)  
(高仁君, 陈隆智, 张文吉. 农药残留急性膳食风险评估研究进展[J]. 食品科学, 2007, 28(2): 363-368.)
- [4] Huang W, Wang Z, Pan LB, et al. Exposure Assessment of Pollution of Dietary Cadmium in Foods in Shenzhen City[J]. Chin J Food Hyg, 2008, 20(8): 405-408. (in Chinese)  
(黄薇, 王舟, 潘柳波, 等. 深圳市食品镉污染的暴露量评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2008, 20(8): 405-408.)
- [5] Liu SF. Grey system theory and its application[M]. Beijing Science Press. 1999, 1051. (in Chinese)  
(刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京科学出版社, 1999, 1051.)
- [6] LUO You-xin, PEN Zhu, ZHANG Long-ting. Grey GM (1,1) model with function transfer method for the wear trend prediction and its application[J]. Internal J Plant Eng and Management, 2001, 21(4): 220-232.  
收稿日期 2012-07-13 编辑 谢永慧

(上接第1309页)

- (Chinese)  
(高兴, 王景林. 基因芯片技术在病原细菌检测中的应用[J]. 中国生物工程杂志, 2010, 30(2): 100-104.)
- [10] Hu R, Zhao JY, Chen DK. Application of Luminex xMAP technology in the rapid, high-throughput, multiplexed detection and identification of four pathogens [J]. Progress Modern Biomed, 2008; 8 (12) 2232-2235. (In Chinese)  
(胡瑞, 赵金银, 陈德坤. 应用xMAP液态芯片多重快速检测四种病原微生物的研究[J]. 现代生物医学进展, 2008; 8(12) 2232-2235.)
- [11] Wang ZL, Wang Y, Peng SJ. Application of new liquid-chip system in rapid detection of foodborne pathogens [J]. Chin J Health Lab Techno, 2010, 20(3): 462-463. (In Chinese)  
(王子良, 王颖, 彭少杰, 等. 新型液相芯片系统在食源性致病菌快速检测中的应用研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2010, 20(3): 462-463.)
- [12] Shi XL, Hu QH, Zhang JF, et al. Rapid simultaneous detection of Salmonella and Shigella using modified molecular beacons and real-time PCR [J]. Chin J Epidemiol, 2006, 27(12): 1053-1056 (In Chinese)  
(石晓路, 扈庆华, 张佳峰, 等. 多重实时PCR快速同时检测沙门菌和志贺菌[J]. 中华流行病学杂志, 2006, 27(12): 1053-1056)
- [13] Qiying Huang, Qinghua Hu, Qingge Li. Identification of 8 Foodborne Pathogens by Multicolor Combinational Probe Coding Technology in a Single Real-Time PCR[J]. Clin. Chem, 2007, 53(10): 1741-1748.  
收稿日期 2012-08-06 编辑 谢永慧

## 作者单位\署名与通讯作者

1 作者单位 作者单位应注明全称(到科室),并注明所在省、市及邮政编码。在作者姓名右上角加注不同的阿拉伯数字序号,在作者名下依序号分述其单位名称,不同单位之间用分号 ; 隔开。

英文摘要中的作者单位著录项目应与中文一致,并应在邮政编码后加注国名 China。

2 署名 英文摘要中国内作者的姓名用汉语拼音字母标注。汉族作者姓名姓在前,复姓连写,姓全部大写,名在后,首字母大写,双名间加连字符。名不缩写,姓与名之间空1格。对于复姓或双名的汉语拼音音节界限易混淆者,应加隔音号 。少数民族作者姓名按照民族习俗,用汉语拼音字母音译转写,分连次序依民族习惯。香港、澳门、台湾地区作者姓名的书写方式应尊重其传统习惯。外国作者的姓名写法遵从国际惯例。

3 通讯作者 通讯作者的姓名和E-mail地址置于文章首页地脚。

本刊编辑部