

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.028

近10年我国民爆物品爆炸事故统计及预测*

张飞燕^{1a,2}, 张念思^{1a}, 韩颖^{1b,3,4,5}, 何鑫^{1a}

(1. 河南理工大学 a. 安全科学与工程学院; b. 能源科学与工程学院, 焦作 454003;

2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 焦作 454003;

3. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心, 焦作 454003;

4. 深井岩层控制与瓦斯抽采国家安监局科技支撑平台, 焦作 454003;

5. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地, 焦作 454003)

摘要: 民爆行业是推进现代化建设和社会发展的重要行业, 国家基础建设的快速发展使民爆物品的需求量迅速增大。由于民爆物品本身就具有危险特性, 在其生产、运输、贮存和使用等过程中都有发生爆炸的可能性, 严重威胁了人民群众的生命财产安全和社会稳定。为了充分了解民爆物品爆炸事故的危害性, 有针对性的做好民爆物品的安全管理, 并进行有效防控, 以2012—2021年我国发生的102起民爆物品爆炸事故为统计分析对象, 采用数理统计的方法对事故发生年份、发生省份、发生事故等级、发生环节以及原因进行分析, 并采用灰色马尔可夫预测模型对2022—2023年的民爆物品爆炸事故起数和死亡人数进行预测。结果表明: 2012年、2014年、2016年发生的民爆物品爆炸事故起数最多, 2020年造成的死亡人数最少; 发生事故等级中较大事故比重最大; 湖南、河北和陕西是民爆物品爆炸事故高发省份; 民爆物品爆炸事故多发生在生产和爆破作业环节, 机械撞击和摩擦是导致民爆物品爆炸的主要原因; 预测2022年和2023年的民爆物品爆炸事故起数分别为6、5起, 死亡人数分别为18、17人, 事故起数和死亡人数均呈下降趋势, 安全形势趋于稳定。研究结果对加强我国民爆物品安全管理和减少民爆物品爆炸事故的发生具有重要意义。

关键词: 民爆物品; 爆炸事故; 统计分析; 预测模型; 灰色马尔可夫预测

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0192-09

Statistics and Prediction of Civil Explosive Articles Explosion Accidents in China in Recent Decade

ZHANG Fei-yan^{1a,2}, ZHANG Nian-si^{1a}, HAN Ying^{1b,3,4,5}, HE Xin^{1a}

(1. a. College of Safety Science and Engineering; b. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coal

Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Jiaozuo 454003, China;

3. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region (Henan Province), Jiaozuo 454003, China; 4. Technology Platform of Deep Mine Strata

Control and Methane Drainage for State Administration of Work Safety, Jiaozuo 454003, China;

5. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control

(Henan Polytechnic University), Jiaozuo 454003, China)

收稿日期: 2022-10-18

作者简介: 张飞燕(1978-), 女, 山西芮城人, 教授、博士, 主要从事安全技术及工程领域的教学与科研工作, (E-mail) yanzi@hpu.edu.cn。

通讯作者: 韩颖(1980-), 男, 山东济南人, 教授、博士, 主要从事矿井瓦斯防治与矿山安全工程领域的教学与科研工作, (E-mail) hyhpu@hpu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974108、51404093); 河南省博士后科研项目(001701014); 河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(NSFRF210315); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地开放基金项目(WS2020B12、WS2012A09); 河南理工大学博士基金资助项目(B2008-15、B2012-093)

Abstract: Civil explosive industry is a significant industry to promote the modernization construction and social development. Thus the rapid development of the national infrastructure construction increases the demand for civil explosive goods rapidly. Because of dangerous characteristics, there is the possibility of explosion in the process of their production, transportation, storage and use, which seriously threatens the safety of people's lives and property and social stability. In order to further understand the dangers of civil explosive goods explosion accidents, targeted civil explosive goods safety management, and effective prevention and control, with 102 cases from 2012—2021 as the statistical object, using the mathematical statistics method of accident year, province, accident level, occurrence and cause, and predict the Grey Markov prediction model in 2022—2023. The results show that the most explosive accidents in 2012, 2014, 2014 and 2016, the least deaths in 2020 and the largest proportion; Hunan, Hubei and Shaanxi are high provinces in production and use, and mechanical impact and friction in production and transportation are the main causes of explosive explosions in 2022 and 2023 are 6 and 5 respectively, with 18 and 17 deaths respectively. The results are of great significance to strengthen the safety management of civil explosive articles and reduce the occurrence of civil explosive accidents.

Key words: civil explosive items; explosion hazard; statistical analysis; prediction model; gray Markov predictions

“十四五”时期是推进民爆行业安全、高质量发展的关键时期。民爆行业是推进现代化基础设施体系建设、保障国民经济建设和社会发展的基础性行业^[1]。随着民爆行业的发展,民爆物品的需求量也快速增大。由于民爆物品本身就具有高危险性,在其生产、运输、贮存和使用等过程都不利于安全管理^[2-4],因此,许多学者针对民爆物品的安全管理进行了研究。高海松等指出我国民爆物品安全管理存在管理模式粗放、缺乏专业技术、安全意识淡薄和监管不到位4大问题^[5];刘治兵认为管理失误是造成民爆物品爆炸事故的直接原因^[6]。郑德明从民爆行业市场进行分析^[7],认为民爆物品的流向和使用存在监管盲区,建议有关部门加强管理。民爆物品安全管理问题突显,安全事故时有发生,由民爆物品爆炸事故所带来的人员伤亡和经济损失不容小觑^[8,9]。因此,统计我国的民爆物品爆炸死亡事故,科学研判民爆物品安全形式,对预防民爆物品爆炸死亡事故的发生十分重要。

目前,我国许多学者对灾害事故的统计进行了大量研究,主要包括煤矿瓦斯、煤矿水害、粉尘爆炸、

交通事故等^[10-13]。但是对于民爆物品事故的统计相对较少,不能够直观地看到民爆物品爆炸所带来的危害。基于此,通过中国爆破网和安全管理网,搜集统计了2012—2021年我国发生的民爆物品爆炸死亡事故。从事故发生年份、发生省份、发生环节和死亡人数等进行统计分析,并采用灰色马尔可夫预测模型对未来两年我国的民爆物品爆炸事故起数和死亡人数进行预测,以期加强对于民爆物品的安全管理,有效改善民爆物品爆炸事故频发的局面提供参考。

1 近10年我国民爆物品爆炸事故统计

1.1 基于事故年份的统计

为了保证民爆物品爆炸事故的真实性和准确性,数据全部来源于中国爆破网和安全管理网^[14,15]。2012—2021年我国发生了102起民爆物品爆炸伤亡事故,死亡479人。近10年来的民爆物品爆炸死亡事故统计见表1,民爆物品事故伤亡趋势如图1所示。

表1 2012—2021年民爆物品爆炸事故情况统计表

Table 1 Statistical table of civil explosive articles explosion accidents in 2012—2021

年份	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	总计
事故起数/起	15	11	15	9	15	9	6	8	8	6	102
死亡人数/人	90	75	62	29	68	33	23	48	18	33	479

由图1可以看出:2012年、2014年、2016年我国发生民爆物品爆炸伤亡事故数最多,分别占事故总起数的14.7%;2018年和2021年发生的事故起数最少,分别占事故总起数的5.9%。2012年事故

造成的死亡人数最多,死亡90人,占总死亡人数的18.79%;2018年因民爆物品爆炸事故造成的死亡人数最少,占总死亡人数的4.8%。2017—2021年所发生的事故起数相对于2012—2016年的事故起

数有所减少,事故造成的死亡人数总体有下降趋势。

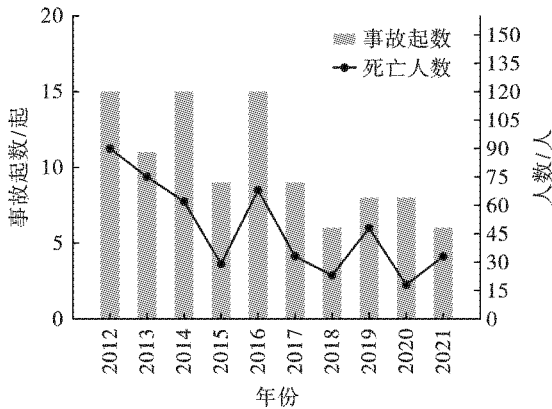


图 1 2012—2021 年民爆物品爆炸死亡事故趋势图
Fig. 1 Trend chart of civil explosive articles explosion casualties from 2012 to 2021

1.2 基于事故等级的统计

按照我国《生产安全事故报告和调查处理条例》^[16],可将事故等级根据死亡人数划分为特别重大事故(造成 30 人以上死亡)、重大事故(造成 10 人以上 30 人以下死亡)、较大事故(造成 3 人以上 10 人以下死亡)、一般事故(造成 3 人以下死亡)。2012—2021 年我国发生特别重大民爆物品爆炸事故 1 起,2013 年的山东保利民爆济南科技有限公司

“5·20”特别重大爆炸事故^[17],造成 33 人死亡,占总死亡人数的 6.9%;重大事故 15 起,占事故总数的 14.7%,死亡 178 人,占总死亡人数的 37.2%;一般和较大事故 86 起,占事故总数的 84.3%,死亡 268 人,占总死亡人数的 55.9%。具体情况见表 2。

表 2 2012—2021 年我国民爆物品爆炸事故等级统计
Table 2 Statistics of explosion accidents of civil explosive articles in China from 2012 to 2021

事故等级	一般事故	较大事故	重大事故	特别重大事故
事故次数	42	44	15	1
百分比/%	41.2	43.1	14.7	1
死亡人数	56	212	178	33
人数百分比/%	11.7	44.2	37.2	6.9

1.3 基于事故发生区域的统计

2012—2021 年我国共有 24 个省份发生民爆物品爆炸死亡事故,其中发生民爆物品爆炸死亡事故起数最多的省份为湖南省,发生了 17 起,造成 87 人死亡;其次是河北省,发生了 11 起民爆物品爆炸事故,造成 76 人死亡;陕西、河南、山西等地也发生多起民爆物品爆炸事故,造成多数人员死亡。具体情况见表 3。

表 3 2012—2021 年我国民爆物品爆炸事故区域统计

Table 3 Regional statistics of civil explosive articles explosion accidents in China from 2012 to 2021

省份	湖南	河北	陕西	河南	四川	山西	安徽	福建	辽宁	广东	甘肃	云南	山东	广西	江西	内蒙古	黑龙江	广州	海南	北京	江苏	贵州
事故/起	17	11	9	7	7	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1
死亡人数/人	87	76	42	23	14	36	7	14	20	15	11	11	53	10	8	8	11	8	1	6	1	4

1.4 基于爆炸事故环节的统计

我国民爆行业发展迅速,在民爆物品的生产、运输、贮存和使用等过程爆炸死亡事故时有发生。根据爆炸事故发生的环节对我国 2012—2021 年的民爆物品爆炸事故进行了统计,见表 4,其中生产环节发生的事故起数最多,占事故总数的 47.1%,造成的死亡人数为 213 人,占总死亡人数的 44.5%;其次是爆破作业环节,发生了 18 起爆炸事故,占事故总数的 17.6%,造成 76 人死亡,占总死亡人数的 15.8%;贮存环节发生了 15 起事故,占事故总数的 14.7%,造成 55 人死亡,占总死亡人数的 11.5%;销毁环节发生了 9 起爆炸事故,占事故总数的 8.8%,死亡 33 人,占总死亡人数的 6.9%;装卸环

节发生了 6 起爆炸事故,占事故总数的 5.9%,死亡 64 人,占总死亡人数的 13.4%;运输环节发生 6 起爆炸事故,占事故总数的 5.9%,死亡 38 人,占总死亡人数的 7.9%。其中,数据统计显示民爆物品的生产和爆破作业环节发生的事故起数相对最多,主要是因为民爆物品生产企业作业环境不安全、管理缺陷等风险因素以及爆破作业单位从业人员专业能力不足^[18]、作业现场安全监管不到位而导致爆炸事故发生^[19]。

1.5 基于事故原因的统计

民爆物品发生爆炸产生的冲击波会引起相隔一定距离的炸药爆炸,而爆炸产生的爆炸冲击波又是造成人员伤亡的最主要因素。在此主要把民爆物品爆炸事故原因分为三类:静电/火花、机械作用撞击

或摩擦以及违章作业。静电/火花导致爆炸事故是因为在生产过程中机械之间的接触、摩擦使电荷聚集而产生静电火花或者在爆破作业时产生的明火飞溅引燃其他民爆物品而发生爆炸。机械撞击、摩擦导致爆炸事故是因为在民爆物品生产和运输过程中,生产车间机械之间的摩擦、运输过程中民爆物品与车厢之间的撞击摩擦发热,热量积聚导致民爆物

品燃烧爆炸。违章作业主要包括在爆破施工时违反国家规定、销毁炸药时操作不当等。对2012—2021年的民爆物品爆炸事故原因进行了统计分析,其中因机械撞击、摩擦而引发的爆炸事故占51%,静电/火花引发的爆炸事故占22.5%,违章作业引发的爆炸事故占26.5%,如图2所示。

表4 2012—2021年我国民爆物品爆炸事故环节统计

Table 4 Statistics of civil explosive articles explosion accidents in China from 2012 to 2021

发生阶段	生产环节	运输环节	装卸环节	爆破作业环节	贮存环节	销毁环节
事故	起数	48	6	6	18	15
	百分比/%	47.1	5.9	5.9	17.6	14.7
死亡人数	人数	213	38	64	76	55
	百分比/%	44.5	7.9	13.4	15.8	11.5

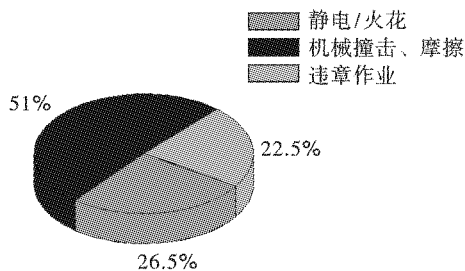


图2 2012—2021年我国民爆物品爆炸事故原因
Fig. 2 Causes of civil explosive articles explosion accident in China in 2012—2021

2 安全措施

加大我国各省份民爆物品的安全监管力度。2012—2021年我国的民爆物品爆炸事故涉及各个省份,其中湖南、河北和陕西三省是民爆物品爆炸事故的主要发生地。各省份民爆物品爆炸事故的发生反映出当地政府对于民爆物品的监管不到位,因此,国家应加大对各省份民爆物品的安全监管力度,落实危险品的安全管理制度。

健全民爆物品生产企业的管理制度,强化生产企业的管理责任。根据数据统计,我国近10年的民爆物品爆炸事故主要发生在民爆物品的生产和爆破作业环节,另外,由于民爆物品具有易燃易爆高危特性不易贮存,也增加了民爆物品爆炸事故发生概率^[20]。为了提高民爆物品的安全生产水平,企业必须要健全管理制度,建立具有专业知识水平的安全管理队伍,加强对从事民爆行业人员的专业培训,提高安全管理人员的专业水平,同时加强对民爆物品储存库的监管。

3 事故起数和伤亡人数预测

目前,经过许多学者的研究,出现了大量的预测方法,主要有非线性回归预测、时间序列预测、贝叶斯网络预测、神经网络预测等^[21-24]。但是,这些预测方法如果想要得到稳定的预测结果,需要大量的样本数据进行支持^[25],但是民爆物品爆炸事故往往是突然发生的,趋势随机波动且样本数据有限。所以,为了提高预测的精确度,采用灰色马尔可夫预测模型对未来两年的我国民爆物品爆炸事故起数和伤亡人数进行预测。灰色马尔可夫预测模型是灰色模型与马尔可夫模型的结合,融合了这2种模型的优点,比较适用于数据波动大、样本数量小的系统预测^[26],如今在建筑、火灾、危化品、交通等领域的事事故预测都有应用^[27-30]。

3.1 模型建立

3.1.1 灰色GM(1,1)预测模型

灰色GM(1,1)预测模型基于灰色系统理论^[31],根据事故发展的不规律性,运用累加序列将数据变得具有明显的规律性^[32]。

原始数据为 $x^{(0)} = \{x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}\}$, 其中 N 为序列长度,对其进行一次累加生成处理

$$x_k^{(1)} = \sum_{j=1}^k x_j^{(0)} \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

则以生成序列 $x^{(1)} = \{x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_N^{(1)}\}$ 为基础建立灰色的生成模型

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (2)$$

称为一阶灰色微分方程,记为GM(1,1),式中 a 和 u 为待辨识参数。

设参数向量

$$\hat{a} = [au]^T, y_N = [x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} -(x_2^{(1)} + x_1^{(1)})/2 & 1 \\ & M & M \\ -(x_N^{(1)} + x_{N-1}^{(1)})/2 & 1 \end{bmatrix}$$

由下式求得最小二乘解

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T y_N \tag{3}$$

得到响应方程式为

$$\hat{x}_{k+1}^{(1)} = \left(x_1^{(1)} - \frac{u}{a} \right) e^{-ak} + \frac{u}{a} \tag{4}$$

式中, $x_1^{(1)} = x_1^{(0)}$ 。

将 $\hat{x}_{k+1}^{(1)}$ 计算值作累减还原, 即得到原始数据的估计值

$$\hat{x}_{k+1}^{(0)} = \hat{x}_{k+1}^{(1)} - \hat{x}_k^{(1)} \tag{5}$$

3.1.2 灰色马尔可夫模型

(1) 状态划分

运用灰色 GM(1, 1) 模型得到的民爆物品爆炸事故起数和伤亡人数的预测值, 将其与实际值做差得到误差, 用误差除以实际值得到相对误差, 将序列以相对误差值为标准划分状态, 记为 E_1, E_2, L, E_n 。 $E_i = (\varphi_1, \varphi_2)$, 其中 E_i 为系统所处的第 i 种状态, φ_1, φ_2 分别为状态区间的上下限。

(2) 状态转移概率

$$p_{ij^{(k)}} = p_{i \rightarrow j} = \frac{E_{ij}}{E_i} \tag{6}$$

E_{ij} 为状态 i 到 j 的一步转移次数, E_i 为 i 状态的数量。根据状态划分的数据, 可得到转移概率矩阵为

$$P = p_{ij^{(k)}} = \begin{bmatrix} p_{11} & L & p_{1n} \\ M & O & M \\ p_{n1} & L & p_{nn} \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中, p_{11} 是指数据从状态 1 一步转移到 1 的概率。

(3) 预测值的计算

若初始值 $x_N^{(0)}$ 的状态为 E_i , 且转移矩阵 P 中的元素存在最大概率值 p_{in} , 则预测值 $x_{n+1}^{(0)}$ 将可能转移状态为 E_n , 且确定预测值的变动区间 (φ_1, φ_2) , 则预测值为

$$Y_k = \frac{X^{(0)}}{1 \pm 0.5 | \varphi_{1n} + \varphi_{2n} |} \tag{8}$$

式中: $X^{(0)}$ 为灰色模型预测值; $\varphi_{1n}, \varphi_{2n}$ 为状态区间的边界值, 当大于实际值时取正号, 当小于实际值时取负号。

3.2 模型在民爆物品爆炸事故中的应用

以 2012—2021 年我国民爆物品爆炸事故为原始数据, 预测 2022 和 2023 年我国民爆物品爆炸事故起数及死亡人数, 先通过灰色模型进行预测, 然后再对预测结果进行马尔可夫预测优化。2012—2021 年我国民爆物品爆炸事故和死亡人数见表 1。

3.2.1 事故起数预测

将原始数据 $x^0 = [15, 11, 15, 9, 15, 9, 6, 8, 8, 6]$ 代入式(1)~式(4), 得到离散响应方程为

$$x_{k+1}^{(1)} = \left(15 - \frac{15.2235}{0.0864} \right) e^{-0.0864k} + \frac{15.2235}{0.0864}$$

根据式(5)的累减还原, 得到民爆物品爆炸事故的预测值, 见表 5。

表 5 事故起数灰色预测、相对误差和状态

Table 5 Grey prediction, relative error and status of the number of accidents

年份	事故起数/起	灰色预测值	误差	相对误差	状态
2012	15	15	0	0.00	E_2
2013	11	13	-2	-0.18	E_2
2014	15	12	3	0.20	E_3
2015	9	11	-2	-0.22	E_1
2016	15	10	5	0.33	E_3
2017	9	9	0	0.00	E_2
2018	6	9	-3	-0.50	E_1
2019	8	8	0	0.00	E_2
2020	8	7	1	0.13	E_3
2021	6	7	-1	-0.17	E_2
2022		6			
2023		6			

根据表1中结果显示,近10年民爆物品事故的灰色预测值与实际值之间的相对误差范围为(-0.50,0.33),将其划分为3种状态: $E_1 = (-0.50, -0.23)$, $E_2 = (-0.23, 0.06)$, $E_3 = (0.06, 0.33)$,得到2012—2021年我国民爆物品事故起数各年所处的状态,见表5。

根据各年所处的状态,由式(6)和式(7)可知,一步转移概率矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 0 \end{bmatrix}$$

由表5可知,2012年的民爆物品爆炸事故起数预测值的状态为 E_2 ,则2013年的民爆物品爆炸事故起数的预测值最有可能处于 E_3 状态,故2013年的民爆物品爆炸事故起数为

$$Y(2013) = \frac{13}{1 + 0.5 \mid 0.06 + 0.33 \mid} = 11$$

同理,根据转移矩阵对其他年份的灰色预测值进行修正,并对2022和2023年的民爆物品爆炸事故起数使用灰色马尔可夫模型进行预测,最终得到

的修正预测结果见表6。

表6 灰色马尔可夫预测结果
Table 6 Grey Markov prediction results

年份	事故起数/起	灰色预测值	灰色马尔可夫预测值
2012	15	15	15
2013	11	13	11
2014	15	12	13
2015	9	11	9
2016	15	10	11
2017	9	9	8
2018	6	9	8
2019	8	8	7
2020	8	7	8
2021	6	7	6
2022		6	6
2023		6	5

3.2.2 民爆物品爆炸死亡人数预测

将原始数据 $x^0 = [90, 75, 62, 29, 68, 33, 23, 48, 18, 33]$ 代入式(1)~式(4),得到离散响应方程为

$$x_{k+1}^{(1)} = \left(90 - \frac{84.1485}{0.1285}\right)e^{-0.1285k} + \frac{84.1485}{0.1285}$$

根据式(5)的累减还原,得到民爆物品爆炸事故死亡人数的预测值,见表7。

表7 事故死亡人数灰色预测、相对误差和状态

Table 7 Grey prediction, relative error, and status of accident fatalities

年份	死亡人数/人	灰色预测值	误差	相对误差	状态
2012	90	90	0	0.00	E_3
2013	75	68	7	0.09	E_3
2014	62	60	2	0.03	E_3
2015	29	53	-24	-0.83	E_1
2016	68	47	21	0.31	E_3
2017	33	41	-8	-0.24	E_2
2018	23	36	-13	-0.57	E_1
2019	48	32	16	0.33	E_3
2020	18	28	-10	-0.56	E_1
2021	33	24	9	0.27	E_3
2022		21			
2023		19			

根据表7中的数据结果显示,近10年民爆物品爆炸死亡人数的灰色预测值与实际值之间的相对误差范围为(-0.83,0.33),将其划分为3种状态: $E_1 = (-0.83, -0.44)$, $E_2 = (-0.44, -0.05)$, $E_3 = (-0.05, 0.33)$,得到2012—2021年我国民爆物品爆炸死亡人数各年所处的状态,见表7。

由式(6)和式(7)可知,一步转移概率矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{2}{5} & \frac{1}{5} & \frac{2}{5} \end{bmatrix}$$

由表7可知,2012年的民爆物品爆炸死亡人数预测值的状态为 E_3 ,则2013年的民爆物品爆炸死亡人数的预测值最有可能处于 E_3 状态,故2013年

的民爆物品爆炸事故起数为

$$Y(2013) = \frac{68}{1 - 0.5 | - 0.056 + 0.33 |} = 79$$

同理,根据转移矩阵对其他年份的灰色预测值进行修正,并对 2022 和 2023 年的民爆物品爆炸死亡人数使用灰色马尔可夫模型进行预测,最终得到的修正预测结果见表 8。

表 8 灰色马尔可夫预测结果
Table 8 Grey Markov prediction results

年份	事故死亡人数/人	灰色预测值	灰色马尔可夫预测值
2012	90	90	90
2013	75	68	79
2014	62	60	69
2015	29	53	46
2016	68	47	55
2017	33	41	36
2018	23	36	32
2019	48	32	37
2020	18	28	25
2021	33	24	28
2022		21	18
2023		19	17

由表 6 和表 8 可知,灰色马尔可夫预测值比灰色预测值更接近实际值,所以运用灰色马尔可夫模型来预测 2022 和 2023 年的民爆物品爆炸事故起数和死亡人数。2022 年我国民爆物品爆炸事故起数预测值为 6 起,死亡人数为 18 人;2023 年的民爆物品爆炸事故起数预测值为 5 起,死亡人数为 17 人。预测结果符合我国民爆物品爆炸事故起数和死亡人数逐渐下降的总体趋势。

4 结论

(1) 2012—2021 年我国民爆物品爆炸事故起数和死亡人数总体呈下降趋势,安全形式总体比较平稳。

(2) 我国民爆物品爆炸事故发生地多在湖南、河北和陕西省份,要因地制宜开展民爆物品的安全管理工作;民爆物品爆炸事故主要发生在民爆物品生产和爆破作业环节;而发生爆炸的主要原因是生产和运输过程中的机械撞击和摩擦,导致热量积聚从而引发爆炸,要强化生产企业的安全管理制度,提高从事民爆行业人员的安全意识。

(3) 采用灰色马尔可夫预测模型对 2022 和 2023 年的民爆物品爆炸事故起数和死亡人数进行预测,预测 2022 年我国民爆物品爆炸事故起数为 6

起,死亡人数为 18 人;2023 年的民爆物品爆炸事故起数预测值为 5 起,死亡人数为 17 人。预测结果表明:我国未来两年的民爆物品爆炸事故起数和死亡人数呈下降趋势。但需要说明的是:预测结果的准确度还需时间和事实验证。

参考文献 (References)

- [1] 工业和信息化部. “十四五”民用爆炸物品行业发展规划[S]. 2021.
- [2] 娄建武. 关于加强民用爆炸物品安全监管工作的思考[J]. 爆破, 2014, 31(4): 143-147.
- [2] LOU Jian-wu. Idea of strengthening supervision of civil explosion materials[J]. *Blasting*, 2014, 31(4): 143-147. (in Chinese)
- [3] 张斯睿. 对民用爆炸物品安全管理的思考[J]. 爆破, 2015, 32(2): 156-162.
- [3] ZHANG Si-rui. Some thoughts of safety management in civil explosive[J]. *Blasting*, 2015, 32(2): 156-162. (in Chinese)
- [4] 蔡宝虎. 民用爆炸物品安全管理中存在的问题及对策[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(5): 182-183.
- [4] CAI Bao-hu. Problems and countermeasures in the safety management of civil explosives[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2020, 46(5): 182-183. (in Chinese)
- [5] 高海松, 黄海军, 黄生垫. 民爆物品安全管理问题与对策研究[J]. 煤矿爆破, 2017(5): 15-18.
- [5] GAO Hai-song, HUANG Hai-jun, HUANG Sheng-dian. Study on safety management and countermeasures of civil explosion[J]. *Coal Mine Blasting*, 2017(5): 15-18. (in Chinese)
- [6] 刘治兵. 民爆安全事故致因突变模型[J]. 煤矿爆破, 2009(3): 20-24.
- [6] LIU Zhi-ping. Accident causing catastrophe model of civil explosion[J]. *Coal Mine Blasting*, 2009(3): 20-24. (in Chinese)
- [7] 郑德明, 戴春阳. 浅谈民爆行业市场化现状[J]. 爆破, 2019, 36(3): 147-150.
- [7] ZHENG De-ming, DAI Chun-yang. Brief discussion on marketization status of civil explosive Industry[J]. *Blasting*, 2019, 36(3): 147-150. (in Chinese)
- [8] 邱雪莹. 民用爆炸物品安全管理的思考及对策[J]. 露天采矿技术, 2020, 35(1): 125-128.
- [8] QIU Xue-ying. Reflection and countermeasures on safety management of civil explosives[J]. *Opencast Mining Technology*, 2020, 35(1): 125-128. (in Chinese)
- [9] 巴合江·包尔江. 民用爆炸物品安全管理发展及存在问题的对策[J]. 化工管理, 2019(13): 129-130.

- [9] BA He-jiang · baoerjiang. Development of safety management of civil explosives and countermeasures to existing problems [J]. Chemical Management, 2019 (13): 129-130. (in Chinese)
- [10] 景国勋,刘孟霞. 2015—2019年我国煤矿瓦斯事故统计与规律分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1680-1686.
- [10] JING Guo-xun, LIU Meng-xia. Statistics and analysis of coal mine gas accidents in China from 2015 to 2019 [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(3): 1680-1686. (in Chinese)
- [11] 吴金随,张辞源,尹尚先,等. 近20年我国煤矿水害事故统计及分析[J]. 煤炭技术, 2022, 41(6): 86-89.
- [11] WU Jin-sui, ZHANG Ci-yuan, YIN Shang-xian, et al. Statistics and analysis of coal mine water damage accidents in China in recent 20 years [J]. Coal Technology, 2022, 41(6): 86-89. (in Chinese)
- [12] 陈刚,张晓蕾,徐帅,等. 我国2005—2020年粉尘爆炸事故统计分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 76-83.
- [12] CHEN Gang, ZHANG Xiao-lei, XU Shuai, et al. Statistical analysis on dust explosion accidents in China from 2005 to 2020 [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(8): 76-83. (in Chinese)
- [13] 申艳军,杨阳,邹晓龙,等. 国内公路隧道运营期交通事故统计及伤亡状况评价[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(4): 564-574.
- [13] SHEN Yan-jun, YANG Yang, ZOU Xiao-long, et al. Statistics on traffic accidents occurred in operating highway tunnels in China and their casualties evaluation [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(4): 564-574. (in Chinese)
- [14] 中爆网. 事故案例[EB/OL]. <http://www.cbsw.cn/module.do?typeid=78>.
- [15] 安全管理网. 事故案例[EB/OL]. <http://www.safe-hoo.com/Case/>.
- [16] 中华人民共和国中央人民政府. 生产安全事故报告和调查处理条例[EB/OL]. [2007-04719]. http://www.gov.cn/zwggk/2007-04/19/content_588577.htm.
- [17] 山东保利民爆济南科技有限公司“5·20”特别重大爆炸事故调查报告——中华人民共和国应急管理部[R]. https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/2013/201309/t20130909_245227.shtml.
- [18] 沈杨阳,陈东旭,左庭,等. 风险管理与保险机制对民爆生产行业影响研究[J]. 爆破, 2022, 39(3): 215-222.
- [18] SHEN Yang-yang, CHEN Dong-xu, ZUO Ting, et al. Research on impact of risk management and insurance mechanism on civil explosive production industry [J]. Blasting, 2022, 39(3): 215-222. (in Chinese)
- [19] 郑德明,陆鹏,叶春雷,等. 浅析爆破作业单位安全监管[J]. 爆破, 2022, 39(3): 204-208.
- [19] ZHENG De-ming, LU Peng, YE Chun-lei, et al. Analysis on safety supervision of blasting operation units [J]. Blasting, 2022, 39(3): 204-208. (in Chinese)
- [20] 夏曼曼,郑德明. 小型民用爆炸物品储存库安全管理的思考[J]. 爆破, 2021, 38(3): 172-174.
- [20] XIA Man-man, ZHENG De-ming. Thoughts on safety management of miniature civil explosives magazine [J]. Blasting, 2021, 38(3): 172-174. (in Chinese)
- [21] 李博,吴煌,李腾. 基于加权的综采导水裂隙带高度多元非线性回归预测方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 536-545.
- [21] LI Bo, WU Huang, LI Teng. Height prediction of water-conducting fractured zone under fully mechanized mining based on weighted multivariate nonlinear regression [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(3): 536-545. (in Chinese)
- [22] 黄悦,幸福堂,石葵鑫,等. 基于小波变换的矿业事故时间序列预测[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(1): 127-134.
- [22] HUANG Yue, XING Fu-tang, SHI Gui-xin, et al. Time series prediction of mining accidents based on wavelet transform [J]. MINING R&D, 2021, 41(1): 127-134. (in Chinese)
- [23] 秦岩,盛武. 基于贝叶斯网络的煤矿顶板事故致因研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(3): 136-142.
- [23] QIN Yan, SHENG wu. Study on causes of coal mine roof accidents based on Bayesian network [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(3): 136-142. (in Chinese)
- [24] 张驰,郭媛,黎明. 人工神经网络模型发展及应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(11): 57-69.
- [24] ZHANG Chi, GUO Yuan, LI Ming. Review of development and application of the artificial neural network models [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(11): 57-69. (in Chinese)
- [25] 王铁骊,彭恒明. 基于改进GM(1,1)-Markov模型的国内生产安全事故预测研究[J]. 工业工程, 2020, 23(6): 60-67.
- [25] WANG Ti-eli, PENG Heng-ming. A study on prediction of domestic production safety accidents based on improved GM(1,1)-Markov model [J]. Industrial Engineering Journal, 2020, 23(6): 60-67. (in Chinese)
- [26] 陆明刚,周乾,彭粮波. 基于灰色马尔科夫模型的建筑施工安全事故伤亡预测[J]. 科学技术创新, 2022(26): 129-132.

- [26] LU Ming-gang, ZHOU Qian, PENG Liang-bo. Prediction of construction safety accidents based on Grey Markov model [J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(26):129-132. (in Chinese)
- [27] 童乐, 赵玲. 基于GM(1,1)-Markov模型的火灾事故预测[J]. 科技与创新, 2022(14):96-98.
- [27] TONG Le, ZHAO Ling. Fire accident prediction based on the GM(1,1)-Markov model[J]. Technology and Innovation, 2022(14):96-98. (in Chinese)
- [28] 杜晓燕, 吴建华, 朱庆明, 等. 我国危险化学品事故灰色残差马尔科夫预测模型的建立及应用研究[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(3):125-129.
- [28] DU Xiao-yan, WU Jian-hua, ZHU Qing-ming, et al. Establishment and application of Gray Residual Markov Prediction model for hazardous chemicals accidents[J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(3):125-129. (in Chinese)
- [29] 李文涛, 耿洁, 韦湖. 基于灰色GM(1,1)-马尔科夫模型的高速公路交通事故预测[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(6):317-320.
- [29] LI Wen-tao, GENG Jie, WEI Hu. Highway traffic accident prediction based on gray GM(1,1)-Markov model [J]. Highway Traffic Technology (Applied Technology Edition), 2020, 16(6):317-320. (in Chinese)
- [30] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1987.
- [31] 唐飞, 王云刚, 杜炳成, 等. 基于优化马尔可夫模型的煤矿事故死亡人数预测[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4):122-128.
- [31] TANG Fei, WANG Yun-gang, DU Bing-cheng, et al. Prediction of death toll in coal mine accident based on optimized Markov model[J]. China Safety Sciences Journal, 2022, 32(4):122-128. (in Chinese)
- [32] 杨涛, 王亚晴, 王家盛. 基于灰色-马尔科夫的危险化学品事故预测研究[J]. 当代化工, 2022, 51(6):1487-1490, 1495.
- [32] YANG Tao, WANG Ya-qing, WANG Jia-sheng. Study on hazardous chemical accident prediction based on Grey-Markov [J]. Contemporary Chemical Industry, 2022, 51(6):1487-1490, 1495. (in Chinese)

英文编辑: 黄刚

(上接第143页)

- [4] 杨仁树, 李炜煜, 方士正, 等. 波阻抗对岩石动力学特性影响的模拟试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(3):178-185.
- [4] YANG Ren-shu, LI Wei-yu, FANG Shi-zheng, et al. Tests for effects of wave impedance on rock's dynamic performance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(3):178-185.
- [5] 叶海旺, 叶结旺, 朱瑞赓. 基于模糊推理的炸药与岩石智能匹配系统研究[J]. 爆破, 2003, 20(4):5-6.
- [5] YE Hai-wang, YE Jie-wang, ZHU Rui-geng. Study on intelligent matching system of explosive and rock based on fuzzy inference[J]. Blasting, 2003, 20(4):5-6. (in Chinese)
- [6] 赵明生, 黄胜松, 周建敏, 等. 混装乳化炸药配方对炸药-岩石匹配效果影响研究[J]. 爆破, 2021, 38(4):124-128, 179.
- [6] ZHAO Ming-sheng, HUANG Sheng-song, ZHOU Jian-min, et al. Study on influence of formula of mixed emulsion explosive on matching effect of explosive and rock[J]. Blasting, 2021, 38(4):124-128, 179. (in Chinese)
- [7] 郭子庭, 吴从师. 炸药与岩石的全过程匹配[J]. 矿冶工程, 1993(3):11-15.
- [7] GUO Zi-ru, WU Cong-shi. The explosive-rock matching throughout the blasting process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1993(3):11-15. (in Chinese)
- [8] 赖应得. 论炸药和岩石的能量匹配[J]. 工程爆破, 1995(2):22-26.
- [8] LAI Ying-de. On energy match between explosive and rock [J]. Engineering Blasting, 1995(2):22-26. (in Chinese)
- [9] 徐颖, 郝飞, 丁光亚. 小直径中深孔爆破直眼分段掏槽机理及参数探讨[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003(1):99-101.
- [9] XU Ying, HAO Fei, DING Guang-ya. Study on straight-hole sublevel sumping cut mechanism and parameters in small-diameter middle depth boreholes blasting [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2003(1):99-101. (in Chinese)
- [10] 冷振东, 卢文波, 严鹏, 等. 基于粉碎区控制的钻孔爆破岩石-炸药匹配方法[J]. 中国工程科学, 2014, 16(11):28-35.
- [10] LENG Zheng-dong, LU Wen-bo, YAN Peng, et al. A new method of rock-explosive matching in drilling and blasting based on reasonable control of the crushed zone[J]. Engineering Sciences, 2014, 16(11):28-35. (in Chinese)

英文编辑: 黄刚