

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.05.02

# 基于灰色系统理论的陕西省地质灾害趋势预测

张晓敏<sup>1</sup>, 李辉<sup>2,3</sup>, 刘海南<sup>2,3</sup>, 周静静<sup>1</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 国土资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省地质环境监测总站, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 未来地质灾害趋势预测, 是地质灾害防治与规划工作宏观决策的基础。陕西省近年来的地质灾害以崩塌和滑坡灾害为主, 占全省地质灾害总数的 76.91%; 降雨和人类工程活动为影响陕西省地质灾害发生的主要因素。以陕西省 2003—2012 年 10 年地质灾害灾情数据作为原始数据序列, 建立灰色区间预测模型。采用 2013—2017 年 5 年地质灾害灾情数据, 验证模型预测精度, 对未来 3 年地质灾害发生趋势进行预测。预计未来一段时间地质灾害高发年为 2019、2021 和 2024 年。研究结果可为陕西省地质灾害防治工作的宏观决策提供参考依据。

**关键词:** 地质灾害; 时空分布特征; 灰色系统理论; 趋势预测

中图分类号: P642; X43

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)05-0007-06

## Trend prediction of geological hazards in Shaanxi Province based on Grey System Theory

ZHANG Xiaomin<sup>1</sup>, LI Hui<sup>2,3</sup>, LIU Hainan<sup>2,3</sup>, ZHOU Jingjing<sup>1</sup>

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;  
2. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Land and Resources, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** The prediction of future geological hazards is the basis for the macroscopic decision-making in the prevention and planning of geological hazards. In recent years, the type of geological hazards in Shaanxi Province are mainly collapse and landslide, accounting for 76.91% of the total number of geological hazards in the province. Rainfall and human engineering activities are the main factors affecting the geological hazards in Shaanxi Province. Taking the data of geological hazards in Shaanxi Province from 2003 to 2012 as the original data series, a grey interval prediction model was proposed. The accuracy of the model was verified by using the data of geological hazards from 2013 to 2017, then the trend of geological hazards in the next three years was carried out. It is expected that the period of high geological hazards in the coming period will be 2019, 2021 and 2024. The results provide reference for the macroscopic decision-making of geological hazards prevention and control in Shaanxi Province.

**Keywords:** geological hazards; spatial and temporal distribution characteristics; Grey System Theory; trend prediction

根据陕西省地质灾害历史灾险情数据资料, 2001—2017 年全省共发生地质灾害 8 345 起, 崩塌 1 379 起, 滑坡 5 039 起, 泥石流 1 214 起, 地面塌陷

245 起, 地裂缝 3 起, 地面沉降 2 起, 造成 935 人死亡失踪, 341 人受伤, 直接经济损失约 37.3 亿元<sup>[1-2]</sup>。地质灾害的发生不仅对人们的生命财产安全造成巨大

收稿日期: 2018-03-20; 修订日期: 2018-05-18

第一作者: 张晓敏(1994-), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害研究。E-mail: 854168051@qq.com

的损失,而且严重制约了社会和经济的发展。因此,对地质灾害发生的趋势预测研究具有实际意义。

国内外许多学者对地质灾害特征、运动机理、形成机理等方面做过大量研究工作<sup>[3-7]</sup>。20世纪90年代,张业成<sup>[3]</sup>、张春山等<sup>[4]</sup>归纳总结了我国地质灾害特征,地质灾害具有区域分布不均、局部异常强烈的群发性和动态变化性的特点。殷跃平等<sup>[5]</sup>较早的提出运用GIS技术进行区域地质灾害趋势预测。随着地理信息系统技术(GIS)、合成孔径干涉雷达技术(InSAR)等技术应用到地质灾害调查与监测工作中,区域地质灾害预警预报、评价区划的研究取得了许多研究成果<sup>[8-11]</sup>,预测理论也从传统的统计分析方法逐步引入到非线性理论<sup>[12-16]</sup>。刘传正等<sup>[8]</sup>提出区域地质灾害时空规律预警递进分析(AMFP)理论体系。李晓红等<sup>[12]</sup>、王朝阳等<sup>[13]</sup>、陈春利等<sup>[16]</sup>将灰色系统理论用于地质灾害的中长期预测。

历史灾害险情数据,是多种不确定因素耦合作用的结果,能够客观反映近几年区域地质灾害的发育特征及分布规律。本文以陕西省为研究区,对全省地质灾害总体特征和分布规律进行归纳总结,并利用灰色系统理论建立地质灾害趋势预测模型,对未来3年全省地质灾害的发展趋势进行预测,为全省地质灾害防治与规划工作的宏观决策提供参考依据。

## 1 研究区概况

陕西省位于中国内陆腹地,地处东经 $105^{\circ}29' \sim 111^{\circ}15'$ 和北纬 $31^{\circ}42' \sim 39^{\circ}35'$ 。地势南北高、中间低,有高原、山地、平原和盆地等多种地形。境内由南到北自然地理呈明显分带性。北部为陕北高原,中部为关中平原,地势低平,南部由秦岭、大巴山组成陕南山地,地形起伏大。全省年降水量分布的主要特点是南多北少,由南而北递减<sup>[17]</sup>。

陕北高原黄土梁峁发育,沟壑纵横,水土流失严重,生态环境较脆弱。关中盆地以冲洪积平原、黄土台塬地貌、山前洪积扇、河流高阶地为主,黄土的垂直节理发育、湿陷性较强。陕南山地:以中、低山为主,板岩、片岩、页岩、千枚岩松散地层及第四系坡残积层、膨胀土分布广泛<sup>[18]</sup>。

## 2 地质灾害分布特征

地质灾害的形成和发育,取决于特定的自然环境和人类社会环境等诸多因素。陕西省整体地质环境脆弱,加之汛期强降雨、连续降雨较多以及频繁的人类工

程活动,对全省地质灾害的发育影响较为强烈,导致地质灾害易发,其中陕北黄土沟壑区和陕南山地山区是全国地质灾害高易发区和重点防范区(图1)。

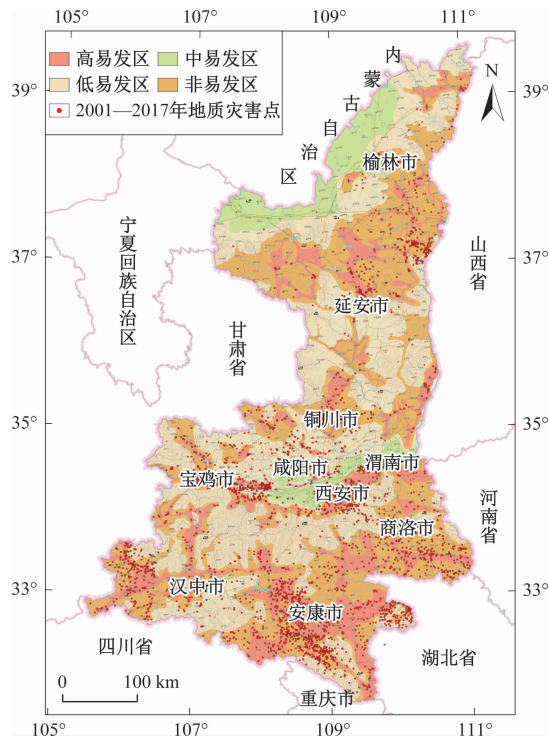


图1 陕西省地质灾害易发区及2001—2017年地质灾害分布图  
Fig. 1 Geological hazards in Shaanxi Province easily occurred zone and distribution from 2001 to 2017

### 2.1 时间分布特征

从年际分布来看,全省地质灾害的发生具有不确定性和变化的周期性,即每3~5年有一次较大波动(图2)。根据2001—2017年陕西省历史灾害数据,全省地质灾害发生数量总体呈波动下降的趋势,且以崩塌、滑坡灾害为主要地质灾害类型,近年来崩塌、滑坡发生起数之和占全省发生总数的76.91%。

近年来降水逐步成为诱发陕西省地质灾害的重要因素,全省地质灾害的发生主要集中在汛期(每年的6~9月)。但由于降水诱发的滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害常具有滞后性,即强降雨或连续降雨后的一段时间内仍为地质灾害的易发时段(图3)。例如2017年10月,受强降雨、连续降雨影响,陕西省共发生地质灾害61起,占全年地质灾害总数的40%以上<sup>[2]</sup>。

### 2.2 空间分布特征

从图4可以看出,陕南地区为全省地质灾害灾情最为严重的地区,尤其是安康市、商洛市和汉中市,地质灾害数量占全省的70%以上,为地质灾害重灾区;其次是关中地区和陕北地区。

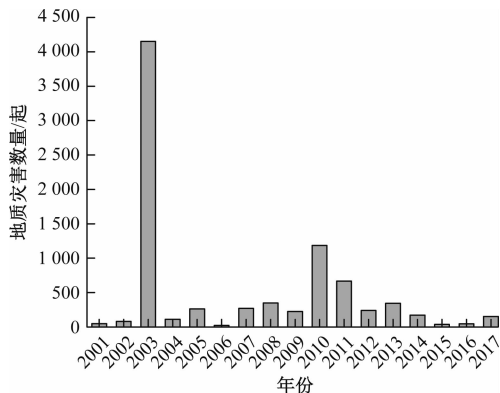


图 2 陕西省地质灾害灾情年际分布图

Fig. 2 Inter-annual distribution of geological hazards in Shaanxi Province

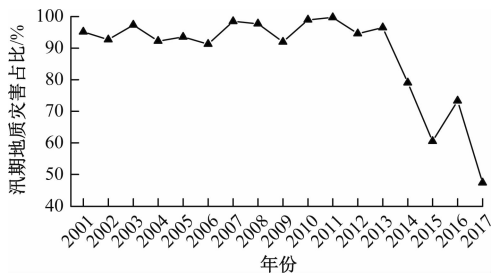


图 3 陕西省汛期地质灾害年际分布图

Fig. 3 Inter-annual distribution of geological hazards in flood season in Shaanxi Province

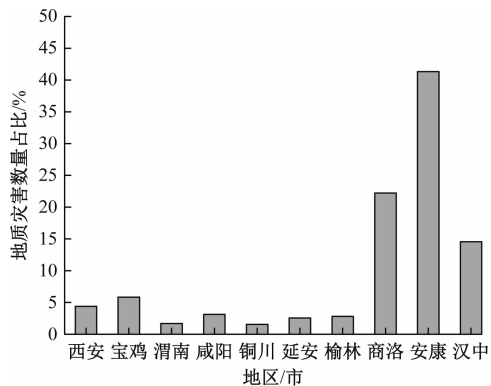


图 4 陕西省各地区地质灾害分布图

Fig. 4 Geological hazard distribution in various areas of Shaanxi Province

总的来看,陕北高原黄土崩塌、滑坡、地面塌陷等地质灾害多发以及人工边坡垮塌和冻融诱发的地质灾害多发。关中盆地黄土滑坡、地面塌陷、地裂缝等地质灾害比较发育。受地震活动的影响,致使陕南秦巴山区山体表层岩土体松动,在强降雨、连续降雨以及频繁的人类工程活动综合影响作用下,地质灾害隐患点增多、且分布密集,滑坡、崩塌、泥石流等突发性地质灾害

的发生几率较高<sup>[18]</sup>。

### 3 研究方法

灰色系统理论是我国学者邓聚龙于 1982 年创立的,以灰色模型 GM(1,1)为核心的模型体系,主要通过“部分”已知信息的生成、开发,实现对系统演化规律的正确描述,进而定量预测未来变化。相较于采用数理统计分析方法,该方法对样本数量的多少、样本有无规律都适用,而且计算方便<sup>[19]</sup>。

#### 3.1 灰色 GM(1,1)模型<sup>[20]</sup>

(1) 设一组原始数据为

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

式中:  $n$ ——数据个数。

(2) 对其作一次累加生成运算

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i); k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

可得新的数列为:

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)) \quad (3)$$

(3) 生成  $x^{(1)}$  的邻均值等权数列

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k-1) + 0.5x^{(1)}(k), k = 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

(4) 根据灰色理论对  $x^{(1)}$  建立关于  $t$  的白化形式的一阶一元微分方程 GM(1,1):

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (5)$$

式中:  $a$ ——发展系数;

$u$ ——灰色作用量。

(2) 对累加生成数据做均值生成  $B$  与常数项向量  $Y_n$ :

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

$$Y_n = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

(3) 用最小二乘法求解灰参数  $\hat{a}$ , 则

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \quad (7)$$

(4) 将灰参数  $\hat{a}$  代入式(5)进行求解,得

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}\right)e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (8)$$

(5)将上述结果累减还原,即可得到预测值:

$$\hat{x}^{(0)}(t+1) = \hat{x}^{(1)}(t+1) - \hat{x}^{(1)}(t) \quad (9)$$

### 3.2 灰色区间预测<sup>[20]</sup>

对于原始数据发生不规则波动的情形,通常难以找到合适的模型描述其变化趋势,因此无法对其未来变化进行准确的预测。此时,可以考虑其未来取值得变化范围,即灰色区间预测。

(1)设  $x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$  为原始序列,  $x_u^{(0)}$  是  $x^{(0)}$  的下缘点连线所对应得序列,  $x_s^{(0)}$  是  $x^{(0)}$  的上缘点连线所对应的序列。

(2)分别取  $x_u^{(0)}$  和  $x_s^{(0)}$  对应的时间响应式为  $x^{(1)}$  的下界函数和上界函数。

$$\bar{x}_u^{(1)}(t+1) = \left(x_u^{(0)}(1) - \frac{u}{a}\right)e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (10)$$

$$\bar{x}_s^{(1)}(t+1) = \left(x_s^{(0)}(1) - \frac{u}{a}\right)e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (11)$$

(3)可得  $x^{(1)}$  的取值域:

$$s = \{(t, X(t)) \mid X(t) \in \hat{X}_u^{(1)}(t), \hat{X}_s^{(1)}(t)\} \quad (12)$$

并称为  $x^{(1)}$  的包络区域。

## 4 预测过程

### 4.1 灰色区间预测

地质灾害的发生是一个变化的动态过程,年际的波动起伏较大。因此,本文采用灰色区间预测的方法预测未来一段时间地质灾害的总体趋势。由于灰色 GM(1,1)模型的预测精度受建模序列长短的影响,若选用的建模序列太短,则模型难以建立;反之序列过长,则系统误差增大,模型的预测精度降低。因此,本文选取 2003—2012 年 10 年间陕西省地质灾害灾情数据作为原始数据序列建立灰色区间预测模型(表 1)。

表 1 地质灾害发生数量的建模序列

Table 1 Sequence model of geological disasters

年份	序号	原始数据序列	上包络序列	下包络序列
2003	1	4 152	4 152	54.5
2004	2	44	3 728	44
2005	3	310	3 304	33.5
2006	4	23	2 880	23
2007	5	270	2 457	22
2008	6	348	2 033	21
2009	7	224	1 609	20
2010	8	1 185	1 185	19
2011	9	667	761	18
2012	10	240	337	17

通过对上、下包络序列分别建立上界函数和下界函数,满足进行灰色区间预测的四个同时成立的条件<sup>[14]</sup>,且其发展系数  $a$  均满足  $|a| < 0.3$ ,可用于 GM(1,1)模型中长期预测。为验证模型预测精度,建模完成后,利用 2013—2017 年地质灾害灾情数据进行验证,最后对未来 3 年全省地质灾害发生趋势进行预测(表 2),地质灾害灰色区间预测包络图(图 5)。

表 2 地质灾害发生数量的预测结果

Table 2 Interval prediction results of geological disasters

年份	预测区间(起/年)	基本预测值(起/年)
2013	[12,647]	337
2014	[10,554]	277
2015	[9,454]	227
2016	[8,373]	187
2017	[7,306]	153
2018	[6,251]	126
2019	[5,206]	103
2020	[5,169]	85

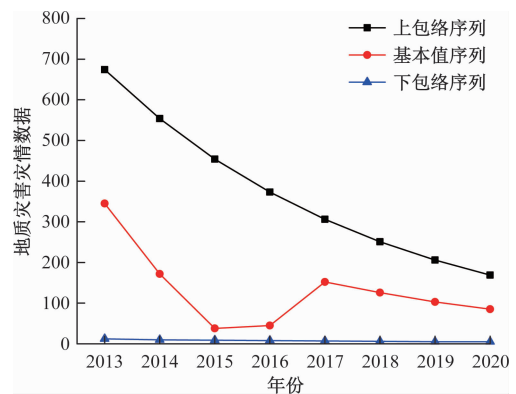


图 5 地质灾害区间预测包络图

Fig. 5 Interval prediction envelope of geological hazards

### 4.2 灰色灾变预测

灰色灾变预测实质上是异常值的预测,其任务是给出下一个或几个异常值出现的时间,以便人们提前准备,采取对策<sup>[20]</sup>。

地质灾害的发生具有动态的变化性,针对地质灾害的这一特征,本文以 2001—2017 年全省地质灾害发生数量作为基础序列,选取 2013—2017 年全省地质灾害发生数量的平均值  $\xi = 150$  作为上限异常值,根据灾变序列上限异常值以及相对应的灾变日期序列(表 3),通过对灾变日期序列建立灰色 GM(1,1)模型进行预测,若未来的某一年年度地质灾害发生数量超过判定值,则可认定该年为地质灾害的高发年。

表 3 灾变预测建模序列

Table 3 Sequence model of catastrophe

序号	年份	灾变上限 异常值 $X$	灾变日期 序列 $Q$
1	2003	4 152	2
2	2005	310	4
3	2007	270	6
4	2008	348	7
5	2009	224	8
6	2010	1 185	9
7	2011	667	10
8	2012	240	11
9	2013	345	12
10	2014	172	13
11	2017	152	16

根据上述 GM(1,1) 建模过程,得

$$\hat{q}(t+1) = 41.177 1e^{0.120 6t} - 39.177 1 \quad (13)$$

预测结果如下:

$\hat{q}(12) - \hat{q}(11) = 2, \hat{q}(13) - \hat{q}(12) = 2, \hat{q}(14) - \hat{q}(13) = 3$  近年来,地质灾害发生总体呈波动下降的趋势,针对其波动性,根据灰色灾变预测模型对未来地质灾害高发年的出现时间进行预测,其时间为 2019、2021 和 2024 年。

### 4.3 预测精度检验

通过建立灰色区间预测和灾变预测模型来预测未来时期陕西省地质灾害的总体趋势,采用均方差比值  $C$  对模型预测精度的检验(表 4)。均方差比值  $C$  越小,说明  $S_2$  小,  $S_1$  大,即残差方差小,原始数据方差大,说明残差比较集中,摆动幅度小,原始数据比较分散,摆动幅度大,所以模拟效果好要求  $S_2$  与  $S_1$  比值尽可能小<sup>[20]</sup>。由表 5 可见,各模型的预测精度均满足要求。

表 4 灰色系统理论模型精度检验等级

Table 4 Accuracy test gradation of theoretical grey system model

精度等级	一级	二级	三级	四级
指标临界值 $C_0$	0.35	0.50	0.65	0.80

表 5 各模型预测精度

Table 5 Prediction accuracy of each model

模型检验序列	上包络序列	下包络序列	灾变时间序列
均方差比值 $C_0$	0.011 4	0.032 4	0.008 0
是否满足 $C < C_0$	满足	满足	满足

## 5 结 论

(1) 未来一段时间内,陕西省地质灾害仍以雨季崩塌、滑坡为主;强降雨和人类工程活动仍是地质灾害

发生的重要影响因素。

(2) 以 2003—2012 年 10 年地质灾害灾情数据作为原始数据序列,建立灰色区间预测模型,用 2013—2017 年 5 年地质灾害灾情数据,验证模型预测精度,对未来一段时间地质灾害发生趋势预测结果表明,陕西省未来一段时间地质灾害高发年为 2019、2021 和 2024 年。

### 参考文献:

[ 1 ] 宁奎斌,李永红,何倩,等. 2000—2016 年陕西省地质灾害时空分布规律及变化趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报,2018,29(1):93-101.  
NING Kuibin, LI Yonghong, HE Qian, et al. The spatial and temporal distribution and trend of geological disaster in Shaanxi Province from 2000—2016[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(1):93-101.

[ 2 ] 陕西省地质环境监测总站. 2001—2016 年陕西省地质灾害灾情报告[R]. 西安:陕西省地质环境监测总站,2001-2016.  
Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring. 2001—2016 year report of geological disasters in Shaanxi Province [R]. Xi'an: Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, 2001-2016.

[ 3 ] 张业成. 近 40 年中国地质灾害基本情况与主要特征[J]. 灾害学, 1992(4):50-54.  
ZHANG Yecheng. Basic situation and major features of geological disasters in China in recent 40 years[J]. Journal of Catastrophology, 1992(4):50-54.

[ 4 ] 张春山,张业成,胡景江,等. 中国地质灾害时空分布特征与形成条件[J]. 第四纪研究,2000,20(6):559-566.  
ZHANG Chunshan, ZHANG Yecheng, HU Jingjiang, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and forming conditions of Chinese geological disasters [J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(6):559-566.

[ 5 ] 殷跃平,李媛. 区域地质灾害趋势预测理论与方法[J]. 工程地质学报,1996,4(4):75-79.  
YIN Yueping, LI Yuan. Theory and method for prediction of regional geo-hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(4):75-79.

[ 6 ] 王雁林,赵法锁,郝俊卿. 汶川地震触发陕西省境内地质灾害灾情特征[J]. 工程地质学报,2011,19(1):52-58.  
WANG Yanlin, ZHAO Fasuo, HAO Junqing. Characteristic of geo-hazard in Shaanxi Province by Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(1):52-58.

- [ 7 ] 强菲,赵法锁,段钊. 陕南秦巴山区地质灾害发育及空间分布规律 [ J ]. 灾害学, 2015, 30 ( 2 ): 193 - 198.
- QIANG Fei, ZHAO Fasuo, DUAN Zhao. Development and spatial distribution of geological disasters in Qinling-Data Mountains of south Shaanxi [ J ]. Journal of Catastrophology, 2015, 30 ( 2 ): 193 - 198.
- [ 8 ] 刘传正,李铁锋,程凌鹏,等. 区域地质灾害评价预警的递进分析理论与方法 [ J ]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4) : 1 - 8.
- LIU Chuazheng, LI Tiefeng, CHENG Linpeng, et al. A method by to analyse four parameters for assessment and early warning on the regional geohazards [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(4) : 1 - 8.
- [ 9 ] 陆显超,卿展晖,范拓. 广东省地质灾害预测分区研究 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 ( S2 ): 3405 - 3411.
- LU Xianchao, QING Zhanhui, FAN Tuo. Study on prediction of geological disaster distribution in Guangdong Province [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 ( S2 ): 3405 - 3411.
- [ 10 ] 李永红,向茂西,贺卫中,等. 陕西汉中汉台区地质灾害易发性和危险性分区评价 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3) : 107 - 113.
- LI Yonghong, XIANG Maoxi, HE Weizhong, et al. Assessment of the susceptible degree and degree of risk of geological hazard in Hantai district of Shaanxi [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(3) : 107 - 113.
- [ 11 ] 姚学祥,徐晶,薛建军,等. 基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16 ( 4 ): 97 - 102.
- YAO Xuexiang, XU Jing, XUE Jianjun, et al. Geochemical abnormal features and preliminary assessment on environment quality in Meishan basin of the Changxing County, Zhejiang Province [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16 ( 4 ): 97 - 102.
- [ 12 ] 李晓红,靳晓光,亢会明,等. GM(1,1)优化模型在滑坡预测预报中的应用 [ J ]. 山地学报, 2001, 19 ( 3 ): 265 - 269.
- LI Xiaohong, JIN Xiaoguang, KANG Huiming, et al. Application of GM ( 1, 1 ) majorized model to simulation-forecast of landslide [ J ]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(3) : 265 - 269.
- [ 13 ] 王朝阳,许强,范宣梅,等. 灰色新陈代谢 GM(1,1)模型在滑坡变形预测中的应用 [ J ]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2) : 108 - 111.
- WANG Chaoyang, XU Qiang, FAN Xuanmei, et al. A discussion of the water content and index characteristics of the red clay in Guizhou [ J ]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36 ( 2 ): 108 - 111.
- [ 14 ] 游中胜,何丽. 基于序列包络带的 GM(1,1)区间预测建模条件研究 [ J ]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(1) : 150 - 154.
- YOU Zhongsheng, HE Li. Based on the sequence of the envelope with the GM ( 1, 1 ) interval prediction modeling conditions [ J ]. Journal of Southwest University ( Natural Science Edition ), 2015, 37 ( 1 ): 150 - 154.
- [ 15 ] 姚俊英,朱红蕊,南极月,等. 基于灰色理论的黑龙省暴雨洪涝特征分析及灾变预测 [ J ]. 灾害学, 2012, 27(1) : 59 - 63.
- YAO Junying, ZHU Hongrui, NAN Jiyue, et al. Analysis of flood and disaster forecast in Heilongjiang Province based on Grey Theory [ J ]. Journal of Catastrophology, 2012, 27 ( 1 ): 59 - 63.
- [ 16 ] 陈春利,贺凯,温铭生,等. 基于灰色系统理论的长江经济带地区地质灾害趋势预测研究 [ J ]. 地质力学学报, 2016, 22(3) : 706 - 713.
- CHEN Chunli, HE Kai, WEN Mingsheng, et al. Trend prediction research of geological hazard in the Yangtze Economic Zone based on Grey System Theory [ J ]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(3) : 706 - 713.
- [ 17 ] 杨喜成. 陕西地质灾害特点 [ J ]. 陕西地质, 2001, 19(2) : 75 - 81.
- YANG Xicheng. Characteristics of geological hazards in Shaanxi Province [ J ]. Geology of Shaanxi, 2001, 19 ( 2 ): 75 - 81.
- [ 18 ] 赵法锁,王雁林,胡志平,等. 陕西省地震灾区地质灾害发育与分布规律研究报告 [ R ]. 西安:长安大学, 2012.
- ZHAO Fasuo, WANG Yanlin, HU Zhiping, et al. Study report of Geo-hazard development and distribution in the disaster area of Shaanxi Province caused by Wenchuan earthquake [ R ]. Xi ' an: Chang ' an University, 2012.
- [ 19 ] 邓聚龙. 灰理论基础 [ M ]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002: 218 - 238.
- DENG Julong. The elements of grey system [ M ]. Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 2002: 218 - 238.
- [ 20 ] 刘思峰,谢乃明. 灰色系统理论及其应用 [ M ]. 北京:科学出版社, 2013: 97 - 169.
- LIU Sifeng, XIE Naiming. The Grey System Theory and its application [ M ]. Beijing: Science Press, 2013: 97 - 169.