

尚志,李己华,张璐,等. 2024. 阿富汗地震 R/S 分形特征及地震活动性分析. 中国地震, 40(2): 447~457.

# 阿富汗地震 R/S 分形特征及地震活动性分析

尚志 李己华 张璐 申利远 刘婷婷  
孙茂好 王莘 黄淑芬 李静

中国消防救援学院,北京 102202

**摘要** 地震的发生具有非线性特征,分形理论能够刻画地震时空分布特征及其变化过程。本文基于 R/S 分析方法确定阿富汗主要地震带的分形特征,利用 ARIMA 模型对兴都-库什山地震带可能发生的年度最大震级进行预测。R/S 分析表明,兴都-库什山地震带 Hurst 指数为 0.9125,地震活动记忆周期为 8 年;苏莱曼山地震带 Hurst 指数为 0.7281,地震活动记忆周期为 9 年。兴都-库什山和苏莱曼山地震带地震活动的变化趋势与历史变化一致,且兴都-库什山地震带的趋势延续性比苏莱曼山地震带更为显著。ARIMA 模型预测结果显示,2022—2026 年兴都-库什山地震带可能发生的年度最大震级分别为  $M_b$ 6.2、 $M_b$ 6.1、 $M_b$ 5.8、 $M_b$ 5.8 和  $M_b$ 6.1。

**关键词:** 阿富汗地震 R/S 分形 Hurst 指数 ARIMA 模型 地震活动性分析

[文章编号] 1001-4683(2024)02-0447-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地震具有突发性和不确定性,地震时空分布具有不规则性,其孕育过程、发震机制具有复杂的非线性和自组织特征(陈运泰,2009)。因此,非线性理论被广泛用于探讨地震时空分布的分形结构及演化过程。在广延耗散系统自组织作用下,板块间不断碰撞、摩擦和挤压,应力不断积聚,当应力达到临界状态时爆发释放,并可能发生一系列突变事件(如地震、火山等)。幂律规则是系统自组织临界状态的行为标志,灾变规模与分布函数满足幂律分布关系。Mandelbrot 提出的分形理论是现代非线性科学中一个非常重要的研究领域,揭示了现实世界中广泛存在的幂律分布规律,已成为解决事物复杂非线性演化过程的桥梁,在数学、物理学、材料学、地质勘探以及计算机和信息科学等领域均得到广泛的应用(Mandelbrot,1967;许强等,1997;陈颢等,1998;倪化勇等,2005;李信富等,2007)。

分形理论作为一门研究非线性过程的新兴学科,能够以全新的角度看待地震过程,为地震研究提供新的方法和途径,给地震学的发展注入了巨大活力,因而在地震分析中具有一定的理论优势(朱传镇,1991;朱华等,2011)。陈颢等(1997)通过物理分形方法研究不同地区地震丛集的分形特征。郭玉贵等(2005)基于山东沿海及近海地区地震的时间分形特征,论

[收稿日期] 2023-11-07 [修定日期] 2024-02-22

[项目类别] 应急管理部救援协调和预案管理局项目(2023)资助

[作者简介] 尚志,男,1991年生,讲师,主要从事地震防灾减灾研究。E-mail:shangzhi6609@163.com

李己华,通讯作者,男,1969年生,教授,主要从事地震防灾减灾研究。E-mail:784889038@qq.com

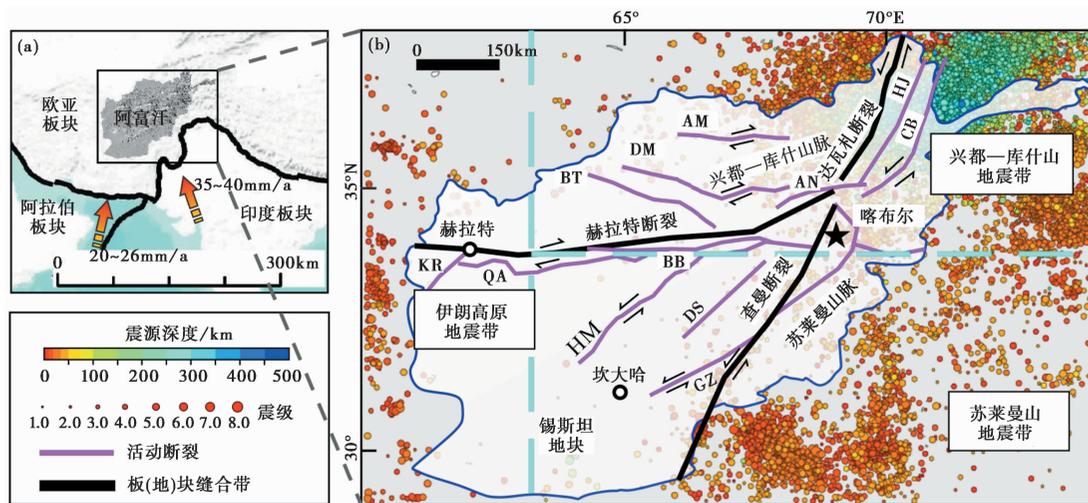
述了地震时间分数维与构造活动的内在联系,并对分形理论在地震预报中的应用进行了探讨。Kagan(2007)利用分形理论研究震源的空间分布,认为在特定时空范围和一定标度区内,地震现象是分形的,具有尺度不变性特征。徐伟进等(2014)分析了蒙古国及其周边地区地震目录的空间分形特征,揭示了蒙古国地区地壳介质结构的各向异性程度和应力分布的空间差异。Ram等(2022)利用分形方法解释了喜马拉雅山脉东段孕震结构的时空变化特征,为理解区域强震发生规律提供了理论基础。综上所述,分形理论在地震机理研究及地震预报中的应用非常广泛。随着分形理论不断完善和发展,其在地震学中的应用将会不断拓展,尤其是将分形理论与其他方法有机结合的复合应用前景更加广阔。

R/S分析(Rescaled Range Analysis)是用于识别多尺度变化的常用分形方法,其能在看似随机的时间序列中挖掘稳定的长程相关性,在长时间尺度数据分析预测上具有较大优势,已经被广泛应用于水文地质学、灾害学、大气科学等领域(陈鹏等,2008;肖宇等,2015;史凯等,2018;冷崇标等,2023)。ARIMA模型是一种基于时间序列当前值与滞后值动态依存关系的预测模型,具有数据需求少、结构简洁、模型构建和训练速度快等特点,尤其适用于时间序列分析和预测,近年来已被广泛用于大气、地下水的环境指标分析和地震预测研究(成都理工大学,2022)。阿富汗复杂的区域构造环境使其成为全球地震活动最为频繁、受灾最为严重的国家之一。对阿富汗主要地震带的发震特征及地震活动性进行分析,有利于捕捉地震发生的周期性变化规律,从而在地震来临前采取措施,降低地震可能造成的危害。本文基于阿富汗1950—2021年历史地震数据,采用R/S分形方法研究阿富汗地震时间序列分形特征,通过ARIMA模型预测2022—2026年兴都—库什山地震带的年度最大震级。

## 1 区域构造背景

大地构造上,阿富汗位于欧亚板块、阿拉伯板块以及印度板块的交汇部位,属于特提斯构造域的组成部分(图1(a))。印度板块和阿拉伯板块分别以35~40mm/a和20~26mm/a的速率向欧亚板块俯冲(DeMets et al, 2010; Sella et al, 2002)。在板块汇聚的动力学背景下,伊朗地块和阿富汗地块连接处形成了绵延近千千米的SN向右旋滑动断裂系统,即伊朗高原造山带(刘志成等,2023)。阿富汗被区域性逆掩断层分割成一系列近SN向相间排列的隆起区和沉降区(张艺琼等,2024),境内广泛发育活动构造,东南部的苏莱曼山脉和北部的兴都—库什山脉均为构造变形强烈的活动山系,分布一系列NE、NW和EW走向的走滑断裂(图1(b))。查曼断裂、赫拉特断裂和达瓦札断裂为阿富汗境内主要的走滑断裂,在断裂活动的影响下,阿富汗境内形成了三大典型地震集中区。

查曼断裂位于苏莱曼山脉北麓,属于左旋走滑断层,作为欧亚板块和印度板块走滑挤压板块边界的一部分,该断裂是阿富汗最大和最活跃的走滑断层之一,由一组平行或近于平行的走滑断层组成(Wheeler et al, 2005; Shnizai et al, 2020)。断层活动沿着断层线形成了醒目的地表破坏,InSAR数据显示查曼断裂滑动速率为8mm/a(Wheeler et al, 2005)。赫拉特断裂位于兴都—库什山脉南麓,属于右旋走滑断层,是阿富汗中部地缝合线的北部边界,航空和卫星图像分析显示其滑动速率为2~3mm/a(Shareq, 1981)。达瓦札断裂位于兴都—库什山脉东麓,为左旋走滑断层,该断裂向北延伸至塔吉克斯坦,具有最多的现代断层活动证据,在全新世滑动了多达120m,晚更新世滑动了约300m,其滑动速率分别为12mm/a和2mm/a



注: (a) 阿富汗大地构造位置图(据 Shnizai 等(2024)), 印度和阿拉伯板块移动速度据 DeMets 等(2010) 和 Sella 等(2002); (b) 阿富汗主要走滑断裂系统(Wheeler et al, 2005), 断裂缩写: AM-Alburz Mormul 断裂, AN-Andarab 断裂, BB-Bande Bayan 断裂, BT-Bande Turkestan 断裂, CB-Central Badakhshan 断裂, DS-Darafshan 断裂, HJ-Henjan 断裂, HM-Helmand 断裂, GZ-Gardez 断裂, KR-Kaj Rod 断裂, QA-Qarghanav 断裂; 地震活动资料据 International Seismological Centre(2024)。

图 1 阿富汗及周边地区构造背景

(Trifonov, 1978)。除了上述活动性比较显著的区域性断裂外, 阿富汗境内还存在大量其他次级活动断裂(图 1(b))。

阿富汗现代地壳运动强烈, 地震活动频繁, 不同能量、频度及深度的地震活动分布在各个地区。如图 1(b) 所示, 浅源地震主要集中在阿富汗南部和西部的板块边界, 深源地震则集中分布在兴都—库什山脉东段。根据构造变形、地形地貌、地震活动等特征, 将阿富汗划为 3 个主要地震带, 分别为兴都—库什山、苏莱曼山和伊朗高原地震带。兴都—库什山地震带位于阿富汗东北部, 其地震活动最为强烈, 主要受控于赫拉特和达瓦札活动断层, 地震震源深度和震级自西向东增加(图 1(b)), 1950—2021 年共发生 6.0 级以上地震 74 次。苏莱曼山地震带位于阿富汗西南部, 区内地震较为活跃, 主要受控于查曼活动断层系统, 1950—2021 年区内发生 6.0 级以上破坏性地震 8 次, 多为浅源地震。西部伊朗高原地震带的地震活动区受控于伊朗高原造山带, 区内地震相对不活跃, 1950—2021 年发生 6.0 级以上破坏性地震 2 次。

## 2 资料来源及分析

### 2.1 资料来源

研究区位于  $60^{\circ}\text{E} \sim 74^{\circ}\text{E}$ 、 $29^{\circ}\text{N} \sim 38^{\circ}\text{N}$  范围内, 覆盖阿富汗及周边国家部分地区。所使用的地震资料源自国际地震中心(International Seismological Centre, ISC) 复核后的地震目录, 共收集了 1950—2021 年的 24303 条地震数据, 包含众多机构不同震级标度的地震记录。目录中包含 31 家地震观测机构提供的地震数据, 地震条目数量排前 8 位的机构信息如表 1

表 1 地震目录中样本量前 8 位的机构震级标度

序号	机构名称	样本量	占总数比例	主要震级标度
1	国际地震中心 (ISC)	15426	63.5%	$M_b$
2	哈萨克斯坦国家核中心 (NNC)	4924	20.3%	$M_b$
3	澳大利亚国际数据中心 (IDC)	1795	7.4%	$M_b$
4	巴基斯坦气象局 (QUE)	642	2.6%	$M_b/M$
5	美国国家地震信息中心 (NEIC)	436	1.8%	$M_b$
6	美国国家地震服务处 (NEIS)	255	1.0%	$M_b$
7	印度地球科学部国家地震学中心 (NDI)	216	0.9%	$M/M_L/M_D$
8	俄罗斯科学院地球物理调查局 (MOS)	208	0.9%	$M_b/M$

所示,其中采用最多的震级标度为  $M_b$  (占比 94.4%)。

本研究将阿富汗分为兴都—库什山、苏莱曼山和伊朗高原 3 个地震带,各地震带震级分布如表 2 所示。

表 2 阿富汗主要地震带地震次数统计

地震带	$M < 2.0$	$2.0 \leq M < 3.0$	$3.0 \leq M < 4.0$	$4.0 \leq M < 5.0$	$5.0 \leq M < 6.0$	$6.0 \leq M < 7.0$	$7.0 \leq M < 8.0$	合计
兴都—库什山	10	1132	12411	7491	707	69	5	21825
苏莱曼山	0	2	1049	909	143	8	0	2111
伊朗高原	0	2	205	124	34	2	0	367

### 2.2 震级完备性分析

最小完整震级  $M_c$  (Magnitude of completeness) 通常被定义为在一定的时空范围内能够被 100% 记录到的最低震级 (Woessner et al, 2005)。由于地震数量相对有限,所以需要考虑历史地震和现代地震,因记录能力不同、最小地震不同,导致地震监测结果可信度低、地震信息完整性差,往往需要通过地震目录来分析最小完整震级,即完备震级。地震发生规模与频度满足幂律分布,本文基于地震幂律分布规则,采用 G-R (Gutenberg-Richter) 公式 (Gutenberg et al, 1944) 分析地震目录的完整性,G-R 公式表示为

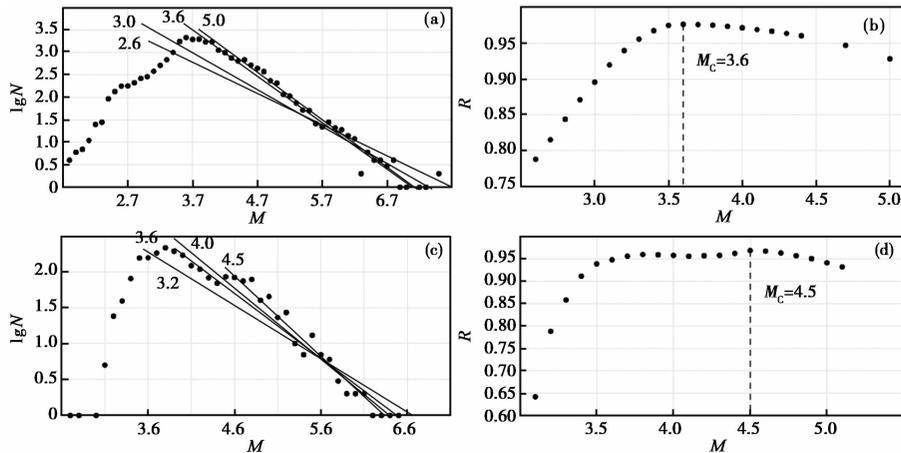
$$\lg N = a - bM \tag{1}$$

式中,  $M$  为地震震级,  $N$  为研究区内震级大于等于  $M$  的地震次数,  $a$  和  $b$  为统计常数。

根据 G-R 公式的方法原理,以 0.1 级为滑动步长,将每一个震级尺度内的地震数据分别进行统计,即可得到研究区地震活动的震级频度关系曲线。然后,根据式 (1) 取不同的震级下限  $M_i (i=1, 2, 3 \dots)$ ,用最小二乘法逐一进行拟合,得到不同的拟合相关系数  $R$ ,  $R$  值最大时对应的震级即为  $M_c$  (谢卓娟等, 2012)。采用上述方法分别对兴都—库什山、苏莱曼山地震带的震级完备性进行检验,拟合过程如图 2 所示。伊朗高原地震数据较少,故不对其进行震级完备性检验。

兴都—库什山地震带震级频度关系曲线如 2(a) 所示,由图可见,随着最小震级的增加,所得拟合曲线的斜率逐步增大,  $R$  值则是先增大后减小,当  $M_c = 3.6$  时,  $R$  值达到最大 (图 2(b)),故认为 3.6 级以下的地震数据是不完整的。因此,将 3.6 级作为兴都—库什山

地震带完备震级的最小震级,即原始地震数据中震级在 3.6 级以上的数据是符合此次研究要求的,最终选取研究样本数据量共 16048 条。苏莱曼山地震带震级频度关系曲线如 2(c) 所示,由图可见随着最小震级的增加,所得拟合曲线的斜率逐步增大,当  $M_c=4.5$  时,  $R$  值最大(图 2(d))。因此,将 4.5 级作为苏莱曼山地震带完备震级的最小震级,最终选取的研究样本数据量共 511 条。



(a) 兴都—库什地震带震级-频度图; (b) 兴都—库什地震带拟合相关系数  $R$  随  $M$  取值变化示意图;  
(c) 苏莱曼山地震带震级-频度图; (d) 苏莱曼山地震带拟合相关系数  $R$  随  $M$  取值变化示意图

图 2 研究区震级完备性检验

### 3 研究方法

#### 3.1 R/S 分析

地震的发生具有规律性和随机性双重性质。R/S 分析是一种非线性分析方法,经 R/S 分析得到的 Hurst 指数被广泛应用于地震结构的时间分形研究,作为判断时间序列数据特征的指标(Hurst et al, 1965; 苟长义等, 2009; 汪超飞, 2014)。R/S 分形步骤如下:

定义一个随机时间序列为  $\xi(t)$ , 对于任何正整数  $\tau$ , 定义该序列的均值系列  $\langle \xi \rangle_\tau$  为

$$\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi(t), \tau = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

定义累计偏差序列  $X(t, \tau)$  为

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau), t = 1, 2, 3, \dots, \tau \quad (3)$$

其中,  $\xi(u)$  为随机时间序列中的样本值。

累计偏差  $X(t, \tau)$  中的最大值与最小值之差为极差,则定义极差序列  $R(\tau)$  为

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau), \tau = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

再定义标准均方差序列  $S(\tau)$  为

$$S(\tau) = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

以  $R/S$  代表  $R(\tau)/S(\tau)$ , 研究表明, 对于不同的  $\tau$ , 无量纲数  $R/S$  满足如下经验关系

$$R/S \approx (a\tau)^H \quad (6)$$

式中,  $a$  为统计常数,  $H$  称为 Hurst 指数, 可看作极差、标准差序列分形结构的维数, 相应的统计方法称为  $R/S$  分析方法。

对公式(6)两边同时取对数运算, 即

$$\ln \frac{R(\tau)}{S(\tau)} = H \ln a + H \ln \tau \quad (7)$$

通常, 在  $\ln \frac{R(\tau)}{S(\tau)}$  和  $\ln \tau$  的双对数坐标系下做散点图, 用最小二乘法得到散点的拟合曲线, 该曲线的斜率即为  $H$  值。

$H$  值越接近于 1, 表明其趋势持续性越强, 呈现长期记忆的特点,  $V(n)$  是度量这种长期记忆性的一种统计量, 表示为

$$V(n) = \frac{(R/S)_n}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

当  $H > 0.5$  时, 时间序列呈现持续性,  $V(n)$  曲线向上倾斜; 当  $H = 0.5$  时, 统计量  $V(n)$  曲线呈平坦分布; 当  $H < 0.5$  时, 时间序列呈现反持续性,  $V(n)$  曲线向下倾斜。因此, 可以将  $V(n)$  单调性变化的分界点作为时间序列持续性消失的时刻, 进而得到时间序列平均循环周期。

### 3.2 ARIMA 模型

ARIMA( $p, d, q$ ) 全称为差分自回归移动平均模型, 是指将非平稳时间序列经过差分运算转化为平稳时间序列后, 再拟合 ARIMA 模型。其中 AR 是自回归, I 为单整阶数, MA 为移动平均,  $p$  为自回归项,  $q$  为移动平均项数,  $d$  为非平稳时间序列转化为平稳时间序列所做的差分次数。建模具体步骤如下:

(1) 对原序列进行平稳性检验, 如非平稳, 则对序列进行差分变换, 直至其平稳为止。

(2) 通过分析原序列或者差分序列的自相关函数(ACF)或偏自相关函数(PACF), 根据其截断和拖尾特征, 确定模型的阶数, 从而对 ARIMA 模型进行识别。

(3) 对模型进行参数显著性检验和模型有效性检验。

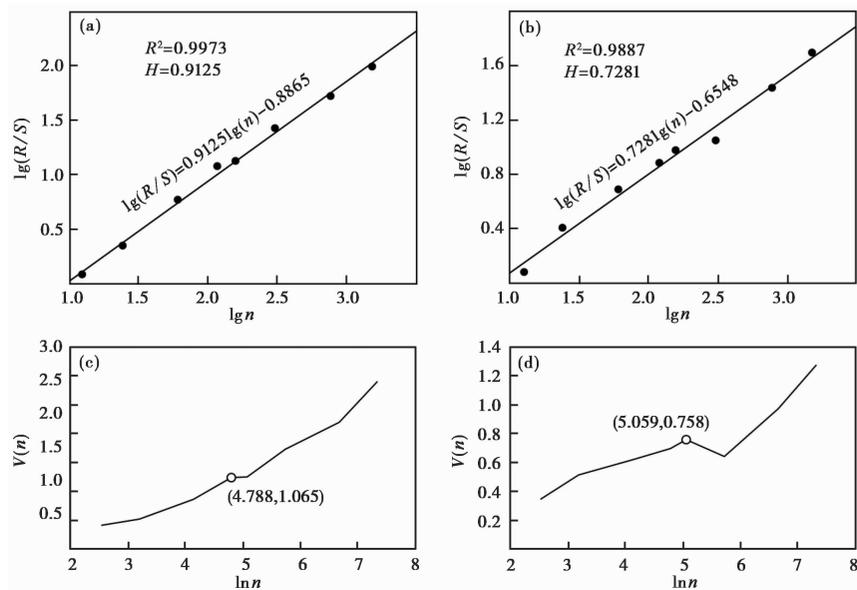
(4) 利用最优模型对未来数据进行预测。

## 4 结果与讨论

### 4.1 R/S 分形特征

由于伊朗高原地震数据较少, 对其进行统计学分析意义不大, 故仅对地震数据丰富的兴都—库什山和苏莱曼山地震带进行  $R/S$  分形分析。地震具有多种不同的分形特征, 如时间分形、空间分形、地震能量分形, 但与严格的数学分形不同, 地震分形是一种统计意义上的分形(李顺群等, 2004)。地震学中经典的震级-频度关系说明地震活动具有标度不变性, 在时间分布上具有自仿射分形特性, 即分形体局部经放大或缩小后与整体相似(李娟等, 2001)。因此, 可通过分形几何学尺度变换思想对时间标度进行变换, 基于短期资料对未来地震发生情况进行估计。本文以 1 年为时间窗统计兴都—库什山和苏莱曼山地震带 1950—2021 年

的地震频度,采用 R/S 方法分析地震发生频度时间序列。在地震频度时间序列 R/S 分析图(图 3)中,R/S 比值与时间标度( $N$ )存在幂指数关系,拟合曲线的斜率即为 Hurst 指数( $H$ 值)。



(a) 兴都—库什山地震带 R/S 分析结果; (b) 苏莱曼山地震带 R/S 分析结果;  
(c) 兴都—库什山地震带  $V(n)$  统计图; (d) 苏莱曼山地震带  $V(n)$  统计图

图 3 地震频度时间序列 R/S 分析结果和  $V(n)$  统计图

$H$  值介于  $0 \sim 1$  之间,当  $H > 0.5$  时,时间序列具有长程相关性,将来的变化将继承过去的趋势, $H$  值越接近于 1,这种趋势性就越强;当  $H < 0.5$  时,时间序列的长程相关性表现为将来的发展趋势与过去相反,且  $H$  值越接近 0,这种反趋势性就越强(汪超飞,2014)。因此, $H$  值能揭示时间序列中的趋势性成分,且能表达趋势的强弱,进而反映系统状态复杂变化的内在规律。对于满足独立泊松分布的时间序列, $H$  值为 0.5(Hurst et al,1965)。在分析地震时间序列时,常假定地震事件间相互独立且服从泊松分布,但李娟等(2001)研究发现,全球范围内不同构造背景、不同时空范围的地震频度时间序列的  $H$  值大多数在 0.72 左右,表明在时空特征上地震的发生不是完全相互独立的随机事件,而是存在一定的“记忆”性。

对地震频度数据进行分析,分别取  $n$  为 3、4、6、8、9、12、18、24,按式(2)~式(7),利用 MATLAB 对地震频度时间序列分析计算,拟合出代表 Hurst 指数的双对数曲线(图 3)。由图可见,兴都—库什山地震带的  $H$  值为 0.9125(图 3(a)),苏莱曼山地震带的  $H$  值为 0.7281(图 3(b))。基于上述结果,可判断兴都—库什山和苏莱曼山地震带的地震活动整体变化将与过去的变化趋势一致。兴都—库什山地震带的 Hurst 指数相比苏莱曼山地震带更接近 1,说明兴都—库什山地震带地震发生的趋势延续性比苏莱曼山地震带更加显著。

根据公式(8)计算统计量  $V(n)$ ,绘制  $V(n)-\ln n$  曲线,利用其拐点确定平均循环周期。兴都—库什山地震带  $V(n)$  曲线总体呈增长趋势,表明地震频度时间序列具有长期记忆性及持续性;由图 3(c)可见拐点坐标为 (4.788, 1.065),曲线拐点处地震活动的持续性消失,并

开始新的周期,计算得到  $n$  值为 8,故记忆周期为 8 年。苏莱曼山地震带  $V(n)$  曲线同样呈增长趋势,由图 3(d) 可见拐点坐标为 (5.059, 0.758), 对应的  $n$  值为 9, 表明苏莱曼山地震带地震活动记忆周期为 9 年。

### 4.2 地震活动性分析

1950—2021 年,兴都—库什山地震带发生 6 级以上地震 74 次,苏莱曼山地震带发生 6 级以上地震 8 次,兴都—库什山地震带的地震强度和频度均比苏莱曼山地震带更加显著。因此,本文着重对兴都—库什山地震活动进行分析。R/S 分析结果表明兴都—库什山地震带的各地震事件间存在相关性,故地震数据适用于 ARIMA 预测模型。

由于研究区并非每年都会发生 6 级以上地震,用年度最大震级替代缺省数据。以兴都—库什山地震带完备震级目录为基础,筛选出历年最大震级建立时间序列(图 4)。时序图显示序列为非平稳性序列,因此需要对其进行差分处理。经二次差分处理后,序列变为平稳序列,因此差分次数  $d$  取值为 2。然后,制作差分数据自相关系数(ACF)图和偏自相关系数(PACF)图,ACF 图像在第 2 阶呈现截尾状态(图 5(a)), PACF 图像呈现拖尾状态(图 5(b)),因此确定  $q$  值为 2。由 R/S 分析可知兴都—库什山地震带地震活动记忆周期为 8 年,为消除周期性的影响,进行滞后 8 期的差分处理,故自回归项系数  $p$  取值为 8。

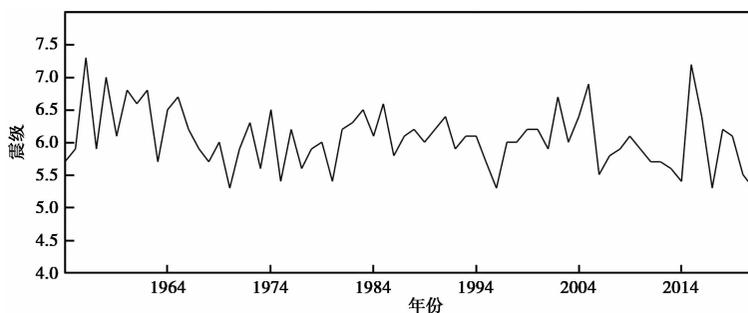
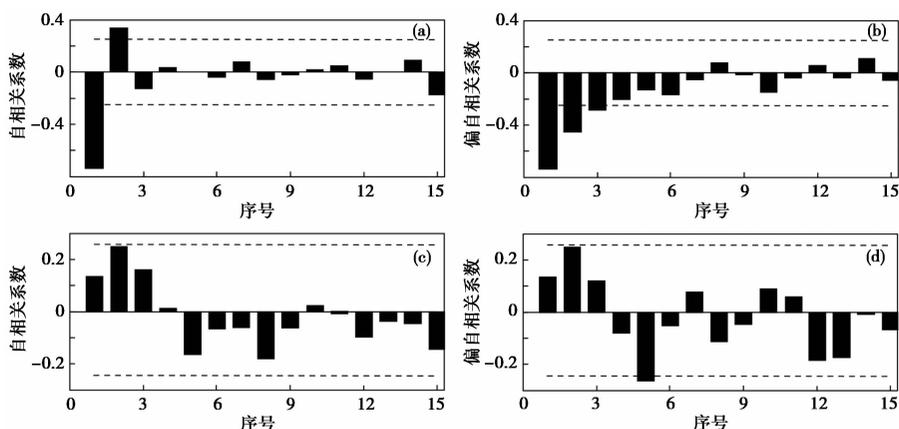


图 4 兴都—库什山地震带最大震级原始数据时间序列



(a) 最大震级时间序列自相关系数(ACF)图; (b) 最大震级时间序列偏自相关系数(PACF)图;  
(c) ARIMA 模型残差自相关系数(ACF)图; (d) ARIMA 模型残差偏自相关系数(PACF)图

图 5 时间序列自相关系数和偏自相关系数图

以1954—2016年的地震数据为训练样本建立 ARIMA 模型,以 2017—2021 年地震活动数据为测试样本,检验基于 R/S 分析的 ARIMA 模型预测地震活动的精度,继而预测兴都—库什山地震带年度最大震级地震活动情况。由残差的自相关和偏自相关图(图 5(c)、5(d))可知,自相关系数和偏自相关系数全部落入 2 倍标准差范围以内,表明残差序列是白噪声序列。对残差进行显著性检验, $p$  值为 0.142,同样表明残差属于白噪声序列。说明 ARIMA(8,2,2)模型能够克服最大震级时间序列随机波动问题,可用于预测未来可能发生的年度最大震级。由表 3 可知,基于 R/S 分析建立的 ARIMA 模型预测结果与实际值的误差较小。预测结果显示,2022—2026 年兴都—库什山地震带发生地震的年度最大震级分别为  $M_b$ 6.2、 $M_b$ 6.1、 $M_b$ 5.8、 $M_b$ 5.8 和  $M_b$ 6.1。

表 3 ARIMA 模型预测结果

年份	实际最大震级 ( $M_b$ )	模型预测震级 ( $M_b$ )	绝对误差	相对误差
2017	5.3	5.8	0.5	0.09
2018	6.2	5.3	0.9	0.14
2019	6.1	5.7	0.4	0.06
2020	5.5	6.3	0.8	0.14
2021	5.3	6.4	1.1	0.20

## 5 结论

本文对阿富汗历史地震时间序列数据进行 R/S 分析,根据 Hurst 指数确定了阿富汗境内主要地震带的分形特征,利用 ARIMA 模型对地震活动性进行分析,研究表明:

(1) R/S 分析结果显示兴都—库什山地震带 Hurst 指数为 0.9125,地震活动记忆周期为 8 年;苏莱曼山地震带 Hurst 指数为 0.7281,地震活动记忆周期为 9 年。兴都—库什山地震带和苏莱曼山地震带的地震活动整体变化将与过去的变化趋势一致,且兴都—库什山地震带的地震趋势延续性比苏莱曼山地震带更为显著。

(2) 基于 R/S 分析的 ARIMA 模型能够克服最大震级时间序列的随机波动问题,可用于最大震级预测。预测 2022—2026 年兴都—库什山地震带发生地震的年度最大震级分别为  $M_b$ 6.2、 $M_b$ 6.1、 $M_b$ 5.8、 $M_b$ 5.8 和  $M_b$ 6.1。

**致谢:** 本文研究数据来自国际地震中心 (<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>),数据处理得到了汪超飞高级工程师的帮助,审稿专家对论文修改提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

## 参考文献

- 陈鹏,李旭宏,孙华灿. 2008. 基于分形理论的交通事分析. 公路交通科技, **25**(3):130~133.
- 陈颢,陈凌. 1998. 分形几何学. 北京:地震出版社.
- 陈颢,吴如山,陈凌,等. 1997. 地震丛集的分形新方法——物理分形. 中国地震, **13**(2):106~113.
- 陈运泰. 2009. 地震预测:回顾与展望. 中国科学:(D 辑), **39**(12):1633~1658.
- 成都理工大学, 2022-09-21[2022-11-29]. 一种基于 ARIMA 模型的地震预测方法:中国, CN 115407388A.
- 苟长义,郑永冰,王菁. 2009. 我国东部强震时间序列的分形结构及 R/S 分析. 天津师范大学学报(自然科学版), **29**(1):

25~28.

- 郭玉贵,王红霞,邓志辉,等. 2005. 山东沿海及近海地震分形分析. 地球物理学进展, **20**(1):155~159.
- 冷崇标,张辉,曾智辉,等. 2023. 湖北及周边地区地震活动分形特征与 R/S 分析. 科学技术创新, (14):89~92.
- 李娟,陈颢. 2001. 地震活动性参数的变尺度(R/S)分析. 地震学报, **23**(2):143~150.
- 李顺群,张吉明,朱朝艳,等. 2004. 考虑持时作用的地震能量表达式. 辽宁工程技术大学学报, **23**(3):306~308.
- 李信富,李小凡,武晔. 2007. 分形理论在地震学中的应用研究. 地球物理学进展, **22**(2):411~417.
- 刘志成,徐伟,王继,等. 2023. 伊朗活动构造发育特征. 震灾防御技术, **18**(3):518~535.
- 倪化勇,刘希林. 2005. 自然灾害发生时间序列的分形特征及 R/S 分析. 自然灾害学报, **14**(6):37~41.
- 史凯,刘春琼. 2018. 时间序列分形方法在大气环境中的应用. 北京:化学工业出版社,1~175.
- 汪超飞. 2014. 云南省地震时空分布分形特征与地震活动性关系研究. 硕士学位论文. 昆明:昆明理工大学.
- 肖宇,谢淑云,王明达,等. 2015. 青藏高原班公错与达则错水温时间序列分形特征. 地质科技情报, **34**(6):200~206.
- 谢卓娟,吕悦军,彭艳菊,等. 2012. 东北地震区小震资料完整性分析及其对地震活动性参数的影响研究. 中国地震, **28**(3):256~265.
- 许强,黄润秋. 1997. 地质灾害发生频率的幂律规则. 成都理工学院学报, **24**(增刊 I):91~96.
- 徐伟进,高孟潭. 2014. 蒙古国及其周边地区地震分形维度及  $b$  值研究. 地震工程学报, **36**(1):75~79.
- 张艺琼,计智锋,尹微,等. 2024. 变克拉通化对盆地构造-沉积-油气成藏作用的响应:以阿富汗-塔吉克盆地为例. 地质科学, **59**(3):819~830.
- 朱传镇. 1991. 对地震分形特征的几点认识. 地震研究, **14**(2):165~170.
- 朱华,姬翠翠. 2011. 分形理论及其应用. 北京:科学出版社,1~232.
- DeMets C, Gordon R G, Argus D F, 2010. Geologically current plate motions. *Geophys J Int*, **181**(1):1~80.
- Gutenberg R, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bull Seism Soc Amer*, **34**(4):185~188.
- Hurst H E, Black R P, Simaika Y M. 1965. Long-Term Storage: An Experimental Study. London: Constable, 1~155.
- International Seismological Centre. 2024. <http://www.isc.ac.uk/>.
- Kagan Y Y. 2007. Earthquake spatial distribution; the correlation dimension. *Geophys J Int*, **168**(3):1175~1194.
- Mandelbrot B. 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, **156**(3775):636~638.
- Sella G F, Dixon T H, Mao A. 2002. REVEL: a model for Recent plate velocities from space geodesy. *J Geophys Res Solid Earth*, **107**(B4):ETG 11-1~ETG 11-30.
- Shareq A. 1981. Geological and geophysical investigations carried out in Afghanistan over the period 1972-1979. In: Gupta H K, Delany F M. Zagros, Hindu Kush, Himalaya-Geodynamic Evolution. Washington: American Geophysical Union Geodynamics, 75~86.
- Shnizai Z, Matsushi Y, Tsutsumi H. 2020. Late Pleistocene slip rate of the Chaman fault based on  $^{10}\text{Be}$  exposure dating of offset geomorphic surfaces near Kabul, Afghanistan. *Tectonophysics*, **795**:228593.
- Shnizai Z, Walker R, Tsutsumi H. 2024. The Chaman and Paghman active faults, west of Kabul, Afghanistan: Active tectonics, geomorphology, and evidence for rupture in the destructive 1505 earthquake. *J Asian Earth Sci*, **259**:105925.
- Ram K T, Harihar P, Daya S. 2022. Spatio-temporal distribution of earthquake occurrence in Eastern Himalaya and vicinity ( $26^{\circ}\text{N}$  -  $31^{\circ}\text{N}$  and  $87^{\circ}\text{E}$  -  $98^{\circ}\text{E}$ ) based on  $b$ -value and fractal dimension. *Appl Geophys*, **19**(3):458~469.
- Trifonov V G. 1978. Late Quaternary tectonic movements of western and central Asia. *GSA Bull*, **89**(7):1059~1072.
- Wheeler R L, Bufe C G, Johnson M L, et al. 2005. Seismotectonic map of Afghanistan, with annotated bibliography. Reston, Virginia: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Woessner J, Wiemer S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(2):684~698.

## R/S Fractal Characteristics and Activity Analysis of Afghanistan Earthquake

Shang Zhi, Li Jihua, Zhang Lu, Shen Liyuan, Liu Tingting,

Sun Maoyu, Wang Ping, Huang Shufen, Li Jing

China Fire and Rescue Institute, Beijing 102202, China

**Abstract** Earthquake occurrence exhibits nonlinear characteristics, and fractal theory effectively describes the temporal and spatial distribution and evolution of earthquakes. Using R/S analysis, this paper determines the fractal characteristics of the major seismic belts in Afghanistan and employs the ARIMA model to predict the annual maximum magnitude of the Hindu-Kush seismic belt. The Hurst index of the Hindu-Kush seismic belt is 0.9125, indicating a seismic activity memory period of 8 years. For the Sulaiman seismic belt, the Hurst index is 0.7281, with a memory period of 9 years. The variation trends of seismic activity in both the Hindu-Kush and Sulaiman seismic zones align with historical patterns, though the trend continuity is more pronounced in the Hindu-Kush zone. According to the ARIMA model, the predicted maximum annual magnitudes for the Hindu-Kush seismic belt from 2022 to 2026 are  $M_b 6.2$ ,  $M_b 6.1$ ,  $M_b 5.8$ ,  $M_b 5.8$ , and  $M_b 6.1$ , respectively.

**Keywords:** Afghanistan earthquake; R/S fractal characteristics; Hurst index; ARIMA model; Earthquake activity analysis