

投影寻踪自回归模型和应变积累释放模型 在新疆地震趋势预测中的应用

王琼, 曲延军

(新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:本研究以5年为时间窗, 1年为滑动步长构建自变量序列, 建立了新疆各研究区的投影寻踪自回归中长期地震预测模型; 同时应用应变积累释放模型探讨了各区不同时段应变积累与释放特征, 依据各区的应变积累水平及其地震活动分期特征判定未来地震趋势。综合分析两个模型的地震趋势预测意见, 给出了新疆各研究区未来5年(2006—2010年)的地震危险性判定意见。

关键词: 投影寻踪自回归模型; 应变积累释放模型; 地震趋势预测; 新疆

中图分类号: P315.75

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2006)03-0229-06

Application of Project Pursuit Auto-regression Model and Strain Accumulating and Releasing Model to Earthquake Trend Prediction in Xinjiang

WANG Qiong, QU Yan-jun

(Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China)

Abstract: A mid-long term earthquake prediction model is formed using project pursuit auto-regression model, with independent variable sequence in 5 years of time window and 1 year of time interval, for different study regions of Xinjiang. Meanwhile the characters of strain accumulation and release during different periods in the study regions are discussed with strain accumulating and releasing model, and the future seismic trend are judged according to strain accumulating level and period character of seismicity in the study regions. After synthetically analyzing both seismic trend conclusions from two models, the earthquake hazard judgment within future 5 years (2006—2010) for every study regions in Xinjiang are given.

Key words: Project pursuit auto-regression model; Strain accumulating and releasing model; Earthquake trend prediction; Xinjiang

0 引言

投影寻踪自回归模型将长于处理非线性、非正态数据分析的投影寻踪技术(PP)与时间序列分析中的自回归模型(AR(K))相结合^[1], 采用降维和多重平滑技术^[2], 实现在低维子空间寻找数据的内在规律、描述其结构特征, 从而解决非正态、非线性高维数据分析及因子相关的问题。李祚泳等^[3]用投影寻踪自回归模型预测大气污染物浓度, 对成都市SO₂和NO_x的外符检验结果较理想。笔者^[4]将投影

寻踪自回归模型应用于年度和年中地震危险性趋势预测, 提供了量化的震级预测, 具有一定的应用价值。

马宏生等^[5]提出对于某一相对统一和完整的体系, 在一个或几个地震活动轮回中, 应变能的积累与释放应该是总体等量的。对于一个孕震区, 当某时段累积应变能远大于释放的应变能并达到岩石破裂强度时, 大地震将会发生。基于上述认识, 提出应变

收稿日期: 2006-03-30

基金项目: 新疆科技攻关项目(200333116)

作者简介: 王琼(1973—), 女(汉族), 山东高青人, 副研究员, 主要从事地震综合预报研究工作。

积累释放模型,用能量震级经验公式近似表述地震产生的应变释放量。选取包含数个完整的地震活跃—平静期时段内的地震求得研究区应变积累的平均速率,由此可得研究区任意时段内平均应变累积量,再扣除实际地震应变释放量,就可得到研究区应变积累和释放变化特征及其当前应变变量。黄忠贤^[6]利用应变积累释放曲线的方法讨论了中国各主要地震区带的平静—活跃现象及其与构造运动之间的联系。马宏生等^[5]应用应变积累释放模型,研究了中国大陆各活动地块分区的地震活动,探讨了未来各区的地震活动趋势。

本研究基于5年尺度的预测目标,建立了投影寻踪自回归中长期地震预测模型,从而对新疆各研究区未来5年的地震趋势进行预测。同时,应用应变积累与释放模型分析各研究区应变积累和释放过程,依据当前应变水平,结合地震活动平静—活跃分期现象,分析各研究区的地震危险性,判定未来地震趋势。依据上述两个模型得出的趋势预测结果,综合判定新疆各研究区未来5年(2006—2010年)的地震危险性。

1 研究方法

1.1 投影寻踪自回归模型(PPAR(K))

将PP理论与自回归模型结合起来,在各投影方向上通过不断对实测数据平滑逼近建立岭函数,构造出投影寻踪自回归模型。 k 阶投影寻踪自回归模型表述为^[1]

$$X_t = \sum_{j=1}^M \beta_j F_j(Z_t) \quad (1)$$

式中

$$Z_t = A_{j1} X_{t-1} + A_{j2} X_{t-2} + \cdots + A_{jk} X_{t-k}$$

$$t = 1, 2, \cdots, N; \quad j = 1, 2, \cdots, M$$

X_t 为时间序列 $\{X_t\}$ 在 t 时刻的估计值; $X_{t-1}, \cdots, X_{t-k}$,为时序预报因子; $A_j = (A_{j1}, A_{j2}, \cdots, A_{jk})^T$ 为第 j 个投影方向,且 $\|A_j\| = 1$; F_j 为岭函数; β_j 为第 j 个岭函数 F_j 的权重系数; M 为岭函数的个数; k 为自回归阶数。

PPAR(K)模型定义的极小化准则为

$$L_2 = E[X_t - \sum_{j=1}^M \beta_j F_j(A_{j1} X_{t-1} + A_{j2} X_{t-2} + \cdots + A_{jk} X_{t-k})]^2 = \min \quad (2)$$

PP降维技术,解决了“维数祸根”问题;极小化准则,客观地获取时间序列 $X_{t-1}, X_{t-2}, \cdots, X_{t-k}$ 中的有用的信息;采用一系列岭函数的“和”来逼近目

标函数,灵活地改变岭函数的个数以减少模型误差,从而更客观地反映数据本身的结构特征。

模型参数的优化和确定:岭函数的形式依据最小二乘原理使投影寻踪回归损失最小来估计^[2]。参数优化采用三层分组迭代方法,首先对第 M 项岭函数系数和岭函数进行优化,即用迭代法计算出线性系数 A_m ,然后计算第 M 项岭函数的横坐标值 T_m , $T_m = \sum_{i=1}^l A_{mk} \cdot X_k$ 。利用超级滤波器对 $f_m - T_m$ 数据逐段线性化形成光滑的岭函数对 $f_m - T_m$ (多重光滑处理),求得岭函数的数值解 f_m 。

建模时,岭函数的个数 M 可依据回归拟合效果及外符结果,反复调整。模型中阶数 k 的确定取决于实际数据时间序列的特性,可根据自回归模型中不同阶的权重以及各阶与时间序列 $\{X_t\}$ 的相关性初步确定阶数,最终由AIC准则决定^[7]。

对于震级检验,约定预测值与实际地震大小的绝对误差不超过0.5级或相对误差不大于10%为检验合格。

1.2 应变积累释放模型

由能量震级经验公式计算能量:

$$\log E = 1.5M_s + 4.8 \quad (3)$$

开平方可近似得一次地震释放的应变变量 $\sqrt{E}$ 。根据研究区地震活动的特点,计算某研究区某一研究时段的总应变释放量 $\sum \sqrt{E_i}$,则可得某一时间间隔内平均应变释放速率^[5]

$$\dot{\epsilon} = \sum \sqrt{E_i} / T \quad (4)$$

T 为总研究时段。如果 T 包含数个完整的地震活跃—平静期,那么应变的积累和释放总体上是平衡的。 $\sqrt{E_i}$ 表示研究区第 i 次地震的应变释放量。故由式(4)可得研究区某时段应变积累水平:

$$\epsilon(t) = \dot{\epsilon}t - \sum_{i=1}^{n(t)} \sqrt{E_i} \quad (5)$$

$\dot{\epsilon}t$ 为时段 t 内应变积累量; $\sum \sqrt{E_i}$ 为研究时段中实际地震应变释放量; $n(t)$ 为时刻 t 前发生的地震个数。 $\epsilon(t)$ 时序变化反映了研究区应变积累与释放的阶段性特征,表征了地震活动的平静和活跃分期变化特点,从而可定量地判定研究区的地震危险性。

2 计算结果及分析

2.1 投影寻踪自回归模型

2.1.1 研究区和资料选取

本研究选取的自变量为每个自然年发生的最大地震,以5年为时间窗,1年为滑动步长构建自变量

序列,建立投影寻踪自回归中长期地震预测模型,从而实现了研究区未来 5 年的地震趋势预测。

模型公式为

$$X_t = \sum_{j=1}^M \beta_j F_j (A_{j1} X_{t-1} + A_{j2} X_{t-2} + \cdots + A_{jk} X_{t-k}) \quad (6)$$

式中 X_{t-k} 为序列中 k 年前的自变量值; X_t 为序列中第 t 个 5 年窗内的估计值。

结合新疆地质构造和历史地震活动特点,本研究选择(1)天山地区;(2)南天山地区;(3)南天山西段;(4)南天山东段;(5)北天山西段和(6)伽师地区作为研究区(图 1)。天山地区主要指新疆境内部分,包含南、北天山地区;南天山地区包含南天山东、西段;北天山地区包含北天山西段和东段,由于东段监测能力较差、地震活动相对较弱,所以研究中仅选取北天山东段的部分地区。选取的研究资料时段为 1900 至 2005 年 5 月 30 日。

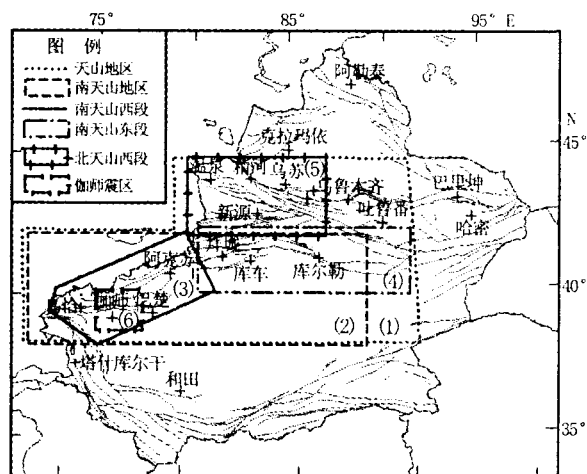


图 1 研究区范围示意图

Fig. 1 Sketch map of the study regions in Xinjiang.

2.1.2 计算结果及分析

应用 PP 自回归模型(PPAR)建立中长期地震预测模型。各研究区所建模型和对未来 5 年(2001—2006)的预测结果见表 1;分步预测结果见表 2;模型回归拟合和预测结果见图 2。

PP 自回归模型预测结果表明天山地区、南天山地区和南天山西段未来 5 年可能发生 7 级地震。其中南天山西段的数值预测值相对较高,这与建模样本不同有关,南天山西段的地震活动性高于北天山地区和南天山东段,故三个区域的预测结果不尽相同。南天山东段未来 5 年可能发生 6 级地震,该区自 1979 年库车 $M_s 6.0$ 地震后,已 26 年未发生 6 级地震,6 级地震危险性逐步增大。北天山地区未来 5

年可能发生 6 级地震,自 1973 年精河 $M_s 6.0$ 地震后,该区已 33 年未发生 6 级地震,6 级地震的危险性增大。伽师地区在经历了 1997—1998 年伽师强震群活动和 2003 年巴楚 $M_s 6.8$ 强震活动过程后,地震活动水平逐步降低,未来 5 年可能发生 5 级地震。

表 1 各研究区模型与结果

研究区	建模时段	建模样本数/个	预测检验样本数/个	未来 5 年预测结果
天山地区	1933—2000	68	6	可能发生 7 级地震
南天山地区	1935—2000	66	6	可能发生 7 级地震
南天山西段	1935—2000	66	6	可能发生 7 级地震
南天山东段	1957—2000	44	6	可能发生 6 级地震
北天山西段	1929—2000	72	6	可能发生 6 级地震
伽师地区	1971—2000	30	6	可能发生 5 级地震

表 2 PP 自回归模型预测结果

区域	预测时段	目前已发生的最大地震/ M_s	数值预测结果/ M_s	预测震级 (2006—2010 年)/ M_s
天山	2001—2005	6.8	7.0	6.8
	2002—2006	6.8	6.8	
	2003—2007	6.8	6.9	
	2004—2008	6.3	7.0	
	2005—2009	6.3	6.8	
	2006—2010		6.8	
南天山	2001—2005	6.8	6.8	6.7
	2002—2006	6.8	6.9	
	2003—2007	6.8	6.6	
	2004—2008	6.3	6.7	
	2005—2009	6.3	6.6	
	2006—2010		6.7	
南天山西段	2001—2005	6.8	6.8	7.0
	2002—2006	6.8	7.0	
	2003—2007	6.8	7.0	
	2004—2008	6.3	7.1	
	2005—2009	6.3	7.1	
	2006—2010		7.0	
南天山东段	2001—2005	4.9	4.0	5.6
	2002—2006	4.9	5.1	
	2003—2007	4.9	5.8	
	2004—2008	4.9	4.8	
	2005—2009	4.9	5.9	
	2006—2010		5.6	
北天山西段	2001—2005	5.4	5.8	6.0
	2002—2006	5.4	5.8	
	2003—2007	5.4	5.3	
	2004—2008	5.1	5.4	
	2005—2009	4.7	5.6	
	2006—2010		6.0	
伽师	2001—2005	6.8	6.8	5.3
	2002—2006	6.8	6.4	
	2003—2007	6.8	6.8	
	2004—2008	4.5	5.9	
	2005—2009	4.5	4.8	
	2006—2010		5.3	

2.2 应变积累释放模型

2.2.1 研究区及资料的选取

研究区范围的选取同 2.1 部分。新疆 1900 年以来强震活动划分为 5 个活跃期和 4 个平静期,第

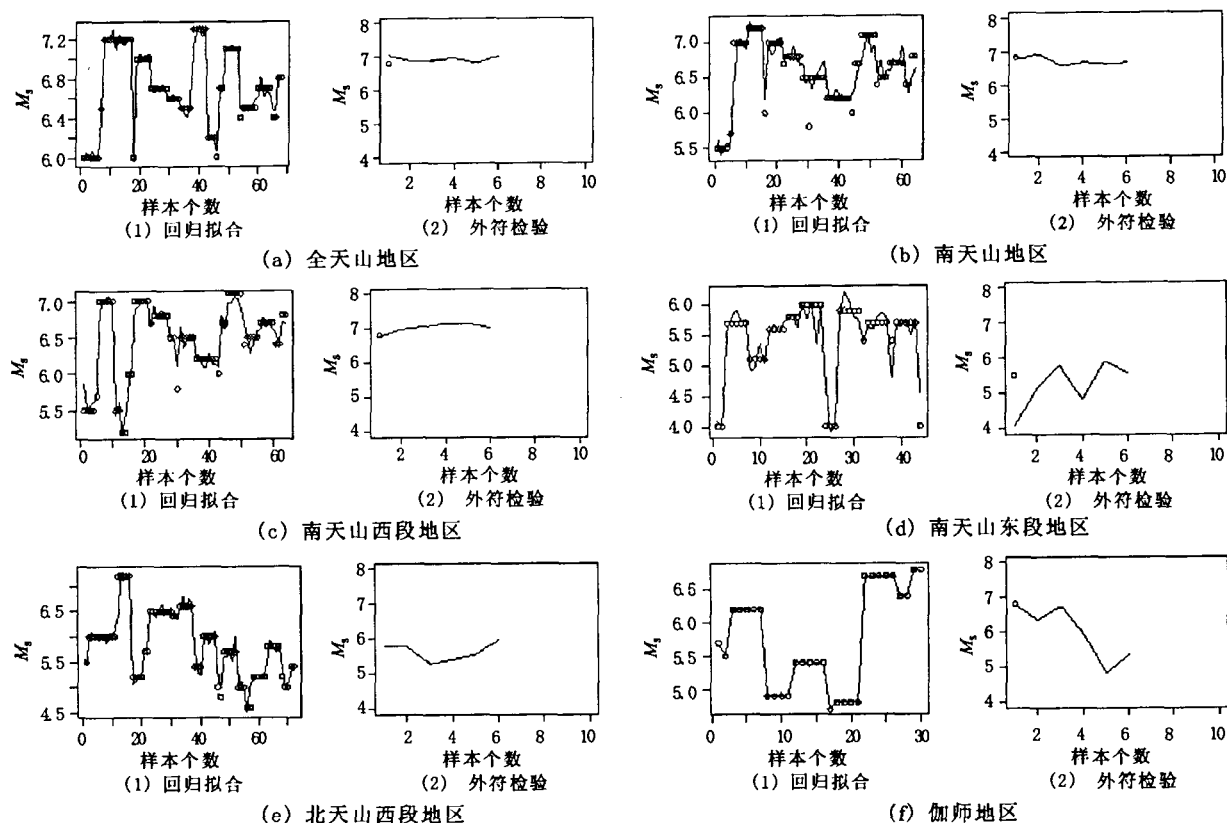


图2 各研究区投影寻踪自回归模型回归拟合和外符检验结果

Fig. 2 Regression fitting and predictive test of PPAR model in the research regions of Xinjiang.

—活跃期为1902—1914年,第二活跃期1924—1933年,第三活跃期1944—1955年,第四活跃期为1974—1985年,1996年以来为第五活跃期。考虑到资料的完备性,结合新疆强震活动分期特点,并依据各研究区的地震活动分期特征(最好包含数个完整的地震平静—活跃期),选取各研究区包含两个以上平静—活跃期的时段作为研究时段,计算各研究区平均应变积累速率。求算各研究区的应变积累量时,为保证应变积累时段完整,研究起始时间应依据各研究区地震活动特征和地震目录的完备性,选择地震活动相对平静的时段。

2.2.2 计算结果及分析

各研究区应变积累与释放时序变化曲线见图3(a)~(f)。

北天山西段地区选择1915年以来 $M_s \geq 5.0$ 地震研究其应变积累与释放时序变化。应变积累与释放曲线表明(图3(a)):1922—1944年近23年时间北天山西段地区应变处于稳步加速积累状态;1944—1962年近19年应变处于释放阶段,期间1944年发生了乌苏7.2级地震,积累的应变快速释放;1922—1962年应变从积累到释放大约占用了41年时

间。1962—2005年该区近44年应变一直处于逐步积累状态,超过前一个地震活动期持续时间,目前已积累了较高的应变能(5.913×10^7 J,折合震级为7.2),未来5年有发生7级地震的可能性。

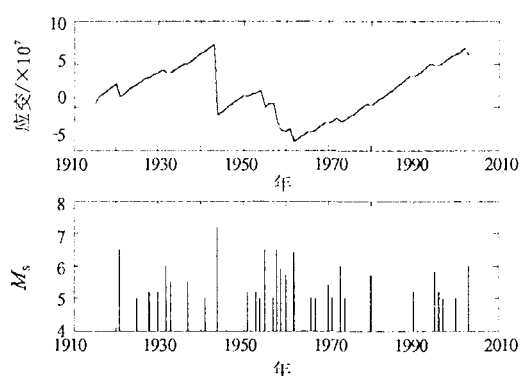
南天山东段选择1956年以来 $M_s \geq 5.0$ 地震。图3(b)表明:南天山东段1960—1972年近13年时间5级以上地震活动较平静,应变处于持续加速积累状态;1972—1979年近6年5级以上地震活跃,应变进入快速释放阶段;整个应变积累与释放过程持续了近20年(1960—1979年)。1980—1986年该区近7年5级以上地震活动再度平静,应变处于加速积累状态;1987—1999年约13年该区5级以上地震较活跃,处于应变释放阶段,至1999年该区域应变达到较低值;应变积累与释放过程自1980至1999年也持续了近20年。2000年至今该区5级地震平静,应变能一直处于快速积累状态,目前已积累了较高的应变能(应变能已达 1.429×10^7 J,折合震级为6.3),依据该区前一地震活动轮回应变积累与释放的准周期特点和目前的积累速率,未来5年有发生6级地震的可能性。

南天山西段选择1934年以来 $M_s \geq 5.5$ 地震。

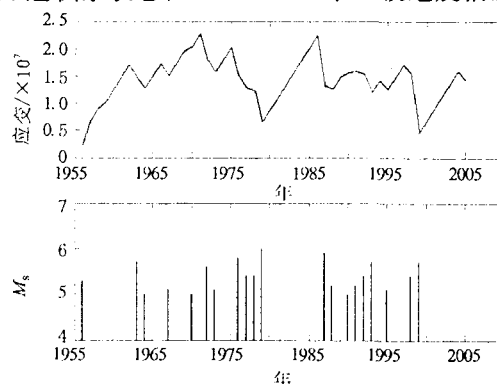
图 3(c)表明:南天山西段 1934—1955 年 12 年内 6 级以上地震活动平静,应变处于加速积累状态;1955—1961 年 7 年内 6 级以上地震较活跃,期间乌恰发生 2 次 7 级地震,应变一直处于大释放阶段;1962—1973 年 12 年内 6 级以上地震活动平静,该区应变处于逐步加速积累状态;1974 年乌兹别里山口发生 7.3 级地震,应变快速释放。1934—1974 年该区应变积累与释放过程持续了近 30 年。1975—2005 年近 30 年应变处于边积累边释放状态,1985 年乌恰 7.4 级地震和 1997—1998 年伽师强震群应变释放均不充分。1985 年乌恰地震之前该区应变能出现

近 10 年的加速积累;1997—1998 年伽师强震群前 10 余年内该区应变能积累速率较慢。该区中强震前存在 10 年左右的应变积累期,但 1998—2003 年该区应变积累速率加快,10 年左右的应变积累和释放的准周期性打破,发生了 2003 年巴楚—伽师 6.8 级地震,其应变能释放不彻底。目前该区应变能处于高值状态(应变能已达 2.165×10^8 J,折合震级为 7.9),未来 5 年有发生 7 级地震的可能性。

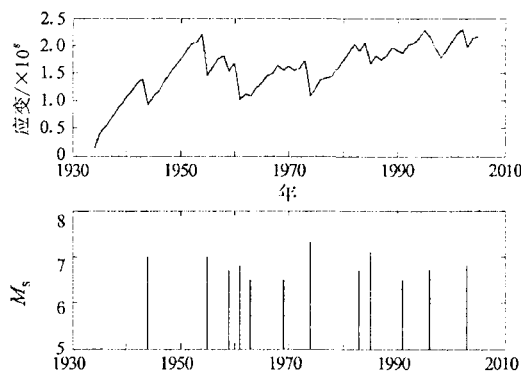
南天山地区选择 1924 年以来 $M_s \geq 5.5$ 地震。图 3(d)表明:南天山地区 1928—1944 年应变处于加速积累状态;1944—1963 年 6 级地震活跃,处于



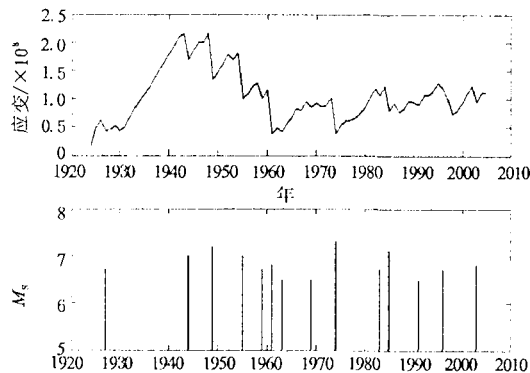
(a) 北天山西段



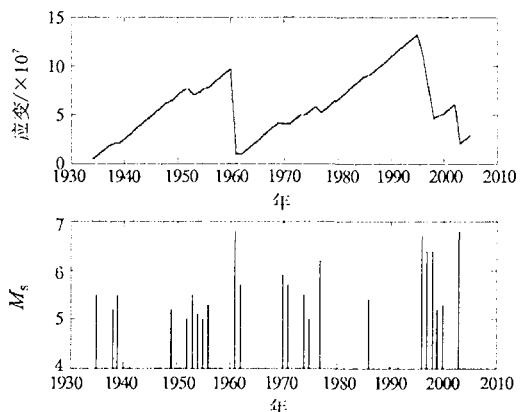
(b) 南天山东段



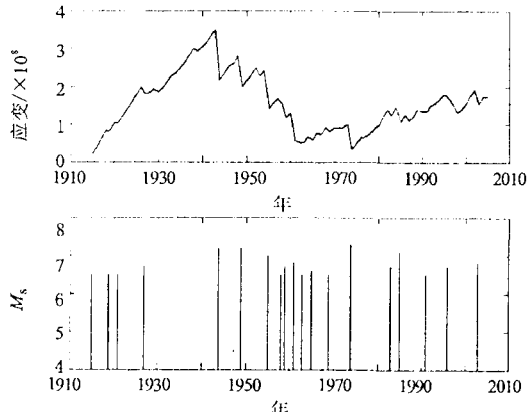
(c) 南天山西段



(d) 南天山地区



(e) 伽师地区



(f) 天山地区

图 3 新疆各研究区应变积累与释放曲线及 $M-t$ 图Fig. 3 Curve of strain accumulation and release and $M-t$ diagrams in the research regions of Xinjiang.

应变释放阶段,期间发生了1944年乌恰7.0级地震、1949年轮台7.2级地震、1955年乌恰7.0级地震,至1963年巴楚震群该区应变释放较彻底,应变值达到较低值;1928—1963年应变从积累到释放近35年。1964—2005年该区近40年应变处于边积累边释放的缓慢积累状态,期间1974年乌兹别里山口7.3级地震、1985年乌恰7.1级地震和1997—1998年伽师强震群前应变均出现过10年尺度的稳定加速积累状态,其中1985年乌恰7.1级地震和1997—1998年伽师强震群应变释放不充分。1998—2003年该区出现相对较快(5年)的应变加速积累,之后发生的2003年巴楚—伽师6.8级地震应变释放不彻底。目前南天山地区应变积累和释放过程已长于前—地震活动轮回约35年的变化特征,其应变积累水平为 1.122×10^8 J(折合震级为7.5),未来5年有可能发生7级地震。

伽师地区选择1934年以来 $M_s \geq 5.0$ 地震。图3(e)表明:伽师地区1934—1961年27年内地震活动较平静,应变处于加速积累状态,1961年巴楚震群的发生使得该区应变释放较彻底,应变降到较低水平;1963—1995年33年内5.5级以上地震活动平静,应变处于持续快速积累状态,应变达到较高水平;1997—1998年伽师强震群的发生使得该区大部分应变能得以释放,剩余应变能为 4.647×10^7 J(折合震级为7.0),表明此时该区应变释放并不完全;1998—2003年该区应变能再次出现小幅的加速状态,2003年巴楚—伽师发生了 $M_s 6.8$ 地震,此次地震的发生使得该区应变能释放较充分,剩余应变能为 2.976×10^7 J(折合震级为6.7)。依据前述该区约30年应变积累和释放准周期特征,认为未来5年有发生6级地震的可能性,但成组发生强震的可能性较小。

天山地区选择1934年以来 $M_s \geq 5.0$ 地震。图3(f)表明:1915—1944年近30年间天山地区一直处于应变加速积累阶段;此后的20年即1944—1965年应变处于大释放阶段;1965年至今的30余年应变处于边积累边释放的逐步积累过程,期间发生了1974年乌恰7.3级地震,震后应变能处于较低水平;此后应变处于快速积累状态,1985年发生乌恰7.1级地震,此次地震应变释放并不彻底;1985年至1996年应变能继续逐步积累,1997—1998年伽师强震群的发生部分缓解了高应变状态,但释放不充分;2003年巴楚6.8级地震前应变出现短期加速积累,震后应变能仍处于较高的水平,其应变积累

水平达 1.738×10^8 J(折合震级为7.8)。与前—地震活动轮回的应变积累过程相比,目前该区应变积累水平和速率弱得多,认为未来5年可能发生7级地震,但不会成组发生。

3 讨论与结论

研究过程中存在如下问题:采用的投影寻踪自回归模型以一年为步长,故2002—2006年、2003—2007年等的预测意见可能将2002—2005年已发生的最大地震作为上述时段将发生的最大地震(如果这一时段的预测结果与实际发生的地震接近),就给判断带来了不确定性。但如果采用较大的步长,样本量将减少,从而降低了结果的信度。另一方面,应变积累释放模型求算各研究区的平均应变积累速率时,为确保客观地反映该研究区地震活动平均水平,研究时段的选取是依据研究区的地震活动分期特征。由于受历史地震目录的完备性的制约,各研究区地震活动分期的划分精度难以保证,这成为本研究的局限性之一。

为了解决上述问题,本研究首先采用投影寻踪自回归中长期地震预测模型,对新疆各研究区未来5年的地震趋势进行数值预测;然后又应用应变积累释放模型判定了各研究区的地震危险性。综合分析两个模型的地震趋势预测结果,判定各研究区未来5年(2006—2010年)的地震危险性如下:天山地区、南天山地区和南天山西段发生7级地震的可能性较大;南天山东段发生6级左右地震的可能性较大;北天山地区发生6~7级左右地震的可能性较大;伽师地区危险性逐步缓解,发生5~6级地震的可能性较大。

[参考文献]

- [1] 郑祖国. 投影寻踪自回归模型及其在新疆春早期降水量长期预测中应用[J]. 八一农学院学报, 1993, 16(2): 1—7.
- [2] 邓传玲. SMART多重平滑回归技术的原理及计算软件[J]. 八一农学院学报, 1988, 11(4): 47—55.
- [3] 李祚泳, 邓新民. 大气污染物的投影寻踪自回归预测[J]. 上海环境科学, 1997, 16(7): 17—19.
- [4] 王琼, 朱令人. 时间序列的投影寻踪自回归在新疆地震预报中的应用[J]. 内陆地震, 2002, 16(2): 118—125.
- [5] 马宏生, 刘杰, 张国民, 等. 用应变积累释放模型研究中国大陆地块分区地震活动[J]. 地震学报, 2002, 24(6): 569—578.
- [6] 黄忠贤, 陈虹. 中国大陆地震分期活动及其与构造运动的关系[J]. 中国地震, 1996, 12(4): 403—410.
- [7] 安鸿志, 顾岚. 统计模型与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 1986.