

② 110 — 117

第22卷 第2期
2000年6月西北地震学报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNALVol. 22 No. 2
June 2000

祁连山东段三维构造物理模型 及其在地震预报中的应用*

刘小凤, 刘百篪, 杨立明

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

P315.75
P315.2

摘要:利用近年来在祁连山东段地区取得的丰富、完整、系统、可靠的地表活动构造定量化数据和测震学资料建立了本区全新世活动构造的三维构造物理模型, 定性或半定量地描述了该区活动地块的运动状态, 解释了不同活动块体的运动性质及块体之间的运动转换关系, 归纳总结了不同块体内前兆异常及地震活动性特点。

关键词:祁连山; 地震预报; 活动构造; 三维构造物理模型

中图分类号: P313.2; P315.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)02-0110-08

0 引言

近年来活动构造研究取得了长足进展, 祁连山东段主要大型活动断裂的大比例尺填图和详细研究已基本完成, 在活断层性质、年代学、平均滑动速率、古地震及平均复发间隔、历史大地震的同震位错、离逝时间等方面获得了大批定量数据^[1-5]。这些资料是深部构造在地表的表现, 而板内地震的孕育具有复杂的深浅构造背景。现代地壳运动是活动构造带分割的不同尺度块体之间的相对运动。地震活动的空间分布明显受块体边界的控制, 强震的时空分布可能与块体的变形协调作用有关^①, 因此根据地壳深部信息建立的三维构造物理模型能够反映块体边界断裂的性质及运动方式。通过研究深部构造的细结构和深浅构造之间的空间耦合关系, 可以为预测强震发生的地点和震级上限提供一种新的思路和分析方法。

1 区域活动断裂概述

祁连山东段地区处在青藏高原东北缘, 北部是稳定的阿拉善地块, 东部是鄂尔多斯地块, 南部为西秦岭褶皱带。在 NE 向区域应力场作用下形成了一系列 NW, NWW 向构造。青藏高原东缘为六盘山东麓断裂, 全长 215 km, 总体走向 NNW, 自第三纪末形成以来表现为挤压逆冲兼左旋走滑。向西北可分为两支, 一支为中宁-中卫断裂, 全长 124 km, 走向为 NW—NWW—NS 向, 中更新世以来为逆走滑活动, 平均水平滑动速率为 0.34~2.28 mm/a, 曾发生过 1709 年 7.5 级地震; 向西为天桥沟-黄羊川断裂, 该断裂长 145 km, 走向 NWW—EW, 晚更新世以来以左旋走滑运动为主, 全新世以来水平滑动速率为 2.9~4.1 mm/a, 垂直滑动速率为

收稿日期: 1999-07-05

基金项目: 中国地震局“九五”攻关课题(95-04-10-03)

* 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2000006

作者简介: 刘小凤(1965-), 女, 副研究员, 主要从事地震地质方面的研究。

① 张国民, 张培震. 近年来大陆强震机理与预测研究的主要进展. 科技委论坛, 1999, (10): 35~47.

0.2~0.3 mm/a. 另一支为海原断裂, 全长 237 km, 走向 NW—NWW, 中更新世以来为左旋走滑运动, Q_4 以来水平滑动速率达 5~8 mm/a, 曾发生过 1920 年 8.5 级地震, 向西为左阶斜列的老虎山-毛毛山断裂, 该断裂全长 162 km, 走向 NWW, Q_4 以来表现为左旋走滑兼逆冲运动, 水平滑动速率为 2.80~5.54 mm/a, 垂直滑动速率为 0.20~1.05 mm/a, 断裂东段曾发生过 1888 年 7.0 级地震和 1990 年 6.2 级地震, 这两支断裂在古浪西交汇西延为冷龙岭断裂, 全长 150 km, 走向 NW, 以挤压逆冲兼左旋走滑为主, Q_4 以来水平滑动速率为 3.23~4.32 mm/a, 曾发生过 1540 年 7.0 级地震和 1986 年 6.4 级地震. 南部为 NWW 向西秦岭北缘断裂, 中更新世以来表现为左旋走滑为主兼正断层分量, 平均水平滑动速率为 2.2~2.9 mm/a, 垂直滑动速率为 0.4~0.7 mm/a. 它们共同组成了青藏高原东北边界断裂, 其间还有一些次级 NNW 或 NW 向断裂, 如庄浪河断裂、兴隆山-马衔山断裂等.

上述断裂构成了本区最重要的活动构造格架并成为本区活动地块的重要边界, 其定量数据是相互联系的并反映出该活动地块与相邻地块之间的相对运动的定量状态.

2 深部弱震剖面分析

上述活动断裂和定量数据仅仅反映了地表构造的新活动性, 必须借助地球物理和测震学资料才能获得地下深处震源体周围的几何形态和应力状态, 其中最简单的方法就是弱震深度剖面. 首先对该区域的地震定位精度作一分析, 祁连山中东段地区是重点监视防御区, 台站较多, 分布相对合理一些, 台网包围的地区内测震精度较高, 2.0 级以上地震可达 A、B 类精度. 另外中法合作中曾在祁连山中段建立了一个小规模微震观测台网, 其精度可达 0.1~0.5 km, 因此可以认为剖面中的微震条带在深部的延伸状态和分布状态在一定程度上反映了活动断裂的深部产状.

图 1 给出的是冷龙岭断裂震源深度分布情况, 剖面呈南深北浅的楔状体, 北部深 20 km, 南部深 30 km, 底部有一个清晰的低角度推覆面, 楔体内部地震疏密不同, 可划分出几条分割线, 分别可延伸到地表的断裂, 从而构成一个推覆体的形态. 在冬青顶下有一菱形空区, 说明推覆构造面可能具有一定的复杂性. 图 2 显示, 海原断裂、中宁-中卫断裂、老虎山断裂在深部 25~30 km 范围内是近乎垂直的, 说明这些断裂在深部可能仍是走滑性质的.

根据祁连山中东段震源机制解(图 3), 古浪地区以 NNE 向挤压为主, 1927 年古浪 8 级地震和 1986 年门源 6.4 级地震断层面均为低角度逆冲, 其它地震多兼有逆断层分量, 反映出该地区处于 NNE 方向挤压逆冲的作用之下. 毛毛山-海原断裂为 NE 向挤压, 断层面显示较统一的左旋走滑特征; 六盘山地区为 NEE 向挤压, 地震断层面多具逆冲分量, 显示出地块向东的推挤作用.

3 三维构造物理模型的建立

依据上述地表全新世活动断裂定量资料和微震震源深度剖面及震源机制资料, 建立了祁连山中东段地区三维构造物理模型(图 4). 按活动断裂运动学特征及应力场特征, 将本模型划分出 4 个次级单元: 古浪推覆体、六盘山挤出构造、海原-毛毛山走滑断裂和兴隆山-马衔山走滑断裂. 尽管它们的运动性质、运动方式和运动方向有很大差异, 但它们并不是孤立存在的, 而是相互依存, 紧密联系的, 是特定区域断裂几何结构在统一的动力学环境中形成的. 具体说来, 在印度板块碰撞作用下, 青藏高原地壳缩短并向北推挤, 引起地壳物质向东侧向挤出, 由于南部块体向东运动的速率大于北部块体, 形成了本区 NWW 向或近 EW 向断裂的左旋走滑运

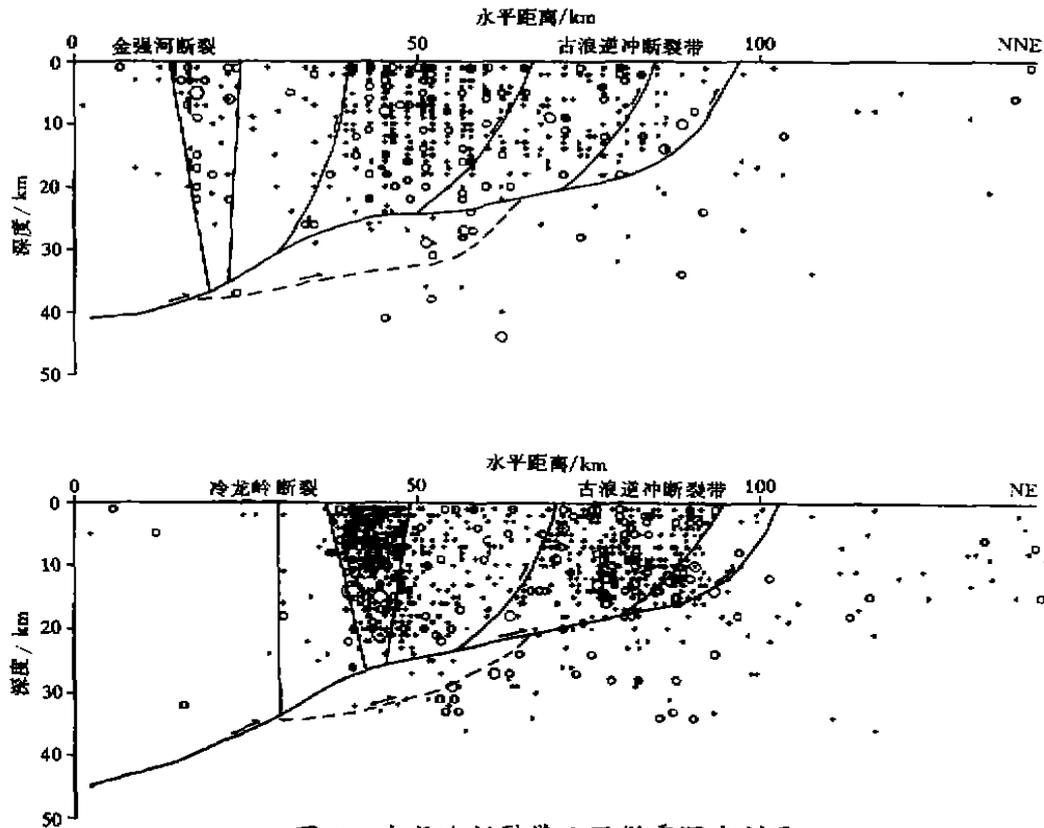


图1 冷龙岭断裂带地区微震深度剖面

Fig. 1 The section of focal depth of small earthquakes in the Lenglongling fault zone.

动,如海原断裂、中宁-中卫断裂、毛毛山-老虎山断裂等均在作左旋走滑运动,它们向西汇聚于古浪西合并形成一条冷龙岭断裂并继续向西延伸.中宁-中卫断裂向西至黄羊川和古浪南,基本保持了EW走向,越过古浪后转为NW走向,至冷龙岭主峰以西又转为NWW向,在这种几何学条件下,近EW向断裂的左旋走滑运动性质在断裂走向拐弯处的古浪至冷龙岭主峰一带转换为以挤压为主的逆冲推覆运动性质,于是形成了古浪推覆体.该运动性质的转换类似于左旋走滑断裂的右阶挤压区.海原断裂和天景山断裂向东延伸至六盘山附近,走向由NWW和近EW向变为NW和近SN向,次级块体的向东挤出运动使两条断裂的左旋走滑运动转换为由西向东的挤出和推覆作用,于是形成六盘山挤出构造和六盘山隆起近20 km的地壳缩短^[6].在这种构造格局下,来自青藏高原向北推挤的驱动力使本区不同部位表现出了不同的局部运动学和动力学特征,导致发生了1920年海原8.5级地震和1927年古浪8级大震,它们处于不同的次级构造力学单元,因而表现出了截然不同的断裂破裂特征.1920年海原地震发生在海原左旋走滑断裂带上,沿断裂形成了237 km长的地震地表破裂带;1927年古浪地震发生在古浪推覆体上,地表破裂带散布于长约40 km、宽约30 km的范围内^[7],生动地说明推覆体内大部分次级断面均参与了8级地震的破裂.

4 中强地震前兆异常分析

大量前兆观测资料表明,中强震发生前确实存在短临异常变化,但仅由短临异常作出未来

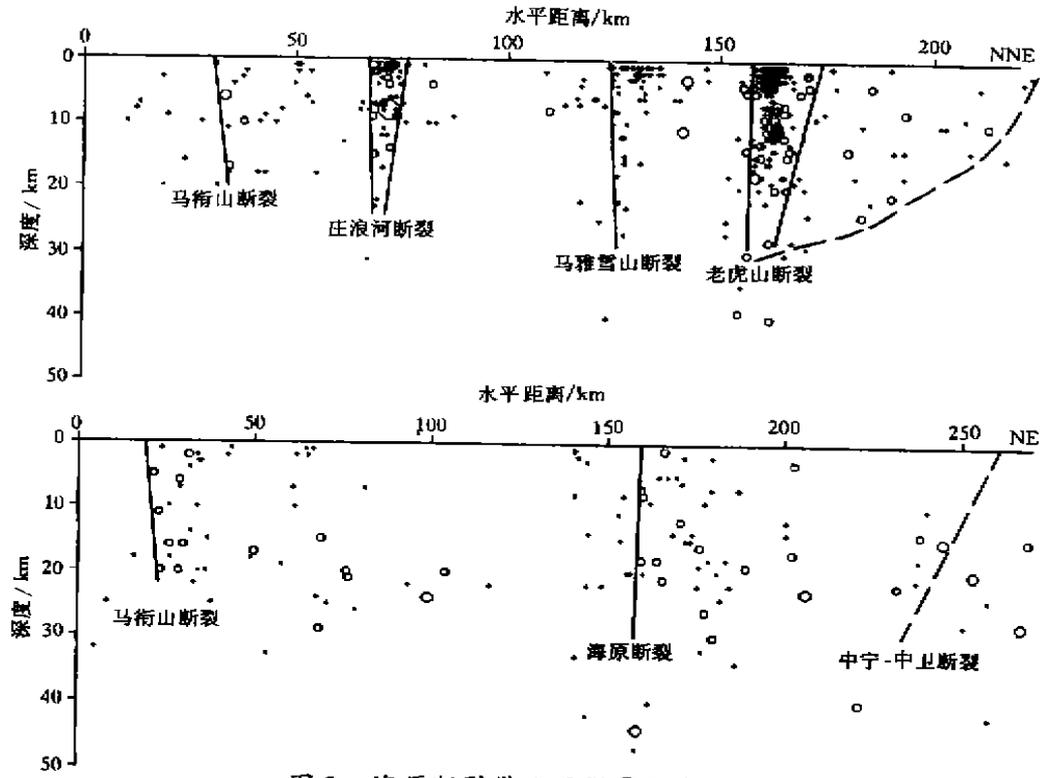


图 2 海原断裂带地区微震深度剖面

Fig.2 The section of focal depth of small earthquakes in the Haiyuan fault zone.

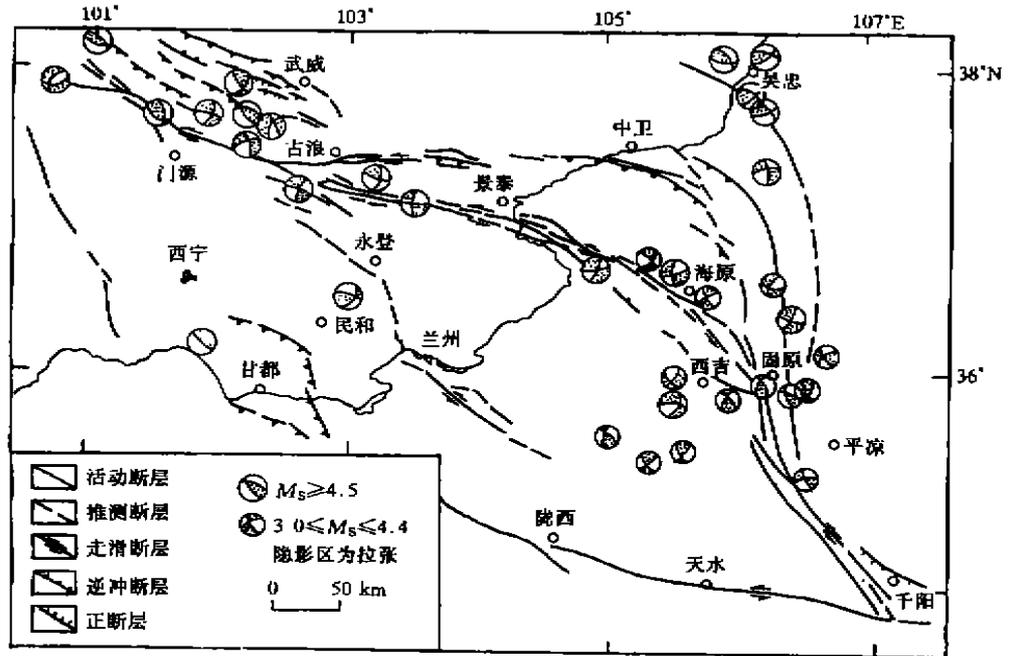
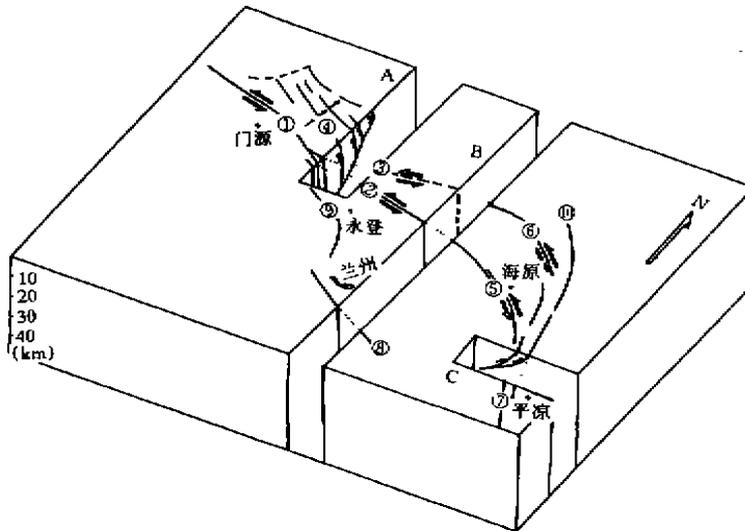


图 3 祁连山东中段震源机制解

Fig.3 Focal mechanism in mid-east part of the Qilian Mountains area.



①冷龙岭断裂, Q_4 水平滑动速率为 3.23~4.32 mm/a; ②老虎山-毛毛山断裂, Q_4 水平滑动速率为 2.80~5.54 mm/a, 垂直滑动速率为 0.20~1.05 mm/a; ③天桥沟-黄羊川断裂, Q_4 水平滑动速率为 2.9~4.1 mm/a, 垂直滑动速率为 0.2~0.3 mm/a; ④皇城-塔儿庄断裂, Q_4 垂直滑动速率为 0.8 mm/a; ⑤海原断裂, Q_4 水平滑动速率为 5~8 mm/a; ⑥中宁-中卫断裂, 平均滑动速率为 0.34~2.28 mm/a; ⑦六盘山东麓断裂; ⑧兴隆山-马衔山断裂; ⑨庄浪河断裂; ⑩牛首山-罗山断裂, Q_4 水平滑动速率为 3.19 mm/a; A 古浪推覆体; B 海原断裂块体; C 六盘山挤出构造

图4 祁连山中东段三维构造物理模型

Fig. 4 Three dimensional tectonophysics model in mid-east part of the Qilian Mountains area.

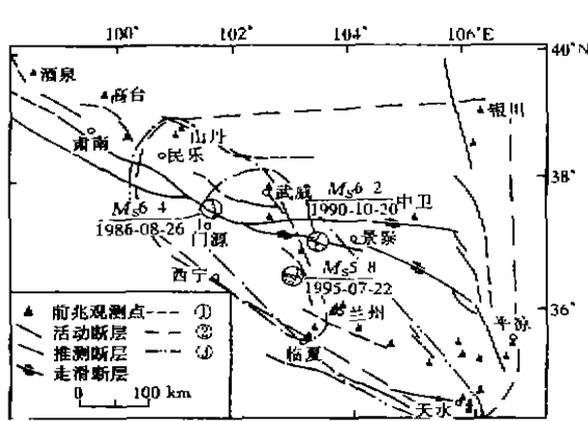
具有较明确的物理意义,即按照我们所建立的三维构造物理模型去划分统计单元.由于该模型内的每个次级构造物理单元都有自己独立的结构特征和运动学、动力学特征,因此,所划分的前兆异常统计单元实际上就是这些构造物理次级单元.

4.1 定点前兆异常分析

定点前兆观测资料的异常变化间接或直接反映了地壳浅层介质力学性质变化引起的介质物理、化学性质的变化.前兆测点和震源体位于不同地质块体上,震源体周围各种前兆异常时空演化特征反映了局部应力场的时空分布特征.一次强烈地震是大范围应力场调整过程中引起地壳局部介质应力集中释放的力学过程.大范围应力场调整过程中首先参与活动的是区域活动性断裂系统,该断裂系统的调整活动是按照其构造物理模型所确定的力学性质和强度去进行的,这就造成区域应力场不均匀演化,并产生构造活动性异常,形成与孕震过程相伴的场兆.孕震过程中震源区介质物理性质的变化属于源兆,也就是说,场兆与大范围应力场调整有关,而源兆与一次地震的震源体的局部应力集中有关.因此,通过大范围、长时间多种前兆的连续观测可以监视区域应力场的动态变化.我们所建立的三维构造物理模型恰恰为连续地统一分析多种场兆和源兆过程提供了一个在力学上和结构上接近真实地壳运动状况的大地构造物理和物质基础,使我们在各个点上观测到的前兆动态过程都能落实到各自具体的力学环境和地质环境中去,而不再是“飘浮在空中”.

图5为1995年7月22日永登5.8级地震、1990年10月20日天祝-景泰6.2级地震和1986年8月26日门源6.4级地震前兆异常分布图,异常的分析 and 确认是由毛可等(1998)给

地震预测还存在不少困难.首先,地震本身是一个十分复杂的自然过程,地震活动受外因调制,不同时间尺度的地震信息是多种因素作用的结果.其次,短临异常空间、时间和形态演化十分复杂,空间分布上具有不均匀性,时间演化进程不一致,形态特征多种多样.第三,前兆异常与地震并不是一一对应的关系,异常的重复性很差,这就导致震前判断的很大不确定性^[8].造成这种现象的原因,除了地震前兆本身的复杂性和观测仪器本身的可靠性之外,一个重要原因可能是,在分析各观测点的前兆时,严重脱离了各观测点所在地的具体的构造地质和构造物理环境,这样我们就很难考虑和分析各观测点资料之间的相互联系和依存关系.为解决此问题,我们通过地震发生的构造环境、动力学条件和破裂方式等工作区进行异常统计单元的划分,从而使它们具



① 1990年天祝-景泰6.2级地震; ② 1986年门源6.4级地震; ③ 1995年永登5.8级地震

图5 定点前兆异常空间分布

Fig.5 Distribution of fixed premonitory anomaly feature.

出的^[9],异常持续的时间约为几个月至2 a.永登地震前兆异常主要分布在构造物理模型中的庄浪河-马衔山活动断裂单元及其两端外延部分,表明地震之前的2 a内该次级单元的调整活动是比较明显的;天祝-景泰地震前兆异常分布面积很大,异常分布与构造无明显关系,但地震发生在海原断裂带西端的老虎山断裂上,该断裂带是本区规模最大、滑动速率和历史地震震级最高的一级活动构造,它的活动可能带动多个次级单元产生转换性质的活动,因此异常分布面积扩展较大;门源地震前兆异常分布在庄浪河断裂以西至山丹、民乐以东地区,且更集中于北部,表明孕震过程主要与古浪推覆构造次级单元有关.上述情况说明,中强地震的发生可能与其所在的次级构造物理单元有关,同时

也可能与其紧密相邻的次级单元有关.

4.2 地震活动性异常特征

强震孕育过程中,周围地区的中、小地震活动会出现地震空区、地震条带、地震活动增强或平静、大小地震数目比例失调等规则性特征^[10].多数地震在空间分布上与区域活动构造格架一致,中强地震严格受深大活动断裂控制,中小地震随机地散布在各个活动带及其周围.将这些活动特征与不同区域不同构造单元的地震孕育过程相结合,归纳出前兆性活动图像.祁连山中东段地区分属于两种类型的构造环境,即挤压性质的推覆构造区和剪切性质的走滑构造区.挤压构造区包括古浪推覆构造带和六盘山挤出构造,地震活动性前兆异常表现为地震空区、频度降低和 b 值下降.而剪切性质构造区包括海原-毛毛山断裂及以南的庄浪河-马衔山断裂两个统计单元,常表现为地震空段、频度上升和 b 值下降(图6).这说明不同性质的孕震单元的前兆异常与其所在的力学单元的应力状态密切相关.

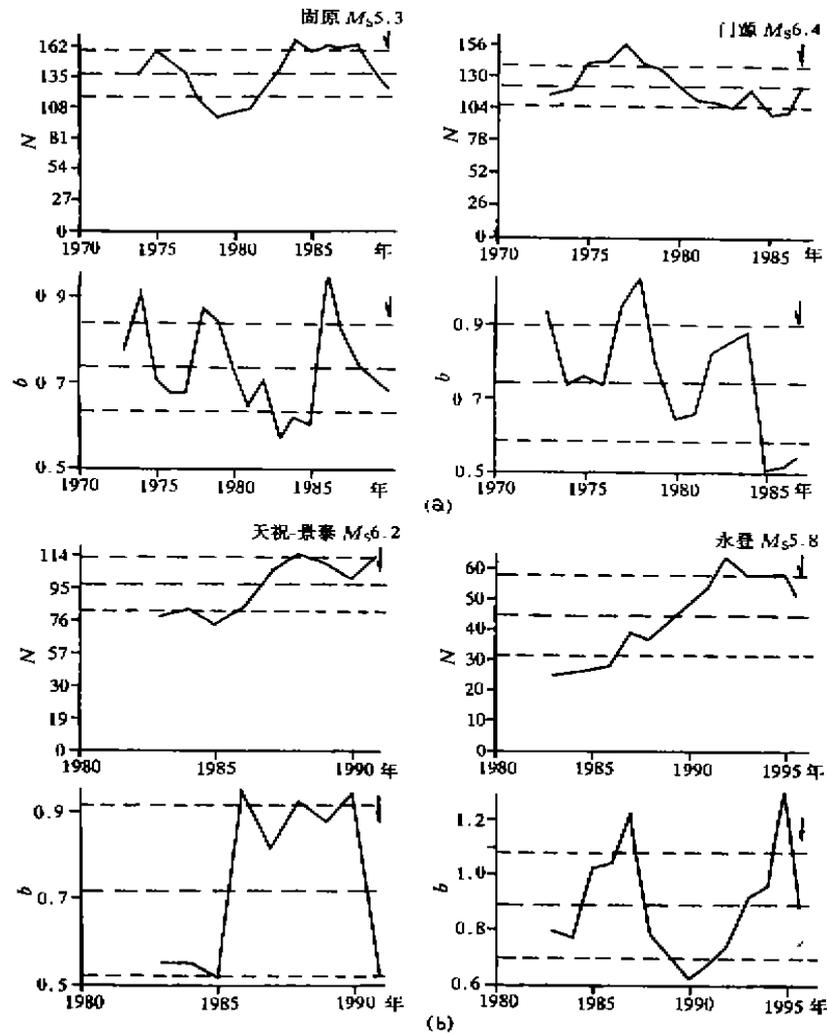
5 讨论和结论

(1) 本文建立的祁连山中东段地区全新世活动构造的三维地质结构模型为地震预测的资料分析提供了一个较具体的和较切合实际的构造物理基础.

(2) 中强地震的发生,其定点前兆异常的分布可能与其所在的次级构造物理单元及与该单元相邻的存在力学转换关系的次级构造物理单元有关.

(3) 与定点前兆异常相比,地震活动性异常资料更可靠,主要以已经发生地震的各种参数为基础,以这些震例所提供的经验为借鉴,可以寻找出具有前兆意义的异常活动图像及统计规律.通过不同区域统计单元内地震活动性分析发现,区域应力状态不同的地区具有不同的地震活动性规律:① 在挤压构造区,以地震空区为主,地震频度及 b 值均下降;② 走滑构造区的异常表现为以地震空段(区)为主,地震频度升高, b 值下降.

(4) 目前绝大多数前兆资料是在地表1~2 km的浅部观测的,地震是因地下10~20 km深处的岩体的快速破裂和错动而发生的,所以通过表层观测所获得的并不充分的信息来反演地下三维孕震过程是很困难的.而由弱震资料得到的深部断裂延伸状态仅仅是一种三维立体



(a) 挤压构造单元的频度和 b 值 (b) 剪切构造单元的频度和 b 值

图 6 不同构造单元的 N 、 b 值曲线

Fig. 6 The variation curves of N and b values in different tectonic units.

的构造框架, 没有反映出深部的介质性质, 但由于划分出的统计单元具有明确的构造含义, 故可对各种前兆异常作出相对合理的统计分析。

[参考文献]

- [1] 袁道阳, 刘百篋, 等. 利用黄土剖面的古土壤年龄研究毛毛山断裂的滑动速率[J]. 地震地质, 1997, 19(1): 1~8.
- [2] 刘百篋. 活断层带的特征滑动行为与中强以上地震序列[J]. 中国地震, 1987, 14(3): 60~67.
- [3] 刘小凤, 刘百篋, 等. 老虎山活动断裂研究[J]. 华南地震, 1994, 14(4): 9~16.
- [4] 戴华光, 等. 天桥沟-黄羊川断裂古地震的初步分析[J]. 活动断裂研究, 1995, 4: 92~103.
- [5] 闵伟, 邓起东. 香山-天景山断裂带的变形特征及走滑断裂端部挤压构造的形成机制[J]. 活动断裂研究, 1991, 1: 71~80.

- [6] 国家地震局地质研究所,宁夏回族自治区地震局.海原活动断裂带[M].北京:地震出版社,1990.256~277.
- [7] 侯康明.1927年古浪8级大震地表破裂特征及形成机制[J].地震地质,1998,20(1):19~26.
- [8] 焦明若,张国民.地震前兆复杂性成因机理研究的讨论(二)——地震前兆复杂性成因机理[J].地震,1998,18(2):112~118.
- [9] 毛可,王振亚,等.甘肃永登5.3级地震前兆异常特征及天祝-古浪5.4级地震中短期预报[J].地震,1998,18(2):177~183.
- [10] 陆远忠,陈章立,等.地震预报的地震学方法[M].北京:地震出版社,1985.48~58.

THREE-DIMENSIONAL TECTONOPHYSICS MODEL FOR THE MIDDLE-EASTERN
QILIAN MOUNTAINS AND ITS APPLICATION
IN EARTHQUAKE PREDICTION

LIU Xiao-feng, LIU Bai-chi, YANG Li-ming

(Lanzhou Institute of seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The three-dimensional tectonophysics model of Holocene active faults is set up by using plentiful, reliable and quantitative data about surface active structures and seismometric data obtained from Qilian Mountains area. The movement features of active blocks in the area are described qualitatively or semi-quantitatively. The transformation relation of movements among different blocks is explained. The characters of precursory anomalies and seismicities within different blocks are summed up.

Key words: Qilian Mountains; Earthquake prediction; Active structure; Three-dimensional tectonophysics model