

北京以西至晋冀蒙交界地区的应力场

黄福明 李群芳 高忠宁

(中国北京 100085 国家地震局地壳应力研究所)

摘 要

本文根据北京以西至晋冀蒙交界地区的地震地质构造条件和地震活动资料,用有限单元法与位错理论分别研究了该地区的构造应力场与地震应力场,结合应力场的分布特征和近期小地震的活动特点,推断该地区存在两个应力相对集中区,即(1)黑山寺断裂以北、牛心川—四回庄断裂以东及梁家庄断裂以南所围成的地区;(2)天镇北断裂与非菜沟—黄土垴堆断裂和张皋断裂汇交区所围成的长轴呈北西向的区域。其中,第一个应力相对集中区内怀来以西的下花园断裂、浑井东断裂和桑干河断裂的汇而不交处及其附近地区,未来发生强震的可能性较大。

关键词 北京;晋冀蒙;断裂;应力场;地震

一、引言

一九七六年唐山大地震发生后,鉴于北京在政治上和经济上特殊重要的地位,地震工作者一直关注北京以西至晋冀蒙交界地区的地震活动,并相继开展了多方面的研究工作。本文拟依据该区的地质构造条件和地震活动资料,研究其构造应力场和地震应力场的分布特征,并结合近期小地震活动特点,推测未来可能发生强震的应力相对集中区。

二、地质构造概况

北京以西至晋冀蒙交界地区在漫长的地质历史时期,先后经历过多次构造运动,形成了复杂的构造形迹,展布许多走向不同的断裂带。概括起来,大致有四组,即东西向断裂带、北东向断裂带、北北东向断裂带和北西向断裂带。其中,东西向断裂带形成于吕梁运动时期,分布于本区的北部。北东向断裂带主要形成于燕山运动时期,比较发育的北东向断裂带是控制本区新生代沉积盆地的边界断裂。北北东向断裂带形成于燕山运动时期。与上述三种断裂带相伴生的构造形迹,便是散布在全区的北西向断裂,它们颇引人注目,但均延伸不远。上述断裂带的部分断裂将在下面的表1中给出。

构造地震往往是原有断裂重新活动或进一步扩展的结果。研究表明¹⁾,本区历史地震

1988年10月21日收到本文初稿,1990年4月20日决定采用。

1)高忠宁,1985.晋冀蒙三省区交界地区地震地质背景初探。

的极震区或有感范围的长轴方向往往与活动断裂的方向相近。7级以上的强震与北北东向断裂活动有关,而北西向断裂同东西向断裂与北东向断裂的交汇处,往往有利于5—6级地震的发生。

三、构造应力场的数学模拟

构造地震本质上是地壳应力和地壳岩层(尤其是原有断裂)相互作用发生剪切破裂的结果。通过数学模拟,可以大致确定研究区的构造应力场基本图象,找出易于发生剪切破裂的应力相对集中区,从而推断未来可能的强震活动区。

1. 模型及其参数的选取

鉴于华北地区断层多数倾角较大,而高倾角断层周围应力分布形态随深度变化不大^[4]。为此,我们对研究区构造应力场采用平面有限元进行模拟计算,计算范围是:东经 $113^{\circ}-116^{\circ}5'$ 、北纬 $39^{\circ}-41^{\circ}$ 。其简化的地质构造模型与坐标轴正向选取如图1所示,图中每条断裂附近带圆圈的数字是断裂编号(详见表1)。

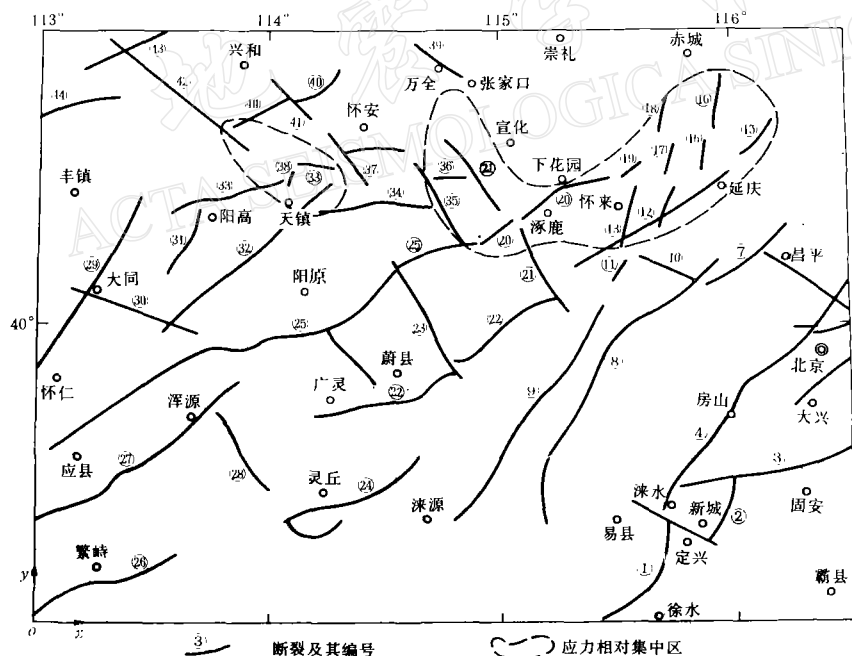


图1 地质构造模型简图

(1) **边界的受力方式与载荷强度** 一些研究结果表明^[2-8], 华北地区最大主压应力是 NEE 向的水平主压应力. 假定上述研究区是在华北统一应力场控制之下, 因此选取作用于研究区边界的主应力方向为 $N65^{\circ}E$ 和 $N25^{\circ}W$, 其强度分别为 $10^7 N/m^2$ 和 $6 \times 10^6 N/m^2$ 的均布载荷.

表 1 北京以西至晋冀蒙交界地区断裂编号及名称表

编 号	断 裂 名 称	编 号	断 裂 名 称	编 号	断 裂 名 称
①	太行山山前断裂	⑩	大西山断裂	③①	阳高西断裂
②	高碑店东断裂	⑪	阎家平断裂	③②	天镇—下深井断裂
③	涿县断裂	⑫	二炮断裂	③③	阳高破碎带
④	高丽营断裂	⑬	安营堡断裂	③④	怀安南山山前断裂
⑤	夏垫断裂	⑭	下花园断裂	③⑤	牛心川—四回庄断裂
⑥	南口孙河断裂	⑮	浑井东断裂	③⑥	浑井北断裂
⑦	南口断裂	⑯	蔚广断裂	③⑦	红泥圪洞断裂
⑧	沿河城紫荆关断裂	⑰	壶流河断裂	③⑧	大镇北断裂
⑨	东圆堡断裂	⑱	灵丘断裂	③⑨	梁家庄断裂
⑩	镇边城断裂	⑲	桑干河断裂	④⑩	韭菜沟—黄土垌堆断裂
⑪	石门断裂	⑳	唐峪河—塘河断裂	④⑪	二道沟朱家窑断裂
⑫	黑山寺断裂	㉑	恒山山前断裂	④⑫	张皋断裂
⑬	土木断裂	㉒	五台台北坡山前断裂	④⑬	黄旗河北断裂
⑭	狼山寺断裂	㉓	口泉断裂	④⑭	上贵乌拉断裂
⑮	黄柏寺断裂	㉔	大同—西坪断裂		

(2)模型的材料常数 对于地壳体,除了主要的深大断裂和低速层外,如果不考虑时间效应,一般可以按弹性材料处理.对于本文研究区的岩石力学性质,目前获得的实测资料甚少,无法作深入的判断.为此,作为初级近似,我们采用各向同性的线弹性材料模型,其常数分别选取为:

杨氏模量

$E_{\text{断层内}}=3\times10^9\text{N/m}^2$

$E_{\text{断层外}}=3\times10^{10}\text{N/m}^2$

泊松比

$\gamma_{\text{断层内}}=0.23$

$\gamma_{\text{断层外}}=0.25$

2. 模拟计算结果

根据上述模型与假定的参数,分别计算了最大剪应力和平均应力的相对等值线,以分析研究区的构造应力场特征.为简便计算,在下面的等值线图中,均约定压缩为正,拉张为负.

(1)最大剪应力的分布 最大剪应力愈大,表示所在地区的应力集中程度愈高,愈易产生剪切破裂.图2是最大剪应力相对等值线图.从图中看到,断层端点与汇而不交区是最大剪应力的高值区,从阳原至房山一线以北地区,其应力值一般高于此线以南地区,在数值计算范围内,最大剪应力相对等值线大于10的有三个,其中北东向的桑干河断裂与下花园断裂汇而不交区的最大剪应力相对值最高.

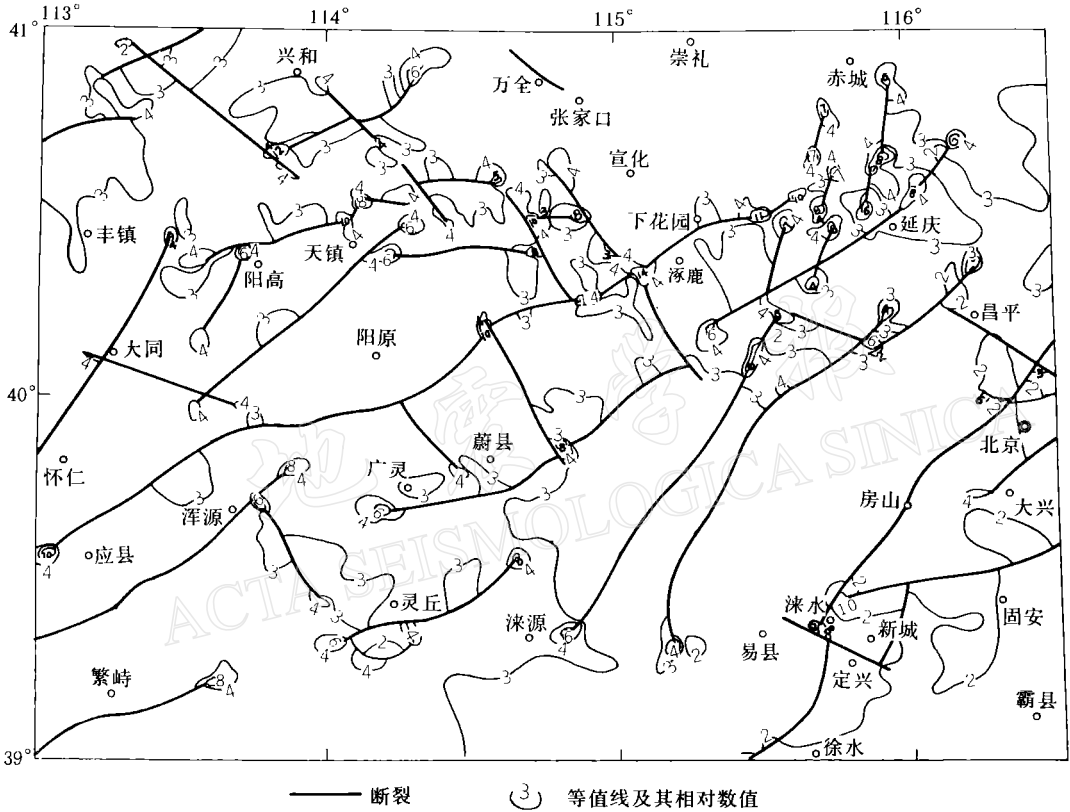


图2 最大剪应力相对等值线图. 相邻两等值线之差为 $5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$
(图2和图3相邻等值线之差数值相同)

(2)平均应力的分布 平均应力是最大主应力与最小主应力之和的一半,即有 $\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$. 其作用类似于围压的作用. 平均应力值愈大,产生破裂所需的差应力就愈大,因此愈不易破裂.图3是平均应力的相对等值线图.由图可知,平均应力在全区的分布比较均匀,南北地区差异不大,其高值区出现在某些断裂的端点附近.

四、地震应力场特征

每一个强震发生之前,其周围地区的应力变化对于改变震源区的应力积累速度,从而加速或推迟该地震的发生,产生重要的作用.因此,在较大范围内研究与一定时期的地震

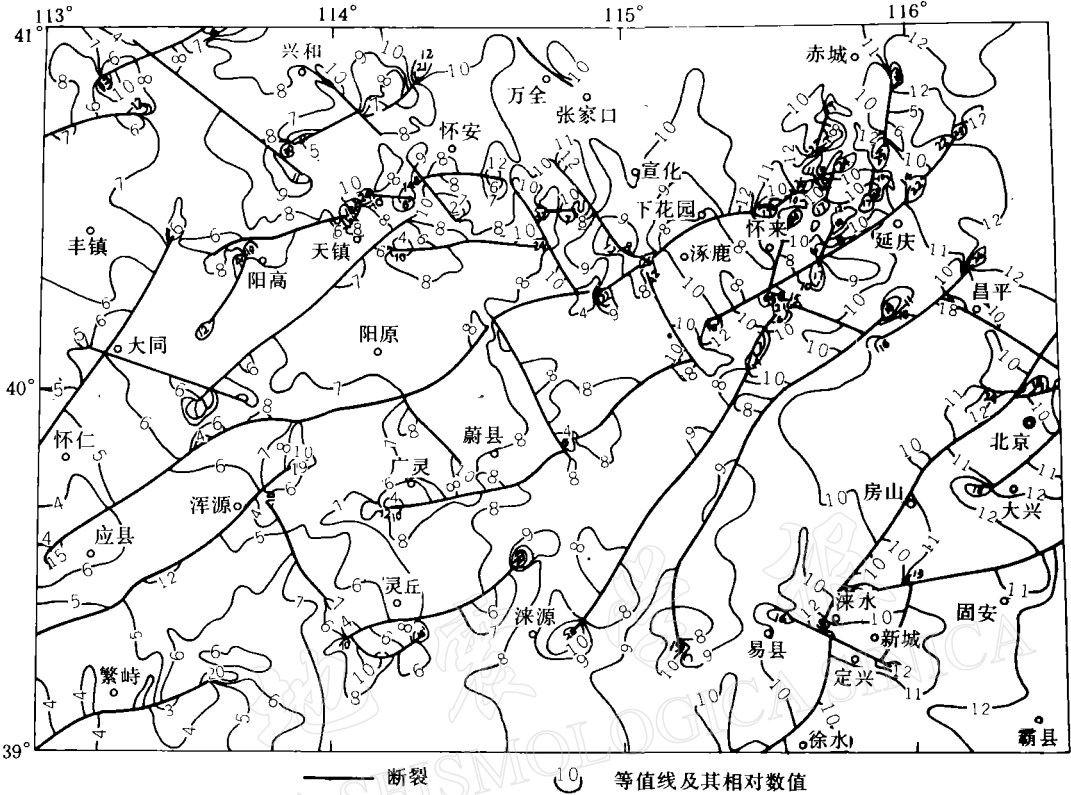


图3 平均应力相对等值线图

活动性有关的附加应力场,对于具体判断未来可能的强震活动区很有现实意义.

若取上述研究区的平均纬度为 40° , 地球的平均半径为 6375km, 则该研究区的范围为: 南北方向宽约 223km, 东西方向长约 298km. 于是, 研究区最长弧段的平均曲率为

$$c = \left| \frac{\Delta \alpha}{\Delta s} \right| = \frac{3.50}{298} = 0.0117 (\text{度/km})$$

因此, 作为初级近似, 可忽略地球曲率的影响, 将研究区的地表面视为平面. 这样, 可以利用各向同性介质中断层的弹性位错模式, 研究上述区域及其邻域所有 $M_s \geq 5$ 地震断层错动产生的附加应力场图象.

1. 地震断层参数的选取

公元前 231 年以来, 在研究区及其邻域共发生 37 个 5 级以上地震 (见表 2). 其中 9 个地震已给出等震线, 1 个地震给出震源机制解, 其余地震仅有发震时间、震中位置和震级三项参数. 为了进行数值计算, 下面作出一些假定, 以获得较合理的地震断层参数. 首先假定所有地震断层面均是矩形位错面, 其参数依下列方法选取.

(1) 地震断层面的走向、倾向和倾角 对于已知等震线的 9 个地震的走向, 取其等震

线长轴的方向;对于 1981 年 8 月 13 日内蒙丰镇 5.5 级地震,其断层面走向根据其震源机制解与离震中最近的一条断裂的走向联合确定,取为 $N74^{\circ}E$;其余地震的走向则统统取为离每个地震震中最近的一条断裂的走向。为了计算方便,假定凡地震断层走向位于第一、三象限内(假定 x 轴正向沿正东方向, y 轴正向沿正北方向),其倾向一律取为南东,其余地震断层的倾向则取为北东。本研究区是华北地震区的一小部分而华北地区地震倾向一般较陡,故假定本研究区所有地震断层的倾角均为 85° 。

(2)震源深度和断层面宽度 W 研究区 1923 年以来发生的几个地震的震源深度在 10—18 km 范围内,作为初级近似,假定表 2 中地震序号 1—33 和 35 的所有地震的震源深度为 15 km,相应的断层宽度按震源深度的二倍考虑,即有 $W=30$ km。

(3)断层面长度 $2L$ 根据我国东部震级和破裂长度的经验公式¹⁾

$$M = 2.97 \lg l + 2.56 \quad (l = 2L)$$

便可求出上述地震的断层面长度。

(4)断层面的上界与下界 假定所有地震断层出露地表,于是有上界的深度 $d=0$ 。除表 2 中地震序号 34、36 和 37 的断层面下界的深度分别为 26、20 和 36 km 外,其余地震的断层面下界的深度均为 30 km。

(5)断层面平均走滑错距 $\Delta \bar{u}_s$ 和倾滑错距 $\Delta \bar{u}_d$ 鉴于本区地震主要以走向滑动为主,故假定所有地震的平均倾滑错距 $\Delta \bar{u}_d$ 等于零。利用地震震级与断层位移的经验公式¹⁾

$$M = 1.92 \lg D + 2.4 \quad (5 \leq M \leq 8.5)$$

便可以估算出上述地震的平均走滑错距 $\Delta \bar{u}_s$ 。

为了清楚起见,兹将根据上述方法和地震波资料求得的所有强震的断层参数一并列于表 2 的第 5—11 栏。

2. 地震应力场的计算结果

在现今区域应力场最大主压应力 σ_1 取向为 $N65^{\circ}E$ 的条件下,研究区最易发生剪切破裂的断裂方向主要是 NNE 向、NE 向和 NW 向。因此,根据表 2 所给的参数,利用文献 [10] 给出的多段断层应力场迭加程序,我们分别计算了参考断层走向为 $N40^{\circ}E$ 和 $N50^{\circ}W$ 两种情形下地表面的剪应力 τ_{12} 和流体静应力 ($\tau_{11} + \tau_{22} + \tau_{33}$)。由于流体静应力是坐标变换不变量,故上述两种情形下其等值线图完全一样(如图 4 所示),而剪应力 τ_{12} 的符号则同坐标轴方向有关。当参考断层方向改变 90° 时,相应的等值线图改变符号,即正(负)值变为负(正)值。图 5 示出参考断层方向为 $N40^{\circ}E$ 情形下的 τ_{12} 等值线图。

1) 国家地震局震源机制研究小组, 1973. 中国地震震源机制的研究, 第二集。

表 2 京西 — 晋冀蒙三省交界地区 $M_s \geq 5.0$ 地震参数一览表

地震 序号	地震时间 (年·月·日)	震中位置			震 级 (M_s)	震 源 深 度 (km)	断层面			断层 面长 度 $2L$ (km)	断层 面宽 度 W (km)	断层面 走向滑 动错距 Δu (cm)	断层 面下 界 D (km)	断层 面上 界 d (km)
		φ_N	λ_E	参考地名			走向	倾向	倾角					
1	公元前 231 年 公元 294.9	39°8	114°6	河北蔚县	$6\frac{1}{2}$	15	N53°W	NE	85°	21.2	30	136	30	0
2		40°3	116°0	北京居庸关 一带	$5\frac{1}{2}$	15	N62°W	NE	85°	9.8	30	41	30	0
3	512.5.21	39°0	113°0	山西代县	$7\frac{1}{2}$	15	N20°E	SE	85°	46.1	30	-453	30	0
4	1022.4	39°7	113°1	山西大同、 应县间	$6\frac{1}{2}$	15	N8°E	SE	85°	21.2	30	-136	30	0
5	1057	39°5	116°3	北京南郊	$6\frac{3}{4}$	15	N45°E	SE	85°	26.0	30	-196	30	0
6	1076.12	39°9	116°4	北京	5	15	N53°E	SE	85°	6.6	30	-23	30	0
7	1305.5.3	39°8	113°1	山西怀仁、 大同一带	$6\frac{1}{2}$	15	N45°E	SE	85°	21.2	30	-136	30	0
8	1337.9.8	40°4	115°7	河北怀来 一带	$6\frac{1}{2}$	15	N62°W	NE	85°	21.2	30	136	30	0
9	1338.8.2	40°4	115°2	河北涿县	5	15	N40°E	SE	85°	6.6	30	-23	30	0
10	1484.1.29	40°4	116°1	北京居庸关 一带	$6\frac{3}{4}$	15	N43°E	SE	85°	26.0	30	-196	30	0
11	1511.10.1	39°1	116°4	河北坝县附近	$5-5\frac{1}{2}$	15	N32°E	SE	85°	9.8	30	-41	30	0
12	1536.10.22	39°8	116°8	北京通县南	6	15	N35°E	SE	85°	14.4	30	-75	30	0
13	1578.7.17	40°4	115°7	河北怀来(旧)	5	15	N62°W	NE	85°	6.6	30	23	30	0
14	1581.5.18	39°8	114°5	河北蔚县、山 西广灵之间	6	15	N60°E	SE	85°	14.4	30	-75	30	0
15	1582.3	40°1	113°2	山西大同	5	15	N32°E	SE	85°	6.6	30	-23	30	0
16	1583.4	39°7	114°0	山西浑源、 广灵一带	$5\frac{1}{2}$	15	N45°E	SE	85°	9.8	30	-41	30	0
17	1586.5.26	39°9	116°3	北京	5	15	N50°E	SE	85°	6.6	30	-23	30	0
18	1616.10.10	40°9	116°0	河北赤城东	5	15	N30°E	SE	85°	6.6	30	-23	30	0

续表 2

地震 序号	地震时间 (年·月·日)	震中位置			震级 (M_s)	震源深度 (km)	断层面			断层面长度 $2L$ (km)	断层面宽度 W (km)	断层面走向滑动错距 Δu (cm)	断层面下界 D (km)	断层面上界 d (km)
		φ_N	λ_E	参考地名			走向	倾向	倾角					
19	1618.11.16	39°8′	114°5′	蔚县、广灵间	$6\frac{1}{2}$	15	N60°E	SE	85°	21.2	30	-136	30	0
20	1621.3	39°4′	116°8′	河北永清、武清	$5\frac{1}{2}$	15	N41°E	SE	85°	9.8	30	-41	30	0
21	1626.6.28	39°4′	114°2′	山西灵丘	7	15	N66°E	SE	85°	31.2	30	249	30	0
22	1658.2.3	39°4′	115°7′	河北涞水	6	15	N20°E	SE	85°	14.4	30	-75	30	0
23	1665.4.16	39°9′	116°7′	北京通县西	$6\frac{1}{2}$	15	N20°E	SE	85°	21.2	30	-136	30	0
24	1673.10.18	40°5′	114°1′	山西天镇	$5\frac{3}{4}$	15	N21°E	SE	85°	12.3	30	-59	30	0
25	1678夏	40°7′	115°3′	河北龙关、赴川	5	15	N20°E	SE	85°	6.6	30	-23	30	0
26	1679.9.2	40°0′	117°0′	河北三河、平谷	8	15	N45°E	SE	85°	67.8	30	-825	30	0
27	1720.7.12	40°4′	115°5′	河北沙城	$6\frac{3}{4}$	15	N70°W	NE	85°	26.0	30	196	30	0
28	1724	40°4′	115°2′	河北涿鹿	5	15	N40°E	SE	85°	6.6	30	-23	30	0
29	1730.9.30	40°0′	116°2′	北京西郊	$6\frac{1}{2}$	15	N40°W	NE	85°	21.2	30	137	30	0
30	1746.7.29	40°2′	116°2′	北京昌平	5	15	N62°W	NE	85°	6.6	30	23	30	0
31	1772.3.1	38°3′	114°4′	河北灵寿	5	15	N57°E	SE	85°	6.6	30	-23	30	0
32	1898.9.22	39°1′	113°0′	山西代县	$5\frac{1}{2}$	15	N53°E	SE	85°	9.8	30	-41	30	0
33	1911.1.26	39°8′	114°5′	河北蔚县	$5\frac{1}{2}$	15	N60°E	SE	85°	9.8	30	-41	30	0
34	1923.9.14	39°4′	115°8′	河北新城	$5\frac{1}{2}$	13	N80°E	SE	85°	9.8	26	41	26	0
35	1957.1.1	40°5′	115°5′	河北涿鹿	5	15	N63°E	SE	85°	6.6	30	-23	30	0
36	1967.7.28	40°39′	115°46′	怀来东北大海坨	5.4	10	N60°E	SE	85°	9.0	20	-37	20	0
37	1981.8.13	40°30′	113°25′	内蒙丰镇	5.5	18	N74°E	SE	85°	9.8	36	41	36	0

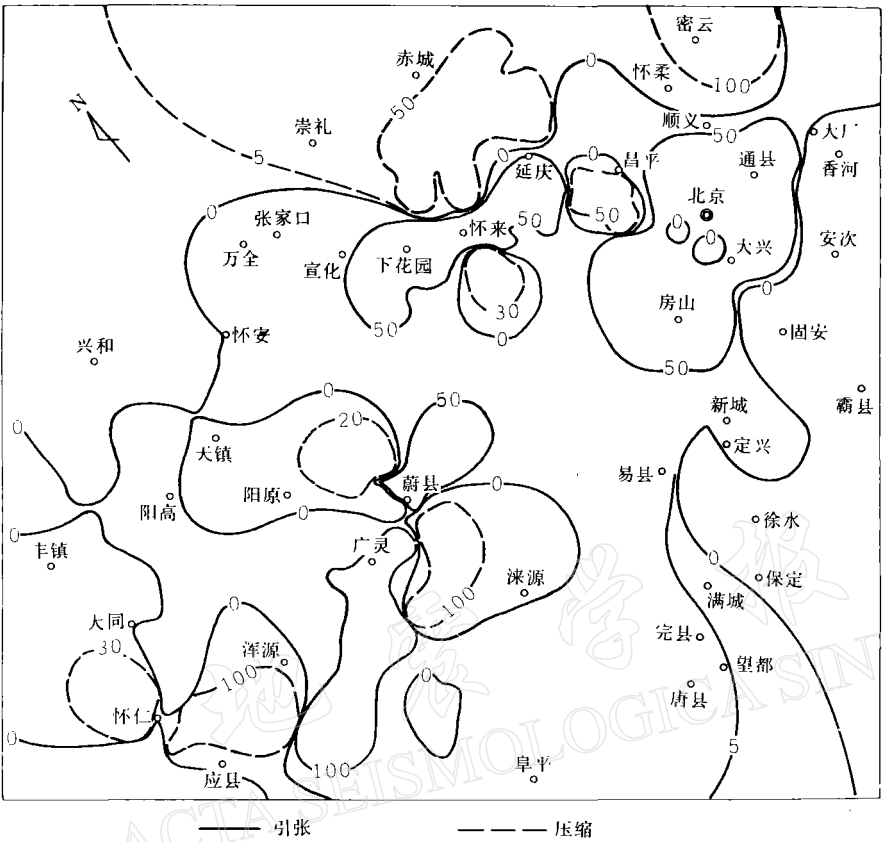


图 4 北京以西至晋冀蒙交界地区地震应力场在地表面的流体静应力($\tau_{11} + \tau_{22} + \tau_{33}$), 等值线单位是 10^6N/m^2 (图 4 和图 5 等值线单位相同)

五、未来强震活动区的判定

迄今的研究表明,大多数强震(尤其是大震)发生之前,在震中区及其周围一定地区内往往发生一些中小地震.根据这些中小地震的时空分布图象,结合构造应力场和地震应力场的分布特征,可以判定未来可能的强震活动区.

1. 近期的地震活动性

从图 6 看到,唐山 7.8 级地震发生后,1987 年以来,研究区内 $M_L \geq 3$ 地震的活动频度有所增强,相对集中在北纬 40° 以北的地区.而在北纬 40° 以南地区,地震活动频度较弱,主要分布在浑源与蔚县一带.不难看出,研究区内的 NNE 向、NE 向和 NNW 向断裂上地震活动较频繁.其中,在东部地区 NNE 向和 NE 向断裂的活动较强;而在西部地区,则 NW-NNW 向断裂的活动更为明显.

2. 未来发生强震地区的估计

根据上述构造应力场数学模拟的结果,研究区内主要存在两个应力相对集中区,随着

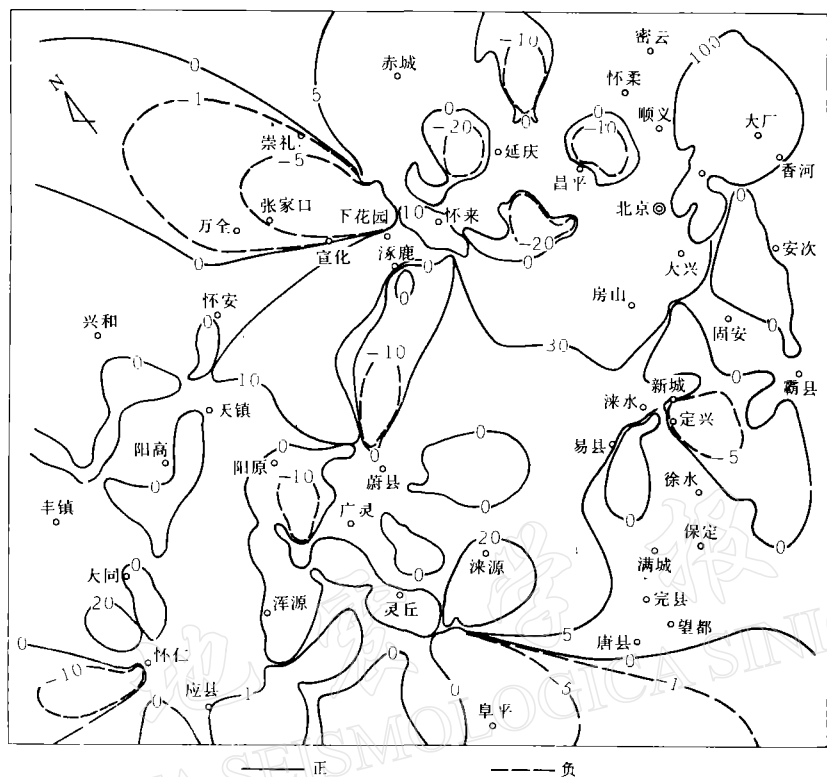


图 5 北京以西至晋冀蒙交界地区地震应力场 τ_{12} 分量(参考断层走向为 $N 40^{\circ} E$)

时间的推移,它们均有可能发展成为未来发生强震的地区.这两个地区是:

- (1)黑山寺断裂以北、牛心川—四回庄断裂以东与梁家庄断裂以南所围成的地区;
- (2)天镇北断裂与韭菜沟—黄土垴堆断裂和张皋断裂汇交区所围成的长轴呈北西向的区域.

在图 1 上已用虚线大致勾划出这两个地区的范围.然而,在这两个地区内沿不同走向的断裂发生剪切破裂滑动的难易程度并不尽相同.为此,尚需根据地震应力场的计算结果,具体判定哪些断裂更易破裂滑动.表 3 给出不同的附加应力状态下,两个地区内易于发生剪切破裂的断裂.在构造应力作用下,这两个地区的相对应力集中水平较高,但地震应力场在这两个地区内引起的附加应力水平却不相同.从表 3 看出,这种附加应力的作用更有利于第一个应力相对集中区内 NNE 向和 NE 向断裂发生剪切破裂滑动.换言之,第一个应力相对集中区未来发生强震的可能性要比第二个应力相对集中区大.而在第一个应力相对集中区内,怀来以西的下花园断裂(编号 20)、浑井东断裂(编号 21)与桑干河断裂(编号 25)的汇而不交处及其附近地区,既是应力相对集中部位(最大剪应力相对值最高),又是附加剪应力增加区和流体静应力的引张区,同时又是 $M_L \geq 4$ 地震的空区

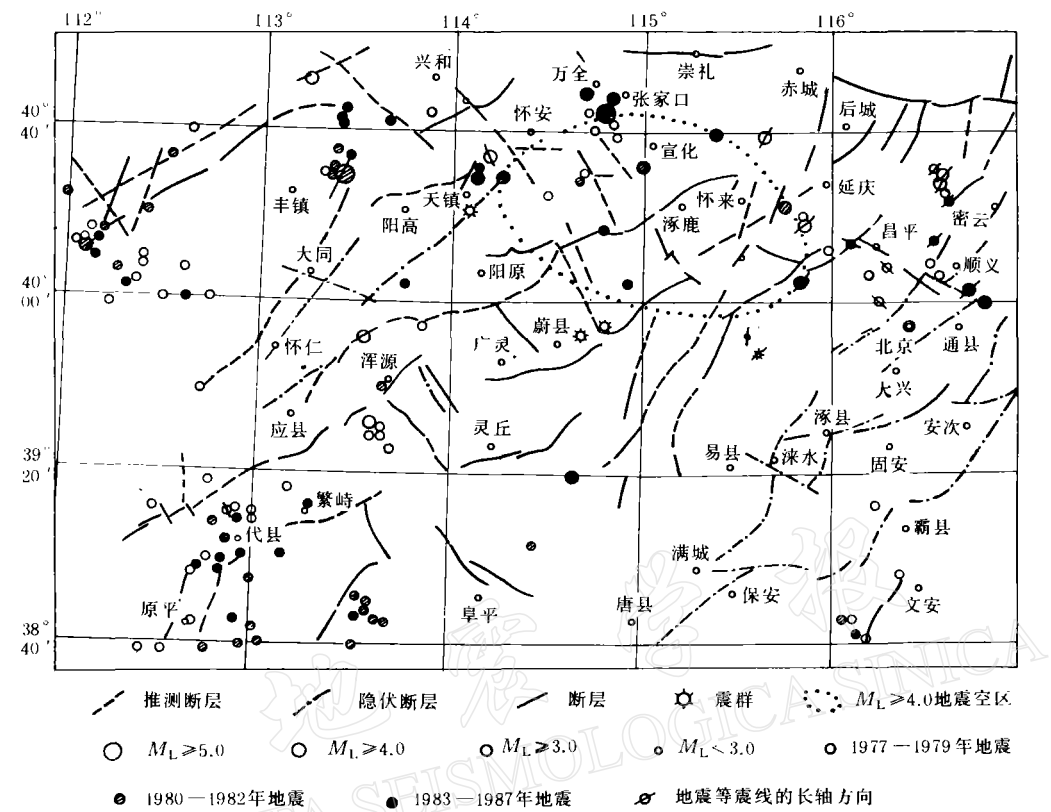


图6 北京以西至晋冀蒙交界地区1978—1987年 $M_L \geq 3$ 地震活动图

表3 不同附加应力状态下易于发生剪切破裂的断裂

附加应力状态	剪应力 τ_{12} 增加		流体静应力取 正值(引张)
	参考断层走向 N40° E	参考断层走向 N50° W	
第一应力相对 集中区	12、13、15、18、 20、36	无	12、13、20、21、 35、36
第二应力相对 集中区	32、33、38	42	32、33、40、42

注：表中数字为易滑动断裂的编号

(详见图6中的虚线圈),因而未来在该地区发生强震的可能性较大,应引起足够的重视,并加强相应的监测研究工作.

本文是《中国大陆及其不同地区综合预报判据和指标的研究》的一部分.在完成本文的过程中,国家地震局分析预报中心陈修启同志帮助计算地震应力场,并得到我所赵国光

同志的热情支持与帮助,在此一并致谢.

本研究系地震科学联合基金会资助的课题.

参考文献

- [1] 李群芳, 1984. 倾角对断裂周围三维应力场与位移场的影响. 地应力研究文集, 44 — 52. 地震出版社, 北京.
- [2] 鄯家全、时振梁、汪素云、环文林, 1979. 中国及邻区现代构造应力场的区域特征. 地震学报, 1, 9 — 24.
- [3] 李钦祖, 1980. 华北地壳应力场的基本特征. 地球物理学报, 23, 376 — 388.
- [4] 环文林、时振梁、鄯家全、汪素云, 1979. 中国及邻区现代构造形变特征. 地震学报, 1, 109 — 120.
- [5] 张之立、方兴、阎红, 1987. 山西地堑形成的力学模式及山西地震带的特点. 地震学报, 9, 28 — 36.
- [6] 李钦祖、靳雅敏、于新昌, 1982. 华北地区的震源机制与地壳应力场. 地震学报, 4, 55 — 61.
- [7] 武烈, 1986. 山西地震带的北西向和东西向地震活动带. 地震研究, 9, 675 — 683.
- [8] 刘建中、李自强, 1986. 从水压致裂结果讨论华北地区构造应力场. 地震地质, 8, 1, 75 — 82.
- [9] 郭增建、秦保燕、徐文耀、汤泉, 1973. 震源孕育模式的初步讨论. 地球物理学报, 16, 43 — 48.
- [10] 黄福明、王廷温, 1983. 多段断层均匀滑动的应力分布特征. 地球物理学报, 26, (增刊), 678 — 692.

THE STRESS FIELD IN THE AREA FROM THE WEST OF BEIJING TO THE SHANXI—HEBEI —INNER MONGOLIA BORDER REGION

Fuming Huang, Qunfang Li and Zhongqing Gao

(*Institute of Crustal Dynamics, State Seismological Bureau, Beijing, 100085, China*)

Abstract

According to the conditions of seismogeological structure and the data on seismicity in the area from the west of Beijing to the Shanxi — Hebei — Inner Mongolia border region, the tectonic stress field and the seismic stress field in this area are studied by using the finite element method and the dislocation theory. In the light of the distribution features of these stress fields and the characteristics of recent activity of small earthquakes, it is inferred that there are two relative stress concentration zones in the area. They are (1) the zone which is bounded on the south by the Heishansi fault, on the west by the Niuxinchuan—Sihuizhuang fault and on the north by the Liangjiazhuang fault; and (2) the zone with a NW long axis, which is surrounded by the intersection zone of the Tianzhenbei, Jiucaigou—Huangtugudui, and Zhanggao faults. Of these, in the first relative stress concentration zone, a strong earthquake will be more probable to occur in future to the west of Huailai at the place where the Xiahuayuan, Hunjingdong and Sangganhe faults converge together but do not intersect, or in its surrounding area.