

云南地震与应力场的初步研究*

杨光宇

(云南省地震局)

摘要

本文根据文献[1]提出的将有限元应用在研究地震方面的一种方法,对云南七个大地震,结合四级以上地震分布和应力场转变关系进行了探讨。计算说明地震活动性明显受区域应力场控制。从大地震迁移与应力场转变关系中对未来地震的三要素以及地震的孕育过程与前兆关系等问题进行了讨论,给出初步计算结果。

一、引言

多数地震是由于地下深处岩石受应力作用断裂而成的。在一个地区或一段时期,往往地震相继发生,并不是孤立的。表现为地震沿地震带从一个地方移动到另一个地方,或从这个地震带移到那个地震带。

地壳某处发生地震,其周围的应力场是会变的,同时伴随地形变、重力、地磁、地电、地球化学等一系列变化,目前可暂时归结为区域应力场作用的结果。

地震应力场的研究具有高度的综合性。鉴于各种研究地应力方法都在探索之中,而研究地壳内部应力则更为困难。因此,在研究地震的孕育、发生和发展及其分布规律时,若采用先进的数值计算方法——有限元法,则有可能促进这方面工作。作者试图反演云南地区十三年来七个大地震的序列,探索大地震迁移与应力场调整的关系,对未来地震危险区进行预测。

二、计算方案与说明

本文是应用一例。详细计算方案及力学模型可以参考文献[1]和[2]。

在计算中,重要的是根据地质及地球物理等资料,划分和确定出云南区域构造单元及其主要构造格架以及各种材料力学参数。假设水平的均匀边界外力作用,用逐次降低断层内摩擦系数的办法,计算地震应力释放后应力场的转变及调整。将计算结果和各种地震的实测资料相比较,必要时反复修改构造格架和力学参数以及边界条件等,直至最佳结果为止。

根据地震资料选取近十三年来 $M \geq 6.5$ 的七个大地震为反演序列,见表 1。

构造单元及构造格架的划分。鉴于云南处于构造极其复杂的地区,很难与川藏分离。

* 1979年12月4日收到,姜朝松、周瑞琦两同志参加此项工作。

表 1 云南七个大地震序列

名称	震中位置 (φ_N , λ_E)	发震时间 (年.月.日)	震 级	震源深度
东川	26°12', 103°12'	1966.2.5	6.5	5
通海	24°0', 102°7'	1970.1.5	7.7	10
普洱	22.9°, 101.0°	1971.4.28	6.7	33
昭通	28.2°, 103.9°	1974.5.11	7.1	20
龙陵	24°21', 98°51'	1976.5.29	7.3(7.4)	20
宁南	27.5°, 101.1°	1976.11.7	6.7	19
磨黑(普洱)	23°05', 101°12'	1979.3.15	6.8	5

据地质构造分析的结果, 我们选定包括上述七个地震在内的区域(见图 1). 将全区看成由 25 条主要断层组成, 按有限元要求共划分 773 个单元及 440 个节点.

材料力学参数为杨氏模量 E 和泊松比 ν 以及断层摩擦系数 μ 基本与文献[1]相同. 其中断层外是均匀材料, E 为 8.3×10^5 公斤/厘米². 为了区别各条断层的新老程度及地震活动的强弱的不同, E 分别为 6.0×10^5 公斤/厘米² 和 5.0×10^5 公斤/厘米². 由于红河断

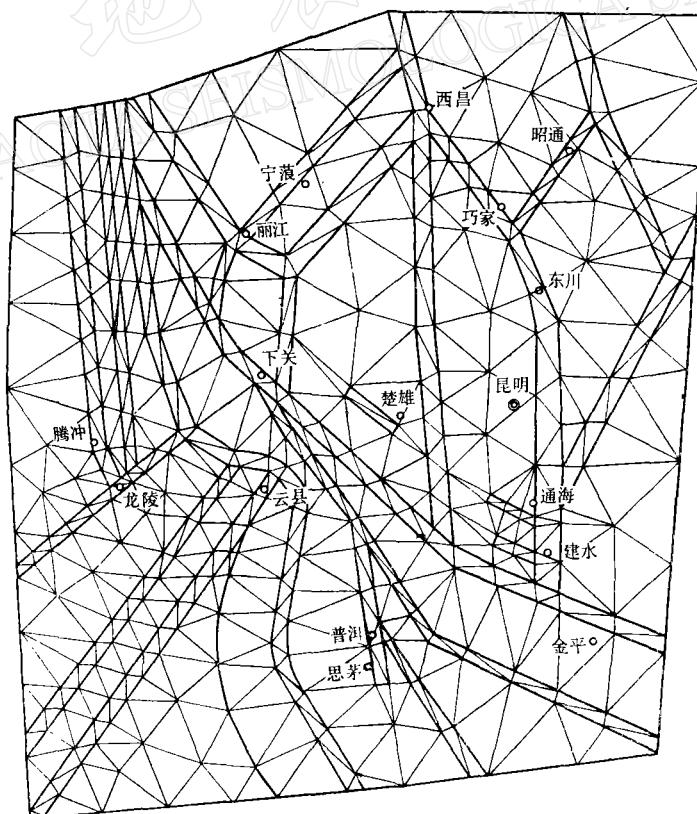


图 1 云南及邻区大地震数学模拟图

裂可能具有流变性质, E 取为 3.0×10^5 公斤/厘米².

在区域边界上作用的外力的选定, 根据前人关于西南地区应力场的研究^{[5],[6]}, 近似地把作用在本区边界上的外力看成是均匀分布的, 而且在 13 年内不变. 经试算, 由主压应力 σ_1 在 N60°W、N40°W、N20°W、NS、多种方向计算比较, 认为主压应力 σ_1 沿 N10°W 较好. 再经反复修改其它参数进行计算, 进行连续七次地震应力释放计算, 包括释放前的一次共要连续计算八次作为最后结果.

三、计算结果与讨论

通过云南大地震与应力场关系的研究, 使我们进一步认识到, 地震的孕育、发生、发展及其分布与应力场背景、调整和转变有密切的关系. 随着地震应力释放后应力场的调整平衡, 会形成多个应力变化集中区(指应力增加的地区), 其中应力变化集中区有可能发展成为震源区. 再从应力场分布和应力积累过程中认识到地震孕震过程的复杂性以及前兆异常的多样性. 分别有如下几点初步认识:

1. 云南四级以上地震分布基本受着区域应力场调整的控制

为了说明应力场转变与大地震的关系. 我们将各次大震后全区所发生的四级以上地震分别与各次大震后应力场调整进行对比, 发现地震的分布与应力场变化有密切关系(见图 2—8).

图中凡带斜线条的均是各次大震后最大剪应力增加的范围. 地震分布表明大多数地震发生在这些范围内. 说明这里计算的应力场具有一定的真实性. 因此, 磨黑地震后最大剪应力的增加范围(图 8)就是磨黑震后到未来大震前四级以上地震将要发生的地区.

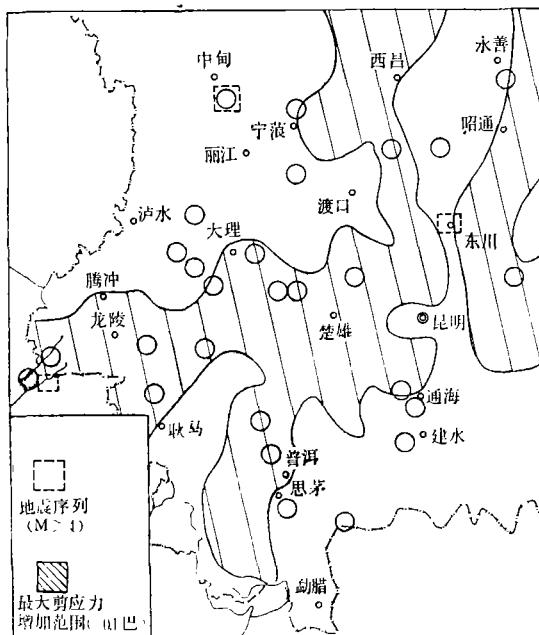


图 2 东川震后到通海震前, 震中与最大剪应力变化对比图

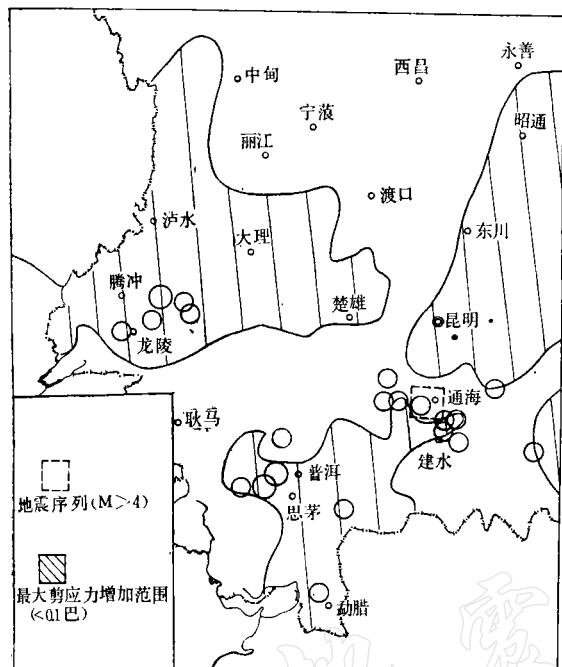


图3 通海震后到普洱震前,震中与最大剪应力变化对比图

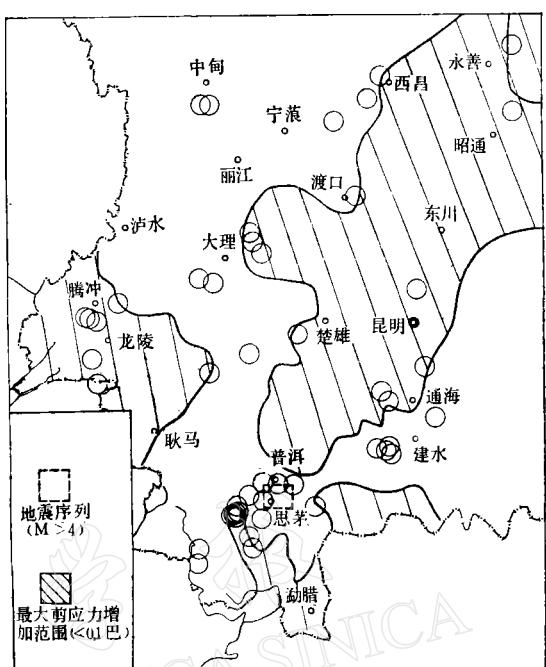


图4 普洱震后到昭通震前,震中与最大剪应力变化对比图

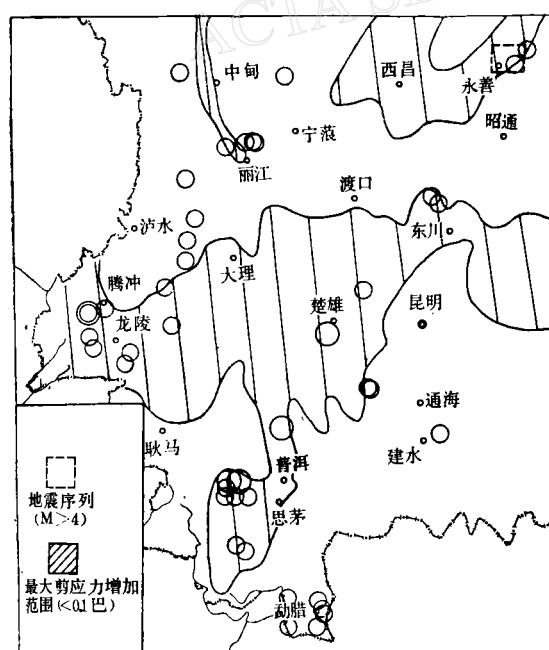


图5 昭通震后到龙陵震前,震中与最大剪应力变化对比图

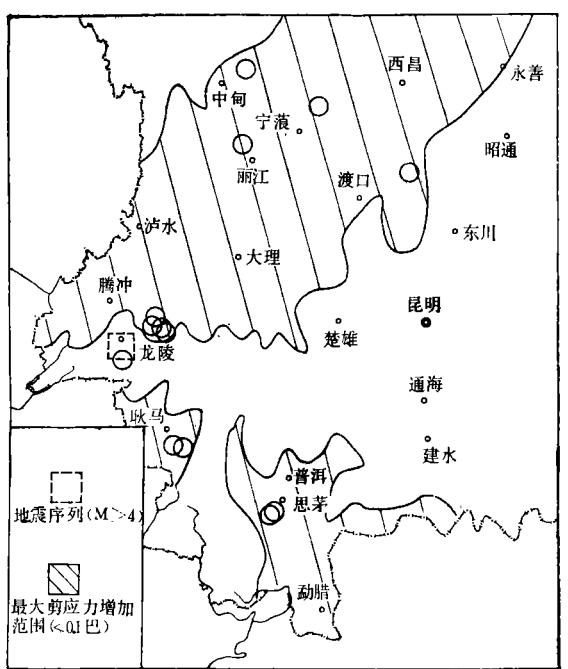


图6 龙陵震后到宁南震前,震中与最大剪应力变化对比图

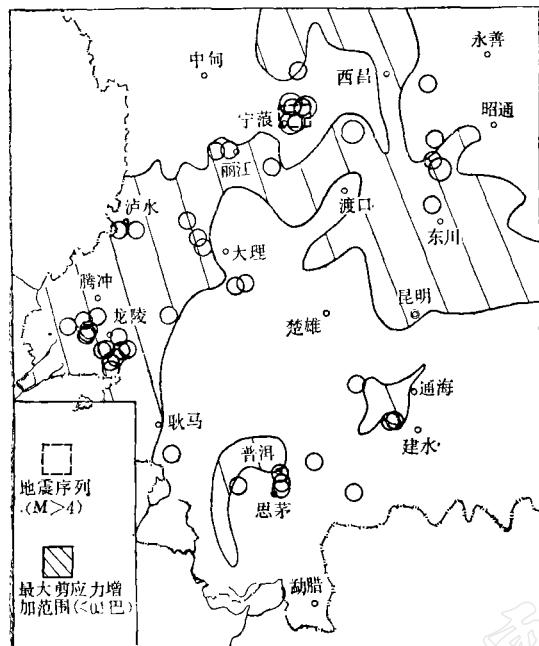


图 7 宁蒗震后到磨黑震前,震中与最大剪应力变化对比图

(地震资料取自地震快报, 1979.3.15—11.7)

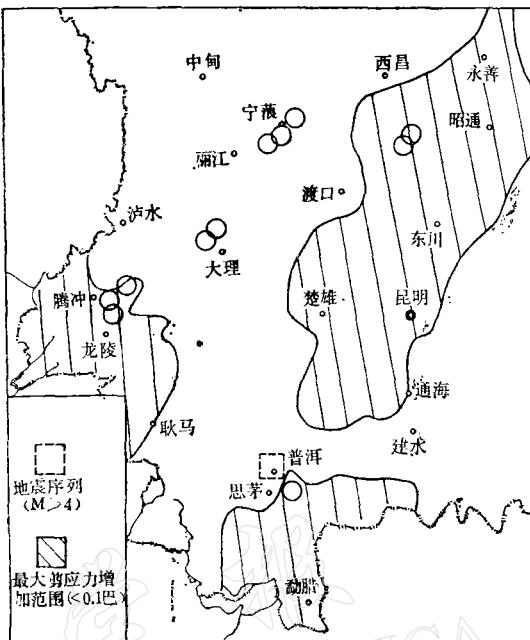


图 8 磨黑地震后震中与最大剪应力变化对比图

2. 应力场变化反映云南七个大地震之间的密切关系

再从图 2—图 7 中分析发现, 凡是最大剪应力增加区域的中心位置, 基本上是以后大地震或中强地震的震中区。例如昭通地震后(图 5), 估计昭通附近的应力场会有急剧调整变化, 分布很乱, 暂不考虑。于是还出现三块应力增加的区域。结果是后来龙陵和磨黑(普洱)相继发生了大地震, 楚雄发生一个中强地震($M = 5.6$)。用同样的方法分析其他几个大地震与应力场变化的关系, 最后得出云南大地震最大剪应力变化关系(见表 2)。

从图表中最大剪应力迁移关系中看出, 七个大地震之间的关系是复杂的, 初步有以下看法:

1) 几个大地震之间有直接影响作用 例如通海、普洱、昭通、龙陵、宁蒗等五个地震。从应力场调整转变来看, 上一个地震发生后对下一次地震的地区的应力场有明显的增加, 说明前一个地震对后一个地震的孕育有直接促进作用。

2) 有的大地震之间并没有直接影响作用 例如东川与通海地震, 从时间顺序, 东川地震后应力场变化在通海地区增加不明显, 却在普洱和龙陵两地区集中。分析认为, 普洱和龙陵两地震的孕育早在东川地震或以前就开始了。而通海地震的孕育与东川地震以前的大地震有联系。同样通海与昭通、龙陵两地震也反映这种关系。

3) 一个大地震的孕育到发生是前几个大地震共同影响的结果 例如龙陵地震孕育到发生是东川、通海、普洱、昭通四个地震后应力场变化共同迭加造成的结果。

根据以上分析可试图预测下一次大地震的地区。从图 7、8 可以看出, 宁蒗和磨黑两地震后应力场变化都集中在滇东北及滇西南两地区。因而估计今后在东川—昭通或腾冲

表 2 计算结果与实测资料相比较

地震地区 年.月.日	断层走向	断层破裂长度 (公里)	应变能(尔格)	最大剪应力增加区域 (地震危险区)
东川 1966.2.5	N20°W (N10°W)	14 (80)	3.55×10^{21} (2.9×10^{22})	普洱, 龙陵
通海 1970.1.5	N60°W (N60°W)	52 (52)	2.24×10^{23} (3.4×10^{22})	普洱, 昭通, 龙陵
普洱 1971.4.28	(N4°W)	26 (40)	7.02×10^{21} (1.72×10^{22})	昭通, 龙陵
昭通 1974.5.11	N45°E (N42°E)	53 (70)	2.82×10^{22} (2.28×10^{22})	龙陵, 宁南, 磨黑
龙陵 1976.5.29	N45°E (N54°E)	56.7 (100)	5.63×10^{22} (2.19×10^{22})	宁南, 磨黑
宁南 1976.11.7	N11°E (N46°E)	40 (50)	7.08×10^{21} (2.7×10^{22})	东川、昭通, 腾冲, 耿马
磨黑 1979.3.15	N50°W (N4°W)	(40)	1×10^{22} (1.5×10^{22})	东川, 昭通, 腾冲, 耿马

注: 应变能以 1 公里厚度计算, 括号中的数字是计算值。

—耿马两地区有可能发生 $M \geq 6.5$ 的地震。

3. 关于发生地震时间的讨论

以上讨论了将要发生大地震的地点。另一关心的问题就是大地震发生的时间。我们从瑞典巴特研究“1962 年地震从北大西洋向东迁移至缅甸”中发现迁移速度接近恒定的启示^[7]。对云南七个大地震之间试作十分粗略的估算(见表 3、4)。

表 3 云南七个大地震时间关系迁移率

地 区	距离(公里)	时间(天)	迁移率(公里/天)
东川—通海	250	1430	0.17
通海—普洱	210	480	0.44
普洱—昭通	651	1109	0.59
昭通—龙陵	654	758	0.86
龙陵—宁南	405	158	(2.6)
宁南—磨黑	495	858	0.58
平 均			0.53

一个是 0.53 公里/天, 另一个是 0.36 公里/天。从数字上看相差不大, 却代表不同的物理意义。由前面分析说明, 应力场变化迁移率有一定的可靠性。结合预测的两个地区, 计算得到时间上下范围为预估 1980 年 4 月—1981 年 12 月期间将发生 6.5 级以上地震的可能性较大。

4. 关于云南大地震背景与应力场分布的讨论

近十多年来, 为什么大地震总是发生在某一些地区? 有的地区地震频度、强度那么

表 4 云南七个大震最大剪应力关系迁移率

地 区	距离(公里)	时间(天)	迁移率(公里/天)
东川—普洱	411	1788	0.23
东川—龙陵	483	3764	0.13
通海—昭通	480	1586	0.30
通海—龙陵	405	2364	0.17
普洱—昭通	651	1109	0.59
普洱—龙陵	295	1856	0.11
昭通—龙陵	654	758	0.86
昭通—磨黑	642	1770	0.55
龙陵—宁南	405	158	(2.6)
龙陵—磨黑	306	1020	0.30
平 均			0.36

高,这些是值得我们研究的问题。

从云南现代最大主压应力等值线与中强地震分布图¹⁾(图 9),可以发现几个大地震地区均是应力等值线的奇异区(高值区或低值区)。初步认为,由于应力场分布不均匀和不

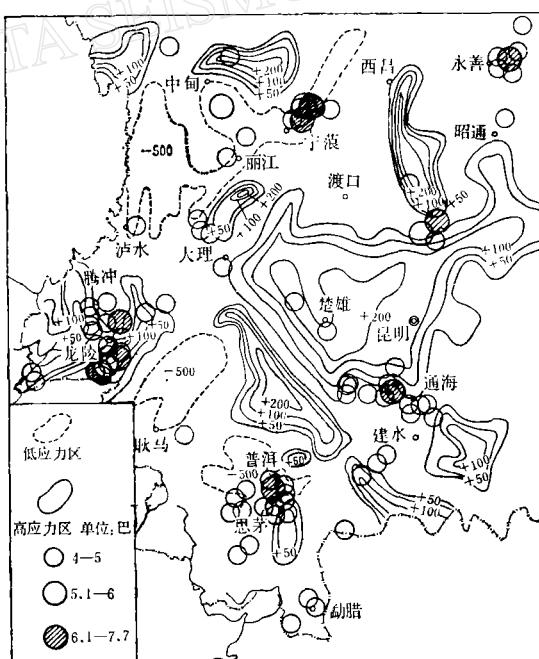


图 9 云南现代最大主压应力等值线与中强地震分布图(1966 年—1979 年 4 月)

1) 地震释放前最大主压应力等值变化不大,只作释放前的等值图。

稳定,在应力场调整中这些地区最敏感,所以大地震发生的背景是应力场奇异区,而大地震发生的顺序又是由应力场调整转变决定的。

5. 关于云南大震孕育过程及前兆异常的讨论

一个大地震的孕育,要在一定范围内的区域应力场作用下才能积累足够的能量。由于地壳的复杂和不均匀性必然形成多个应力集中区,这就会导致产生多个前兆异常区。

从七个大地震与应力场的关系中还看出,大地震应力积累时间是不一致的(这里应力积累时间是指应力场的变化中最初的应力积累到发生地震为止)。初步得出龙陵地震达10年之久(在龙陵地震总结中,形变测量和波速异常有类似结果)。昭通地震4年左右(钱兆霞从地震活动性中有类似结果),磨黑(普洱)地震5年左右,宁南地震为5个月(陈培善从断裂力学作出的有类似结果)。以每次大地震后应力场调整算作一次,则地震孕育过程中应力积累次数也是多次的。在这期间龙陵地震最少有四次。这些说明地震孕育过程是极其复杂的。

地震孕育过程的复杂性,必然会产生地震前兆的多样性。如前所述,多源应力区,应力积累的时间,应力积累的次数都会影响地震前兆异常的不同。这些就增加了用地震前兆来预报地震的困难。

四、结 束 语

虽然计算结果能说明一些问题,但也是非常粗浅的。特别需要指出的是未来地震的三要素纯属尝试和探索,还有一个实践验证和逐步完善的过程。

本文所采取的模型是最简单的,对于研究西南地区应力场的复杂性是远远不够的。因此,有必要进行更复杂一些模型的研究。

参 考 文 献

- [1] 王仁等,华北地区地震迁移规律的数学模拟,地震学报,2,1,1980。
- [2] 殷有泉等,非线性问题的有限单元法在工程地质中的应用,地质科学,3,1979。
- [3] 古登堡著,王子昌译,地球内部物理学,科学出版社,1965。
- [4] R. M. Stesky, W. F. Brace, Friction in faulted Rock at high temperature and Pressure, *Tectonophysics*, 23, 177—203, 1974.
- [5] 阙荣举等,我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动的探讨,地球物理学报,20, 2, 1977。
- [6] 李坪等,云南川西地区地震地质基本特征的探讨,地质科学,4, 1975。
- [7] 巴特著,许立达译,地震学引论,地震出版社,1978。

A PRELIMINARY STUDY ON EARTHQUAKES AND STRESS FIELD IN YUNNAN

YANG GUANG-YÜ

(Seismological Bureau of Yunnan Province)

Abstract

In the light of [1], i.e. to apply the finite elements method to earthquake studies, this paper has to some extent gone into the relationships between the distribution of earthquakes and the change of the stress field as regard to 7 big earthquakes together with a number of smaller ones with magnitudes $M \geq 4$ occurred in Yunnan. The results obtained from calculation clearly show that the seismicity was obviously controlled by the regional stress field. By analysing the relationships between the migration of big earthquakes and the change of the stress field, this paper has also dealt with the 3 principal parameters of future earthquakes, the relationship between the development of earthquake sources and their precursors, etc. preliminary results of the calculations are given.