

从溧阳六级地震的前兆特征 讨论中强震的预报问题

江苏省地震局分析预报研究室*

扬州~铜陵地震带位于大华北强震活动区和华南地震相对平静区的交接部位,中强震比较活跃。由于中强震震源应力场作用范围有限,时间不长,每个中强震的前兆有其相对的独立性——很少受大华北强震与本区其他中强震的影响。这就为检验前兆的准确性提供了较好的环境。1979年7月9日溧阳六级地震后经历了一年多时间的检验,我们将其较可靠的前兆收录在本文中,并进行了粗浅的综合分析。关于中强震的孕震分期问题,从这次地震前兆资料出发,划分为中、短、临三个阶段。这次震前的中期异常由于点位少,给识别带来了困难。短期异常点位较多,异常幅度大,变化急剧,并有一定的连续性,它对突破短临预报将会有实用意义。突跳形态的短临异常一般在震前半个多月就有出现,而大量的是在震前一至三天内出现。微观手段的临震突跳比较分散,宏观异常绝大多数出现在震中附近,如能及时识别和上报,对突破短临预报也是有价值的。

异常的时空分布

1974年溧阳5.5级地震后,在震中及其附近建立了具有一定密度的专业台站和观测网点,为1979年六级地震记录了较为可靠的前兆资料。下面对这次震前主要异常的时空分布特征作一概述。

一、中期异常

1. 波速比异常¹⁾ 溧阳地震台距马鞍山矿区人工爆破点约90公里(可能正位于全反射区域)。运用记录清晰的直达波和反射波的到时差计算波速比, $K = (t_{s11} - t_s) / (t_{p11} - t_p)$, 其中 t_{s11} 、 t_{p11} 分别为莫霍面反射波 S_{11} 、 P_{11} 的到时, t_s 、 t_p 分别为直达波 S 、 P 的到时。从1978年约2月份开始, K 值开始下降, 出现负异常, 发震前异常呈回复趋势, 幅度达5%。见图1、A。

* 本文由贺楚儒执笔

1) 董颂声等“利用人工爆破源探测震前波速比变化”,《中国地震学会地震学学术委员会论文讨论会论文摘要汇编》, 1980。

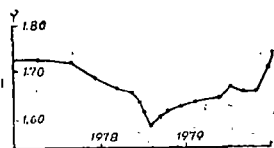


图 1、A 波速比
(滑动均值)异常

2.小震活动异常 1974年溧阳 5.5 级地震后,原震中区的小震活动衰减很慢。1978年开始小震频度明显下降,到震前半年震中附近没有小震活动,见下表:

时间	1975	1976	1977	1978	1979.上半年
频次	14	11	12	5	0

此外在整个 $N32.5^{\circ}\sim 30.9^{\circ}E117^{\circ}$ 以东至黄海,前几年都有相当数量的小震,但1979年前半年仅记录到一次 $M_s = 1.3$ 级的小震。

3.镇江船山矿自流井流量异常 该井孔深329米,为基岩裂缝水, $\Delta = 70$ 公里。1977年6月开始观测,流量基本稳定在每秒115毫升左右。1978年4月起流量逐渐减少。1979年4月底减少到最小,为每秒80毫升,约减少了30%。随后流量又逐渐增加,到6月下旬有所下降,形成一个“鼓包”(这可看作是短期异常)。震时出现大幅度的上升。如图1B所示。

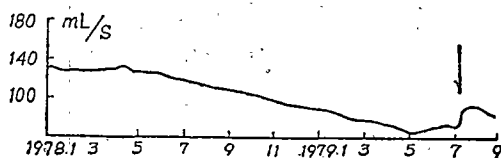


图 1 B 镇江船山矿自流井流量异常

4.镇江船山矿自流井的水氡异常 该井孔自1977年开始观测以来,氡含量变化与气温、气压相关性很好。1978年9月下旬至12月中旬停测。12月下旬恢复观测,与相关曲线比较,观测值出现幅度达30%的正异常,后又缓慢下降——与相关曲线变化反向,直到发震。震后到1979年8月迅速恢复到正常值。如图1、C所示。

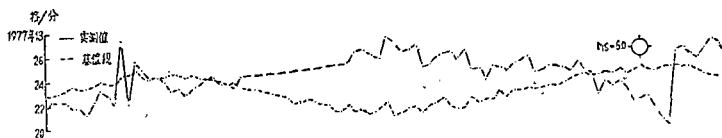


图 1、C 镇江船山水氡五日均值图

5.南京台短水准异常¹⁾ 该场地位于南京——溧阳上兴埠断裂与长江破碎带交汇处的东南, $\Delta = 80$ 公里。AB(基岩)边高差经距率计算从1974年观测以来波动幅度约0.5毫米。

1978年7月份开始趋势性抬升,最大幅度为1.1毫米左右。1979年1月开始反向下降,3月份回到基线,当再度开始回升时发震。见图1、D。

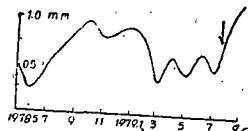


图 1 D 南京台三角
水准AB道

6.南京台地应力异常* 南京台地应力为电感法,1977年6月投入观测,东西、北 30° 东、北 30° 西三个方向的元件同时从1978年10月下旬开始出现“鼓包”式的正异常,异常峰值在1979年3月,正异常结束即发震。附加应

1)孙绍纪“溧阳地震的地形变前兆变化”,1981。

力主方向 σ_1 在整个异常期内以北 30° 西为稳定角域,先后向北西西方向有所摆动。见图1E。

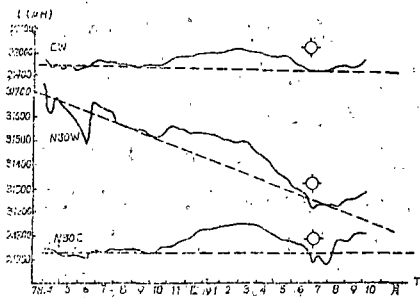


图1E 南京台地应力异常

1979年6月26日开始,日变曲线多次被拉平,呈现出阶梯状突变。7月9日震前变化更为显著,这可能反映了近震中水动态异常的一种特有形态。

3. 苏州市369*井水位异常 该井深369米, $\Delta = 130$ 公里。水位自记曲线表明,水位在年变下降的背景上,1979年6月11日~25日水位加速下降(每日5 mm),25~28日水位变化与固体潮相位反向并上升(每日8.3 mm),6月28日至7月3日下降速率时大时小,7月3日到7月8日下降速率增大至每日9 mm,为前所未有。临震前两天速率有所减缓。

4. 无锡县拖拉机厂水氡异常 该井孔深105m, $\Delta = 100$ 公里。1978年7月开始观测以来,氡值一直在2~3格/分左右波动。这次震前一个多星期测值逐步增大,在达到最大值6~7格/分时即发震。

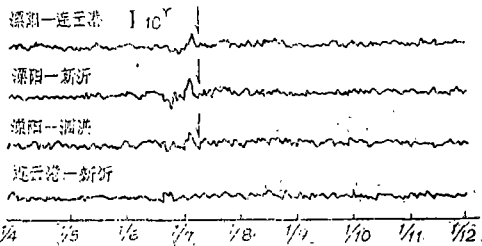


图2、B 地磁Z分量 21^h 值差值图

6. 自然电场异常 震中附近1—200公里的范围内,有相当一部分自然电场(土地电)出现短期异常。主要异常形态是在长期(1—2年)平静的基底上震前两个月出现趋势性变化,有的缓慢,有的急剧。一般在趋势接近完成时发震。

二、短期异常

1. 安徽泾县连通管东西向异常 该连通管安装于山洞里, $\Delta = 100$ 公里,东西向的记录曲线一直比较平稳。从1974年4月下旬开始连续下降,5月底转平,6月23日出现突跳,以后回升。7月4日上下波动到发震。见图二、A。

2. 丹徒荣炳华山31*自流井(1)异常 该井深367米, $\Delta = 45$ 公里,正位于茅山东侧断裂上。以往所记录的水位日变形态(由固体潮引起的地下水水潮)成正弦波形。从

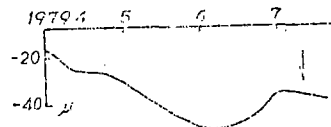


图2、A 泾县连通管

5. 核旋垂直分量观测异常¹⁾ 震前在震中区附近的一些专业台站每天21点(北京时间)用北京大学地球物理系生产的核旋分量仪观测垂直分量绝对值,对每两台之间作简单差。六月下旬差值曲线表明溧阳台($\Delta = 18$ 公里)的观测值有较大波动并上升,七月六日上升到最大值达10伽码左右,接着下降到正常值时发震,见图2、B。

1) 彭纯一、张四维“溧阳六级地震前核旋垂直分量异常”, 1981。

三、临震前兆

1. 微观临震前兆 如果以出现突跳为进入临震阶段的标志, 则一般是在震前半个月左右开始的, 极少数提前到20余天, 震前观测到的微观临震突跳比较可靠的点位有: 徐州市电解化

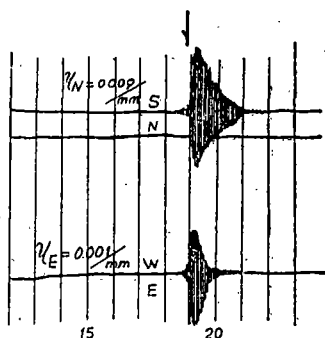


图 3、A 徐州市倾斜仪
突变(光记录)图

工厂金属丝地倾斜(在山洞里, $\Delta = 370$ 公里), 震前无趋势性和短期变化。震前19小时东西、南北向均出现突跳, 见图 3、A, 突跳矢量指向东南(即震中方向)。无锡县拖拉机厂的水氦异常在短期趋势上也迭加有突跳, 见图 3、B。南京台电感地应力在震前27天三个方向的元件同时出现突跳, 见图 3、C, 以后陆续出现突跳现象, 最大幅度达 $600\mu\text{H}$ 。南京卫岗采用短极距、同性铝电极(DD—1 记录仪)记录震前电磁信息。在震前7月5日、6日记录到了141组波型, 形态特征类似于充放电, 周期约为 $0.1 \sim 0.05$ 秒之间¹⁾。自然电场(土地电)出现临震突跳最早的在六月底, 最晚的在震前数小时。但由于干扰因素太多, 突跳是经常有的。经反复核实有十来个测点的突跳比较可信, 一般分布在距离震中

1~200公里的范围内。

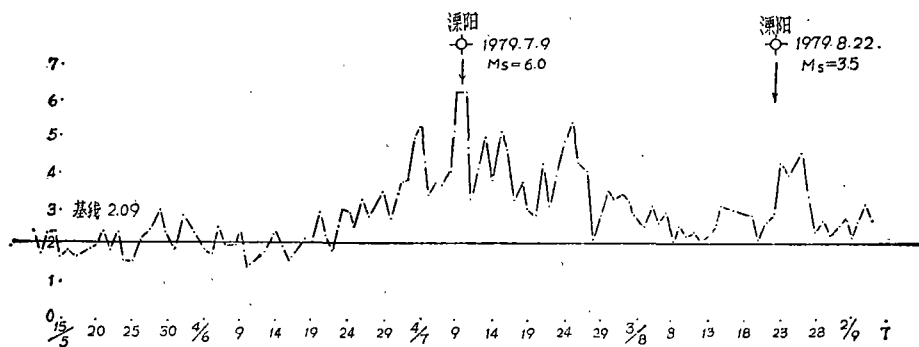


图 3、B 无锡县拖拉机厂水氦突跳

2. 地下水临震宏观异常 由于震前半个月苏南地区有一个连续降雨过程, 一般民用井受干扰较大, 它虽然给异常的分辨带来了困难, 但仍收集到了不少比较可靠的地下水临震异常资料。据统计共约21起, 其中民用井15口, 泉水2处, 深井4口; 位于震中区的有11口, 只有个别井分布较远。异常起始最早的在震前7~8天, 主要在震中外围。震中区的异常一般在震前三天开始, 而大多数(占67%)集中在当天。异常形态是以水位上升居多, 占总数的一半, 下降的只有三起。其他井出现浑浊、冒泡、发臭等现象。

3. 震前动物行为异常 据统计较可靠的有67例, 其中水生动物(鱼类)居多, 占总数的

1) 张德齐等“溧阳六级地震前的临震电磁波信息”, 1981。

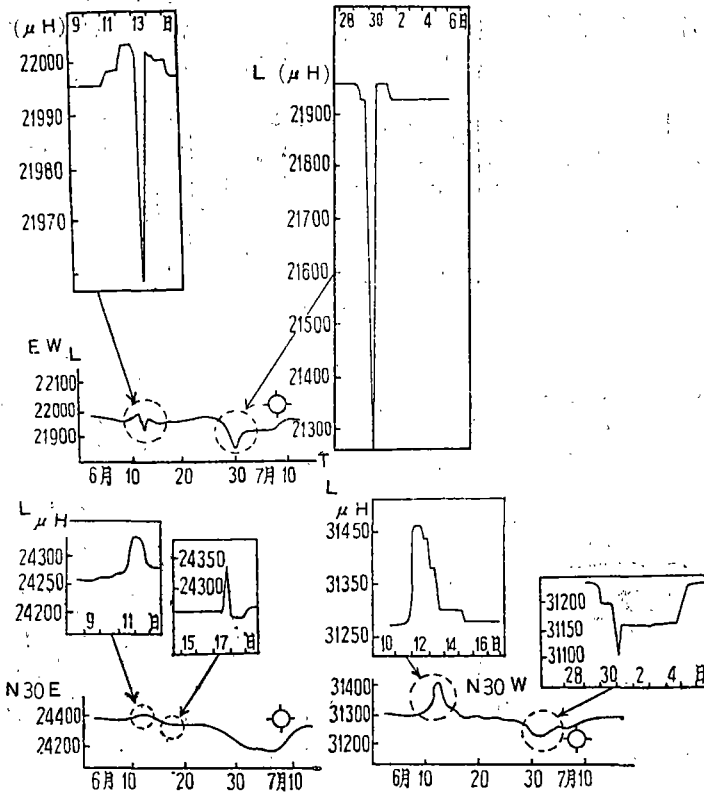


图 3、C 南京台地应力突跳

63%，而大牲畜的行为异常不很明显，这是以往震例中少见的。鱼的异常表现为跳出水面，有的甚至跳到岸上。动物行为异常一般在震前三天开始出现，而72%的异常出现在当天。动物行为异常的分布很集中，绝大多数出现在震中区附近，只有极少数出现在距震中约50公里的地方。

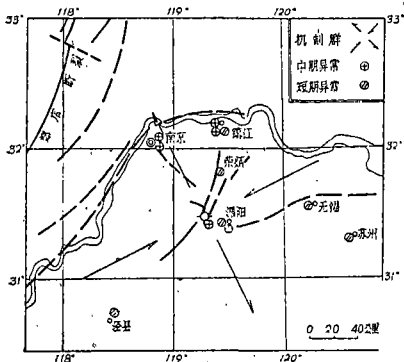


图 4 震源机制解和中短期异常的空间分布

四、构造应力场与前兆异常的空间相关性

对于这次地震的构造应力场有不同的看法。有的认为地震能量主要是由北西西向断裂释放；有的则认为是在北东向压应力震源应力场作用下，沿茅山东侧断裂由北一南破裂而释放能量。这里取由国家地震局分析预报中心提供的这次地震的震源机制解与前兆异常的空间分布（见图四）相比较：

1. 基本一致的。如南京台电应力的附加主应力方向 σ_1 指向震中；深阳地磁台的核旋垂直分量的异常形态与膨胀磁效应⁽²⁾的理论定性地符合。

2.相反的居多。例如位于节线附近的镇江船山矿流量和水氡、丹徒荣炳井的水位,异常十分明显;处于源外引张区的无锡县水氡为正异常,地形变异常与双力偶机制解的理论期望也不一致¹⁾。

形成这种复杂现象的主要原因之一可能是地质构造的不均匀性,另外震源机制解是地震发生一瞬间的力场分布,它与震前应力场分布的不一致性在实验室已得到证实^[8]。因此建立起地震前兆空间分布规律的理论是有待解决的难题。

中强震短临预报问题

一、发震时间的判断

1.识别中期异常对抓短临异常有着重要的指导意义。目前我们十分强调突破短临预报,这无疑是个关键问题,但决不可轻视识别中期异常的重要性。这次地震可能是从1978年初小震活动出现异常、视波速比下降为标志进入孕震期的。1978年4~5月份外围的镇江、南京等地陆续出现一些中期异常。1979年1月前后中期异常的转折已经明朗,主要表现为小震活动开始出现震前的平静,中期异常开始出现转平和反向。5月份前后中期异常结束向短临演变。整个中期异常形态特征是变化平缓,开始是缓慢地单调地上升(或下降),而后转平再反向,异常阶段性明显。这次地震的中期异常图形(见图5、A)与某些理论模式^[4]是一致的。一般都在异常结束发震。这对判断大体的发震日期是有益的。从这个震例看只有少数测点有中期异常显示,这就增加了识别的困难。但一个中强震的发生有一个由量变发展到质变的必然过程,我们必须努力去把握各个发展过程。脱离对事物全过程的认识,在未掌握中期异常以前,孤立地去抓短临,看来会更困难。因此,掌握中期异常仍不失其对抓短临的指导意义。

2.短期异常显著,点位也较多,在未来的中强震短临预报中将发挥实际效用。从这个震例看短期异常形态变化急剧,幅度也大,大多保持一定的趋势,有连续性。异常时间的起始和终止与发震日期之间的关系是复杂的。图5、B中的 T_1 、 T_2 分别表示异常时间约两个月

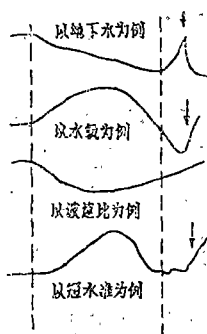


图5A 中期异常示意图

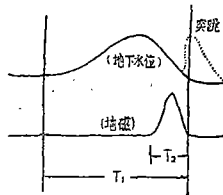


图5B 短期异常示意图

1) 冯德益“震源外围应力场与地震前兆现象的初步理论分析”。

和半个月,具有异常时间 T_1 的有形变、地下水、土地电等异常, T_2 有水氡、地磁垂直分量等异常。各种异常形态与震中距的远近无必然的联系。

看来识别不同类型的短期异常,对突破短临预报具有重要意义。

3.关于突跳用于判断临震日期的问题。从这次震例看,突跳最早的出现在震前27天,最晚的出现在震前19小时。可见突跳起始时间是参差不齐的,也是不连续的,且引起突跳的干扰因素很多。因之,用于判明较具体的发震日期还有许多困难。但多种手段的突跳,可表明已进入临震阶段。

4.这次震前地下水和动物(特别是鱼类)的宏观异常同步出现,而且临近发震日期,如果能及时发现和上报,则可判明即将发震。

二、未来震中的判断

由于构造的非均匀性,在地震的形成和发展过程中往往各部位受力也不均匀,出现多个应力集中点是可能的^[5]。这就使得异常的空间分布分散、形态出现重叠等复杂现象;同时观测点位分布的不均匀,使得测点多的地域异常就可能多,反之就可能少,造成异常空间分布不均匀的假象。这就大大地增加了预报发震地点的困难。现结合这个震例作如下判断震中的尝试:

1.掌握较大范围的资料是必不可少的。从这个震例看,当时从苏中往北至山东、黄海沿海一带、安徽和浙江大部分都相对平静,异常多分布在沿南京、镇江、无锡、苏州一带,由此则可判明是沿长江破碎带、茅山断裂和无锡~崇明断裂有新的活动。

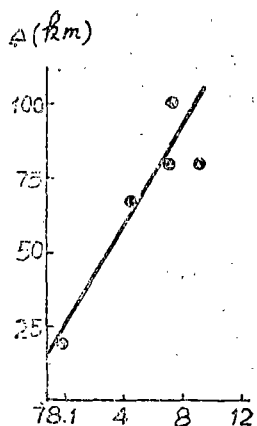


图5、C 中期异常
与震中距关系

2.尽管中期异常点位少,但仍能看出异常的起始时间随震中距的增大逐渐滞后(见图5C)。这可能表明在地震的孕育过程中前兆异常是从震源区开始逐渐向外扩展的。这对于判定未来可能的震中区是有利的。

3.注意研究孕震构造对异常空间分布的强烈控制作用。从这个地震看异常有沿孕震构造出现优势分布的明显迹象。处于北北东构造附近的丹徒、镇江等地,靠近机制解的节线,异常十分明显。处于东—西构造上的无锡、苏州等测点异常也较明显。这次地震就发生在北北东与北西西向断裂的交汇部位。因此,震前研究异常点位的构造特征,以期寻找发震构造,也许对于判断未来的发震部位是有希望的。

问 题 讨 论

1.扬~铜带在经历了24年的相对平静(没有发生 $M_s \geq 5.0$ 的地震)、自1974年溧阳5.5级地震后,1975年又发生了黄海郎家沙5.3级地震、1976年北黄海5.5级地震,说明该带进入了地震活动的高潮期,近几年内再度发生中强震的可能性是存在的。而这次6级地震与上次5.5级地震基本上是原地重复,见下表:

扬~铜带在同一地点五年内重复发生中强震是史无记载的。这样短时间内重复发震的原因何在?这次地震的能量是上次地震后重新积累起来的,还是上次地震所剩余的?还是两者兼而

时 间 \ 项 目	M_s	ϕ_N	λ_E	h_{km}
1974.4.22	5.5	31°26.9'	119°18.8'	~18
1979.7.9	6.0	31°28'	119°15'	~12

有之？这与溧阳震区的地体环境有何联系？这些问题都很有研究的必要。它对该震区今后地震趋势的认识是有密切关系的，今后应在震中区开展深部探测及其物理场的观测研究工作。

2. 距震中70公里的南京汤山温泉2号井水氡观测，自1974年开始观测，几年的实践表明沿茅山断裂带四级以上地震都有一定的异常显示。如1977年溧水4.1级地震异常持续有三个多月。这次溧阳地震与上述溧水地震震中相距仅十余公里，震源机制解也大体相当，然而这次震前2号井水氡值平静，无异常显示。溧阳震中附近有五口民用井，1974年5.5级地震前宏观异常明显，震后数年一直未停止观测。这两次地震是原地重复，机制解又大体一致，而且第二次震级还大，但上述五口井在这次震前却无宏观异常显示。这两个例子表明异常随时间变化的复杂性，说明两次溧阳地震不是简单的重复，每次地震后，震源体及其附近地区必定产生了某些不可逆过程（如地下水渗流条件的改变），因而使得同一点位的同一手段，对原地重复的两次地震其异常显示大不一样。这些不仅给地震三要素的预报带来了困难，而且对判明异常是否存在都产生了疑问。看来，我们不能以无异常的点位去否定出现异常的点位。每个点位异常的有无或形态的差异，其原因是十分复杂的，尚待今后作进一步的观测分析。

3. 为了比较有效地监视中强震的活动，探索其异常的时空分布特征，进而实现对中强震的预报，看来加强现场试验，布设密度合理的台网是值得研究的课题之一。

（本文1981年4月6日收到）

参 考 文 献

- [1] 程芝华等，溧阳六级地震前的地下水动态，地震战线，第五期，1980.
- [2] 祁贵仲，膨胀磁效应，地球物理学报，21卷—1期，1978.
- [3] 山川宜男，Stress Field of Focus Region, Journal of Physics of the Earth, №19—4, P347—353.
- [4] V.I. Mjachkin, Two Model of Earthquake Precursor, Pure and Applied Geophysics № 113, 1—2, P169—181, 1975.
- [5] 丁国钰等，地震预报现状，地震科学研究，1979.

FORERUNNERS OF THE LIYANG EARTHQUAKE OF JULY 9,
1979 ($M_s=6.0$) AND ITS IMPLICATIONS ON PREDICTION
OF MODERATE EARTHQUAKES

Abstract

After the Liyang Earthquake ($M_s=5.5$) of April, 22, 1974, networks have been established in the epicentral area and its adjacent region for observing various possible forerunners, including seismic activity, crust deformation, parameters of underground water (Radon content, water level, flow), geomagnetic and stress field variations. Because of these networks some continuous data were obtained before the Liyang Earthquake ($M_s=6.0$), the more reliable ones of them have been collected basically in this paper. A preliminary study shows that the preparatory process of the Liyang Earthquake (6.0) can be divided into three stages: the 1st stage began from early 1978 and is called medium-term anomaly, the 2nd stage, called short-term anomaly, started in May, 1979, the imminent anomaly (the 3rd stage) appeared half a month before the earthquake. Majority of the anomalies appeared at distances of about 100 km from the epicenter, and a few between 1-200 km. Macro-phenomena (anomalous behaviour of animals, changes in parameters of underground water and so on) appeared near the epicentral region.

The authors suggest that in order to predict moderate earthquakes, it is very important to identify the anomalous characters of each stage and to study the geological structures in the vicinity of the observing points at which the anomalies appeared.

This paper was discussed by us all, but He Chu-ru did the actual writing.