



航空航天遙感技術

地學應用研究

三斗坪

航空航天遥感技术 地学应用研究

主 编

张 雍

副 主 编

张学勤 陈 良 赵福岳 徐正聪

地 质 出 版 社

(京)新登字 085 号

内 容 简 介

本文集介绍航空航天遥感技术应用于地学领域中的实际例子及方法,涉及的内容有矿产远景区和靶区预测、构造及某些基础地质问题研究、灾害地质及工程地质问题、遥感新方法应用效果及一些处理方法,同时也介绍了国外在灾害地质中应用遥感技术的基本情况。

本文集可供地质矿产、石油、灾害地质、环境地质、工程地质、水利等生产、管理部门的遥感科研和管理人员使用,也可供有关院校师生参考。

航空航天遥感技术地学应用研究

张 雍 主编

*

责任编辑:陈 良 陈军中

地质出版社 出版发行

(北京和平里)

西安煤航地学制印公司印刷

新华书店总店科技发行所经销

*

开本: 787×1092¹/16 印张: 14.25 字数: 33700

1993年11月西安第一版·1993年11月西安第一次印刷

印数: 1000册 定价: 11.00元

ISBN7-116-01432-2/P·1170

编 者 的 话

祖国的大西北是我国改革开放、经济发展的重要地区之一，长江中游不仅是著名的“黄金水道”，而且长江三峡水利工程举世瞩目，关系全国。为了促进上述地区的经济腾飞和给三峡工程上马提供可靠的基础地质资料，在“七五”期间，地矿部地质遥感中心与兄弟单位紧密协作，应用航空航天遥感技术对新疆北山地区进行了地质普查与成矿远景预测，研究出一套应用多源数据拟合方法圈定找矿靶区和成矿远景区的有效方法；在长江三峡地区进行了系统的地质灾害遥感调查和库区稳定性评价等等，取得了显著成果。

为了总结和反映这些科研成果，发挥其多方效益，本文集编写组委托陈良同志对全文集各篇文章统一审定编辑，作为“航空航天遥感技术地学应用研究”一书公开出版发行。全书内容大体分为三个部分：一、灾害与环境地质；二、矿产与构造地质；三、方法技术。

由于编写时间仓促，水平有限，书中定会有不足或错误之处，恳请读者批评指正。

“航空航天遥感技术地学应用研究”编写组

1993年3月

封面设计、绘图：王艳君

前 言

近 20 年来,遥感技术的地学应用得到了迅速发展。我国已将航天航空遥感技术广泛应用于地形测绘、国土资源调查、区域地质勘查、地质构造研究、地质矿产普查预测以及水文地质、工程地质、环境地质、地热调查和各类地质灾害调查与监测。

近年来,地质矿产部地质遥感中心充分利用各种遥感资料在新疆北天山地区开展了地质普查与成矿远景预测;在长江三峡地区进行了库岸稳定性评价;在洞庭湖地区进行了新构造运动与江湖关系演化的探讨;在冀北地区开展了油气构造的判译与研究;在赣南地区进行了水土流失状况的调查,并在甘肃北山地区对 SIR-A 图像在地学领域的应用效果进行了分析与对比。特别值得提出的是,中心的科研人员在地质找矿中研究出一套应用遥感信息,结合地球物理、地球化学和地质资料,采用多源数据拟合方法圈定找矿靶区和成矿远景区,并取得了比较明显的效果。航空航天遥感技术已成为地质灾害调查的一种不可缺少的手段,并在国内外引起了高度的重视。

本文集即是在上述各项遥感地质调查成果的基础上总结撰写成文,较系统全面地介绍了近几年来我们利用航空航天遥感技术在地学领域所进行的研究与其应用效果,无疑它将推动遥感技术在地学领域中的发展。

由于作者水平有限,时间仓促,文中不足之处敬请读者批评指正。

张 雍

1993 年 3 月

目 录

前 言	张 雍
1. 航天技术在地震预测中的应用	强祖基等 (1)
2. 湖北秭归县新滩滑坡遥感地质调查	张 雍等 (14)
3. 长江三峡地区遥感信息的断裂构造解译与坝区稳定性的初步评价	邓兆伦等 (28)
4. 湖北巴东县三峡工程库区环境遥感地质调查	袁崇桓等 (41)
5. 长江三峡库区狮子口线性影像的断裂构造研究	张 雍等 (47)
6. 江西省赣州地区 1:20 万比例尺水土流失遥感调查方法探讨	袁崇桓等 (66)
7. 新疆博罗霍乐北山地区航空遥感信息与找矿	张学勤等 (72)
8. 应用遥感图像研究博罗霍乐北山地区几个地质构造问题	张学勤等 (81)
9. 河北承德—宽城一带遥感石油地质研究	赵福岳等 (89)
10. 从遥感地质看怀柔—承德地区构造特征和构造演化	赵福岳等 (103)
11. 应用遥感图像研究洞庭湖泥沙淤积规律及演化趋势	刘占生等 (115)
12. 甘肃北山地区航天飞机成像雷达 (SIR-A) 图像地质应用效果初步探讨	张 雍等 (130)
13. 新疆北山地区机载侧视雷达图像地质解译和成矿远景区的预测	张 雍等 (142)
14. 雷达图像计算机增强处理方法	杨清华等 (155)
15. 内蒙甲生盘地质体辐射温度测量及航空热红外扫描图像地质解译	肖继春等 (165)
16. 航空热红外图像的解译原理与工作方法	张振德 (172)
17. 宇宙成因的环形构造——冲击构造	徐正聪等 (178)
18. 国外地质灾害及其遥感调查预测	陈 良 (194)
图 版	(208)

航天技术在地震预测中的应用

强祖基

赁常恭

(国家地震局地质研究所) (国家气象局卫星气象中心)

地震预报是非常困难的,尤其是临震预报。在震前数天要预测出来,这就更困难。自1989年下半年以来,笔者利用航天技术进行地震预报试验,已取得一些进展^{[1][2][3]},较好地预报了一些地震,但也有漏报和虚报的情况。

一、航天技术引进到地震研究中来为人类 战胜地震灾害带来新希望

要以系统学的观点来研究地震前兆。地球的岩石圈、水圈和大气圈在一个系统中,三者之间是相互关联、相互作用和相互制约的。当岩石圈物质运动以一种快速运动——地震体现时,必然要影响地球的水圈和大气圈的变化。无论是物理能,或是化学能,最终必将转化为热能,并反映在岩石圈表面和大气低空。地震前出现增温震兆现象,早已为人们所注意和记载,但如何识别震兆异常一直是地震预报中的一个难题。采用在地面布设台站进行各项地震活动的地球化学和地球物理现象的观测方法,一是布置的观测点包括的范围有限;二是瞬时变化很难捕捉,难以识别震兆和非震兆。卫星遥感技术可以克服这些缺点,它具有测量周期短、时间分辨率高、覆盖面积大、测温精度高的特点。卫星的红外扫描仪与大型计算机系统结合使用,能实时地显示地球和水圈表面及云层面的温度变化,最擅长捕捉地震前岩石圈的“放气作用”和增温前兆的时空变化,使人们能及时真实地了解地震前兆情况,增强地震预报准确性。

二、震前在震源区周围出现突发性增温是普遍现象

对1989年发生在我国大陆的5.1级以上地震临震时地面增温的时空演变作了全面总结后,发现全年15次5级以上地震中有11次在临震时皆有地面增温现象(表1),占总数的73%,只有4次例外,占27%。

表1中增温异常起止时间,根据该次地震中周围许多台站地面温度变化曲线确定,起始时间定于温度从无规则跳动到线性增温的转折点;终止时间为震前线性增温的峰值位置。

从表1可知,具临震地面增温现象的11次地震,发震的时间贯穿春夏秋冬四个季节,震级5.1—6.8级不等,震中位置有盆地、高山和高原等,海拔约350—5600m不等。这说明中强以上地震临震时,震区出现较大面积的持续增温是一种相当普遍的现象。不同的地

震增温幅度 (2.3—15.5℃) 不一, 可能是受纬度和季节不同的影响。增温时间 (2d—7d) 不同, 有的震前有 1d 或 2d—3d 降温、平静期等。

表 1 我国大陆 1989 年 5 级以上地震临震期间地面增温异常

编号	发震时间				震中位置			震级 M_s	震区气象台震前地面增温异常记录				
	月	日	时	分	地点	纬度 N	经度 E		气象台	海拔 (m)	异常起止时间	天数	增温 (℃)
1	1	19	2	22	四川理塘	30.0	100.1	5.3	康定	2615.7	1.13—1.17	4	3.9
2	2	4	1	49	西藏尼木北	30.0	90.1	5.6	拉萨	3648.7	1.26—2.1	6	15.5
3	3	1	21	00	四川小金	31.5	102.5	5.1	小金	2369.2	2.24—3.1	5	10.0
4	5	7	9	38	云南耿马	23.5	99.5	6.0	孟定	511.4	5.1—5.6	5	8.2
5	6	9	23	46	四川石棉	29.3	12.3	5.3	九龙	5646.2	6.2—6.8	6	6.1
6	7	21	12	9	四川巴塘	29.8	99.2	5.8	稻城	3727.7	7.13—7.20	7	3.5
7	9	20	8	26	云南嵩明	25.4	103.1	5.1	宜良	1532.1	9.15—9.18	3	8.9
8	9	22	10	25	四川小金	31.5	102.6	6.6	小金	2369.2	9.18—9.22	4	7.5
9	10	18	22	57	山西大同	39.95	113.6	5.7	大同	1067.2	10.16—10.18	2	3.1
	10	19	1	1	山西大同	39.95	113.6	6.1	大同	1067.2	10.16—10.18	2	3.1
10	10	23	21	19	山西大同	39.9	113.8	5.2	大同	1067.2	10.19—10.21	2	2.6
11	11	20	11	20	四川重庆	30.0	106.7	5.4	沙坪坝	350.0	11.16—11.19	3	2.3

有 4 次临震前地表温度日均值并无明显增温, 甚至降温的特例 (表 2)。例如, 1989 年 4 月 9 日西藏尼木南 5.1 级地震, 日均值及 2 时、14 时温度值都无增温现象, 多呈脉动式。4 月 13 日四川巴塘 6.7 级、5 月 14 日青海唐古拉山 5.7 级和 10 月 8 日新疆民丰南 5.1 级

表 2 我国大陆 1989 年 5 级以上地震临震非增温的震例

编号	发震时间				震中位置		地面增温变化情况	震级	地点
	月	日	时	分	经度 E	纬度 N			
12	4	9	10	31	90.1	29.2	江孜: T_3^h 3—8 日, 降 8℃, \bar{T}_s 脉动式 乃东: T_3^h 4—8 日, 降 4℃, T_2^h 脉动式升	5.1	西藏 尼木南
13	4	16	5	34	99.4	30.0	\bar{T}_s 除小金、甘孜震前 5 天增 3.8℃ 外, 其他地区皆脉动式略降 甘孜、稻城两地 T_1^{4h} 有短时间 (3—4d) 大幅度增温, T_2^{0h} 12—16 日脉动式增 5—6℃, T_2^h 、 T_3^h 脉动式降	6.7	四川 巴塘
14	5	14	8	19	92.6	33.7	\bar{T}_s : 托托河 5 月 6 日—15 日降 11℃, 五道河降 4℃, 其他多呈脉动式, 但 T_1^{4h} 有 3d 大幅度增温	5.7	青海 唐古拉山
15	10	8	23	49	82.7	36.4	\bar{T}_s : 民丰、安迪尔河皆脉动式小幅度下降, 但 T_1^{4h} 民丰 10 月 5—8 日升 8℃	5.1	新疆 民丰南

注: \bar{T}_s 、 T_2^h 、 T_3^h 、 T_1^{4h} 、 T_2^{0h} 分别为地表的日平均温度和北京时 2 时、8 时、14 时及 20 时的温度代号

地震的 14 时都有短时间增温现象。

总之，震前有明显增温的 11 次异常多分布在中国东部地区，而 4 次例外情况全分布在青藏高原。这不难看出高原剧烈变化的气象因素对其产生的影响。

三、简述卫星热红外图像基本原理

卫星在 $10.5\text{--}12.5\mu\text{m}$ 红外波段接收的辐射是表面（地面或云面）发射的长波红外辐射。太阳辐射完全忽略。若不考虑大气辐射：

$$L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_s)\epsilon_{\lambda}(\theta)\tau_{\lambda}^{\uparrow}(\theta) \quad (1)$$

L_{λ} 为光谱辐射率， T_s 为表面温度， θ 是卫星的天顶角用以确定光程长度， B_{λ} 是光谱的 Plank 函数， ϵ_{λ} 是表面发射率， $\tau_{\lambda}^{\uparrow}$ 是表面到卫星云间透过率。

在 $10.5\text{--}12.5\mu\text{m}$ 波段内，表面发射率 $\epsilon_{\lambda}(\theta)$ 近似为 1。该波段为大气窗口区，其透过率 $\tau_{\lambda}^{\uparrow}(\theta)$ 也近似为 1，由 (1) 式可得：

$$L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_s) \quad (2)$$

式 (2) 表明，在一定条件下，卫星在 $10.5\text{--}12.5\mu\text{m}$ 通道接收的辐射仪值与物体的温度有关。物质温度越高，卫星接收的辐射越大；温度越低，辐射越小。如果将这种辐射转换成图像，辐射大用黑色表示，辐射小用白色表示，就是温度高为黑色，温度低为白色，这时红外云图上的色调分布就相应于物体的温度分布。因此，根据图像色调深浅可以判读温度的高低。由于大气温度随高度递减，所以根据色调深浅可以判断云的种类。

前面我们把地表面看成是黑体，且忽略了大气辐射的反辐射。由卫星测得的辐射推算的表面温度比实际低，求出的云顶高度偏高。因此严格说，红外云图是一张物体的亮度温度分布图，而不是实际温度分布图。

四、卫星热红外亮温与气象台实测温度对比

现将诺阿卫星 AVHRR 记录的云南澜沧—耿马地区的图像数据经校正后计算出亮温值与图像内各气象台站实测的相近时刻 (20 时) 的地面温度进行比较 (表 3)，可知气象台站实测地面温度 (T_s) 和近地表大气温度 (T_a) 与卫星上红外辐射计测得到的地面温度 (T_f) 是比较接近的， T_a 与 T_f 更为接近。卫星观测温度未经大气衰减订正，所以一般比地面台站实测的低。

地面台站多设在低洼谷地或平原区，离居民点又不远，往往形成一个孤立的热点，加上台站间距较远，它们只能反映观测台站周围一小范围的地表和底层大气温度及其变化。单独使用台站数据，对区域性的温度变化分析带来一定困难。地震前兆一般是靠突发的区域性地面增温来显示的。气象卫星却能反映大面积温度分布状态，且观测周期短。因此，利用地面台站与气象卫星两者数据，尤其是离震中较近的高山气象台站的温度资料配合使用，捕捉地震前兆就能取得比较好的效果。

表 3 卫星遥感温度与气象台实测温度对比

地名	经纬度	11月5日					11月6日				
		T_a^{20h}	T_s^{20h}	\bar{T}_f^{20h}	$\bar{T}_f - T_a$	$\bar{T}_f - T_s$	T_a^{20h}	T_s^{20h}	\bar{T}_f^{20h}	$\bar{T}_f - T_a$	$\bar{T}_f - T_s$
澜沧	N24°34' E99°56'	19.7	16.6	16.25	-1.65	-0.35	17.0	16.7	16.25	-0.75	-0.45
耿马 孟定	N23°34' E99°05'	22.2	21.7	20.25	-1.95	-1.45	20.9	22.0	19.25	-1.65	-3.65
景洪	N22°00' E100°48'	19.8	11.12	19.25	-0.05	8.25	20.1	10.31	19.25	-0.85	9.25
思茅	N22°47' E100°58'	17.3	15.0	16.25	-1.05	1.25	18.0	18.0	17.25	-0.75	-0.75
元江	N22°36' E101°59'	21.3	20.7	19.25	-2.05	-1.45	21.4	21.2	19.25	-2.15	-2.05

注： T_a^{20h} 、 T_s^{20h} 分别为气象台站实测20点（北京时）地面（0mm）温度（℃）和百叶箱（高于地面1.5—2.0m）所测的大气温度。 T_f 为卫星对该地遥感的平均温度（℃）

五、卫星热红外图像成像因素分析

从卫星热红外图像上捕捉有关震兆异常的信息是一个非常复杂的问题。即使一幅正常的热红外辐射图像，它的成像也是受到各种因素的影响。不同的岩性、构造、地貌具有不同的反射率（ ρ ）、吸收系数（ ϵ ）和辐射系数，即具有不同的辐射特性。因此，在相同的入射辐射，即同一日照等气象条件下，不同岩石、植被、构造和地貌形态的地表面会有不同的热辐射值。要识别一地区的热辐射异常，就必须先掌握不同季节气象条件下，该地区相对稳定的正常的热辐射分布状况。黑白片1、彩片1（5日）和彩片2（6日）是晚上8时（北京时）的热红外图像，黑白片1与彩片1为同一时间的红外扫描资料，从黑白片1上可看出每一像元点的实测亮温值，并勾绘出亮温分布概图。

图片对山川地貌轮廓反映相当清晰，但水系温度高低、连续性和清晰度各有差异（表4）。这些差别正反映了热红外辐射与构造及其活动性、地貌和岩性的关系。

对比红外图像与滇西南活动构造图（图1）可见，卫星图像上高温显示大小河流，多从活动构造带及其附近通过。其中元江和南定河断裂带是活动性最强的第四纪活动断层，沿河还有许多热泉（80℃—100℃）出露，故其温度值最高，连续性最好。其它，如澜沧江虽很宽，但属于新生代以来有过活动的断层，其活动性较弱，温度值较低，连续性较差。这些说明红外图像上沿水系分布的高温带，首先是活动构造及其活动程度的反映，其次是河水的红外辐射结果。

表 4 卫星热红外图像对主要山川的反映

地名	一般温度	图像显示特征	图像号 (数据来源)
元江	16.75-19.75	区内温度最高、连续性最好的河流, 但上游变差	2
南定河	16.75-19.75	区内温度最高、连续性次好的河流	1
澜沧江	16.75-17.75	N23°以南温度最高, 连续性好, 再往北无显示	2
墨江	15.75-17.75	从下游至上游, 温度渐变, 边界较清晰	1
把边江	15.75-16.75	从下游至上游, 温度下降, 边界较清晰	1
小黑江	14.75-15.75	温度不高, 但线性明显	1、2
南览河	14.75-16.75	温度分布不很规则, 界线尚较清晰	1
哀牢山	8.75-10.75	区内温度最低、连续性最好的山脉	1、2
无量山	11.75-13.75	卫片上界线较清晰	1、2

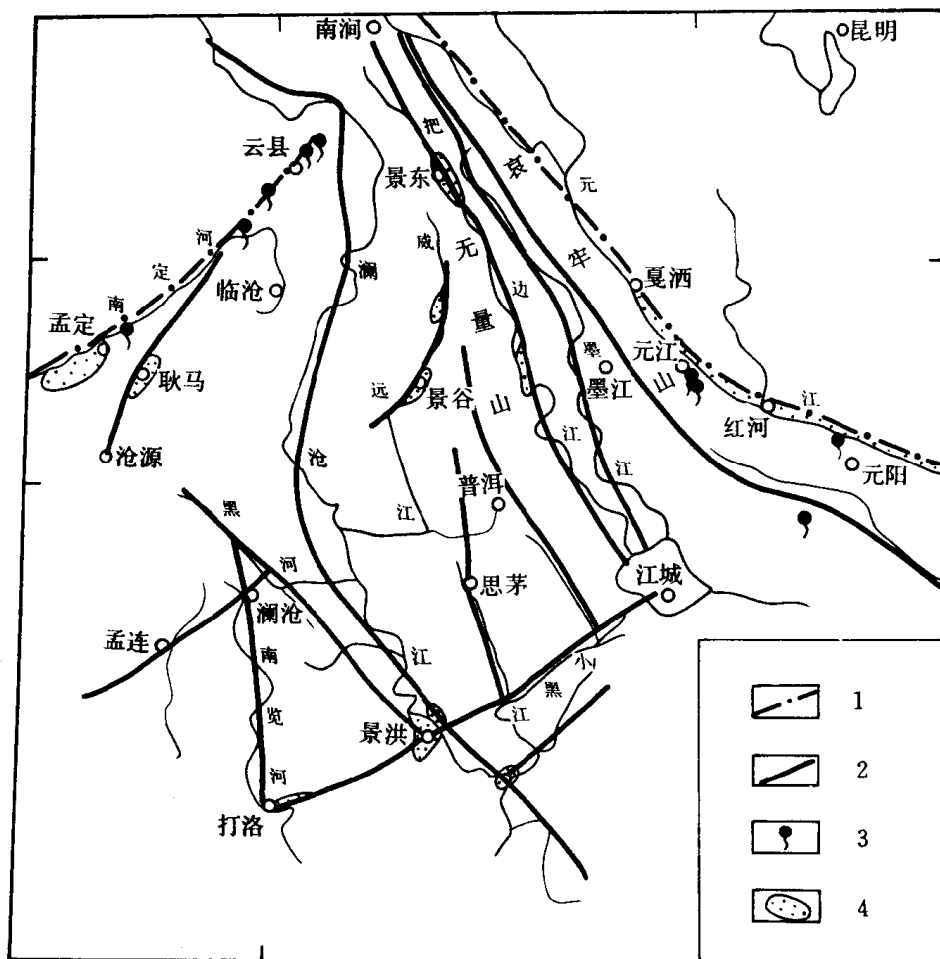


图 1 滇西南地区活动构造图 (据云南地震局资料)

- 1—第四纪活动断层；2—新生代以来活动断裂；
- 3—热泉 (80—100℃)；4—第三纪、第四纪盆地

同一条活动断层的不同地段, 温度值也有差别。这除了有的是由于不同的地段的

性不同之外,还与岩性、地形有关。如元江,南段温度普遍较高(19—20℃),漠沙(N 23.7°)以北温度开始降低(17—18℃),到嘎洒(N 24.1°)以北就难以找到温度较高的值。这与元江南段有厚度较大的第三系、第四系砂砾岩断陷盆地相吻合。元江以北这类沉积厚度急剧减小,到嘎洒以北就基本消失。在峡谷深沟,虽然水流温度较高,但难以向外扩散,在空间分辨率为1.1km(星下点)的情况下,就难以显示出来。红外图像所见澜沧江上游温度降低,可能也是同样原因。澜沧江虽然是滇西地区的大河,水量很大,但除南段北东向断层交汇的景洪一带有第四系盆地以外,其它地区多为急流深谷,在花岗岩谷底上流淌。这种温度与岩性的关系在11月5日的南定河的卫星图像上显示更清楚,河谷高温区(红色)呈上宽下窄的楔形,与其河谷宽度和断陷盆地分布状态完全吻合。由于温度存在垂直分布,故山区的温度高低与海拔高度关系密切。哀牢山西侧被断层深谷切割,成带状断块隆起,山脊高度多为2400m—2800m,为本区最高山,故自然成为图像内温度最低、界线清晰的低温带。因此,一个地区的热红外图像实际是该区构造及其活动性、山川地貌和岩性以及植被等的综合反映。

据 $w = \epsilon \sigma T^4$ 关系式,地物红外辐射的发射强度(w)除与辐射系数(ϵ)有关外,与地物的温度(T)关系很大,而 T 与日照、气温等气象因素关系密切。因此,在震兆异常与非震兆异常的识别中,要特别注意排除区域性的气象增温异常的影响。我国北方,特别是西北沙漠地带,到了夏季白天,在强烈太阳辐射作用下,往往呈现区域性的高温带异常。

由于红外辐射不能穿透云雾,故在云区 AVHRR 辐射计测到的是云顶的辐射,温度值很低,这就不能将它与无云的地面对比,否则易误认为是地面温度的突发性变化。这时,只好依靠云缝中的温度,估计地面的温度状况。

六、震兆热红外增温异常

应用卫星热红外异常增温作为震兆是两年来不断预报实践中总结的结果,仍有许多不完善的地方。为了说明问题的实质,选出3处地震作为典型例子分别描述如下。

1. **大同地震**: 1989年10月18、19日,山西大同一阳高地区分别发生了5.7和6.1级地震。震前尚未开展利用卫星热红外波段资料做地震预报工作,但正在总结1988年云南澜沧—耿马地震卫星热红外异常规律。当大同一阳高地震发生后,我们找出增温异常特征,发现震前数天卫星热红外异常非常显著。在正常气象背景下,确定异常范围及其强度,结果发现大同震前的热红外异常及其时、空演变特征。10月15日中午前,属基本正常状态,整个温度较低,照片颜色较均一,只有水系颜色稍深(约高一个灰度级2℃)。

10月15日中午开始增温,到16日2时(北京时,下同)止,可称初始增温阶段,主要于燕山山南出现一个增温带,沿滦河、潮河、白河等河谷向北部山区蔓延,界线较清晰,比北部山区共高2个灰度级(4℃)(图2)。

10月16日2时增温开始加强,到早晨增温达到最高峰,直到17日末,可谓增温加强阶段。最醒目的增温表现在华北北部边缘热异常沿滦河、潮河、白河河谷呈树枝状漫入燕山山区,表明华北盆地增温加强,增温范围也进一步扩大,南面扩展到满城,西面到右玉,北到张家口,总体呈NEE方向,面积约数 10^5 km^2 ,一般增2℃—4℃,高的增5℃—6℃

(图 3)。

10月18日零时到22时，发震前一天时间进入平稳状态阶段。此时温度逐渐下降，恢复到平静正常状态，图面颜色与15日近似。

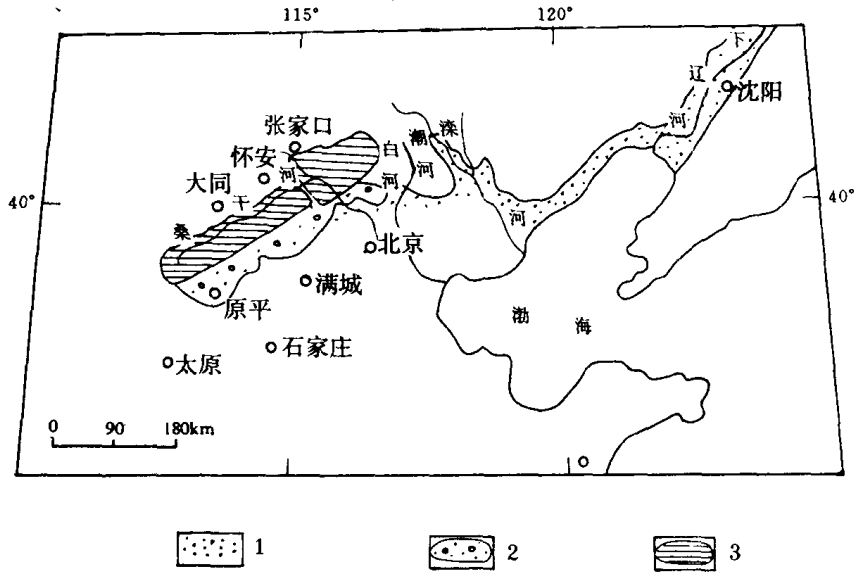


图 2 震前初始增温阶段热红外异常

(据 1989 年 10 月 15 日傍晚热红外像片)

1—增温 2℃；2—增温 3℃—4℃；3—线状云

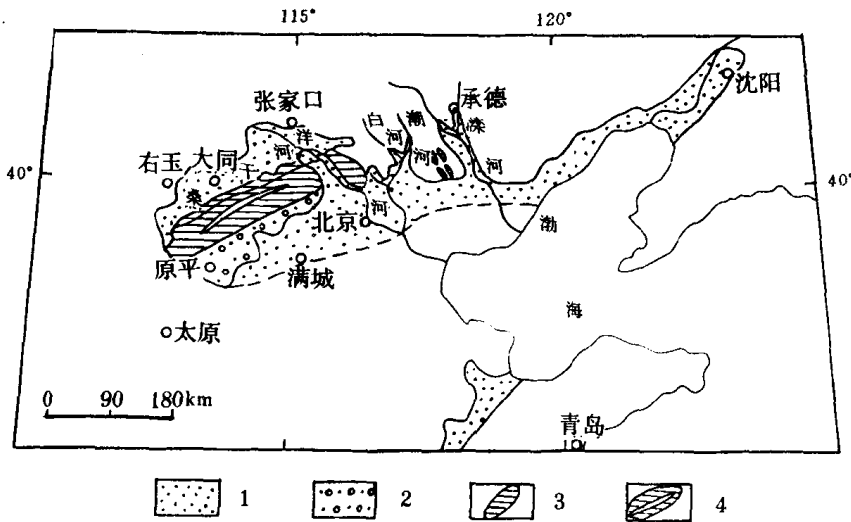


图 3 震前增温加强阶段热红外异常

(据 1989 年 10 月 16 日 2 时热红外像片)

1—增温 2℃—4℃；2—增温 5℃—6℃；3—线状云；4—热通道

为了剖析上述震前热红外异常是否由气象因素所致，我们进行了调查。结果是，震后不到半日，19日19时温度又出现增温趋势，到21日下午2时温度又达到主震前的温度状

况。为此，我们首次作了预报，结果10月23日21时发生5.2级强余震。为了明显看出相对增温状况，用10月23日19时图像温度值与19日19时温度值相减，即同时不同日期卫星热红外图像相比，得出一个令人满意的结果，即大部分平原或低地增温值为零或接近于零。而在五台山、恒山(N39°, E113°)及熊耳山(N41°、E115°)等山脊为相对增温区，增温为4℃—5℃。这说明随着时间的推移，地下逸出的气体向高处蔓延。

过了一年多时间，1991年3月26日又在山西大同一阳高地区发生5.8级地震。这次漏报了，主要是经验不足。25日下午已知道华北北部大同一阳高地区又在增温，还想再等一天，谁知26日晨2时地震就发生了。故此，应总结一下增温情况。从1991年3月22日下午，大同一阳高地区明显增温，桑干河河谷温度可达24℃，比周围高地及平原地区高出4℃—5℃，燕山山地与河北平原温度接近一个温度档次，连续几天断断续续增温，到3月25日下午还在保持增温直至震前。

2. **江苏常熟地震**：1990年2月10日，在江苏常熟发生5.1级地震。这是我们较好地做地震三要素预报的例子。1990年2月1日下午，在黄海海面出现局部增温。在N35°附近，E121°—122°之间的海区清晰可见有一呈孤立块状增温区，温度为6℃，面积约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ （因部分被云覆盖，实际增温范围更大）。该区温度比外围边缘温度高出3℃—5℃。在该增温区的东侧分布着冷空气入海的积云线（彩片3）。2月4日，黄海增温区继续扩大，增温范围扩大了3倍多。2月5日虽然有云覆盖，但是黄海云缝下还是看到增温（彩片4）。到2月6日，增温区已移到苏北、长江南岸地带（彩片5、图4）。2月7日云层覆盖，只有黄海北部还看到一些增温现象，其它都看不见了（彩片6）。根据这一变化，我们预报了此次地震，时间、震级都正确，而地点稍微差一些。

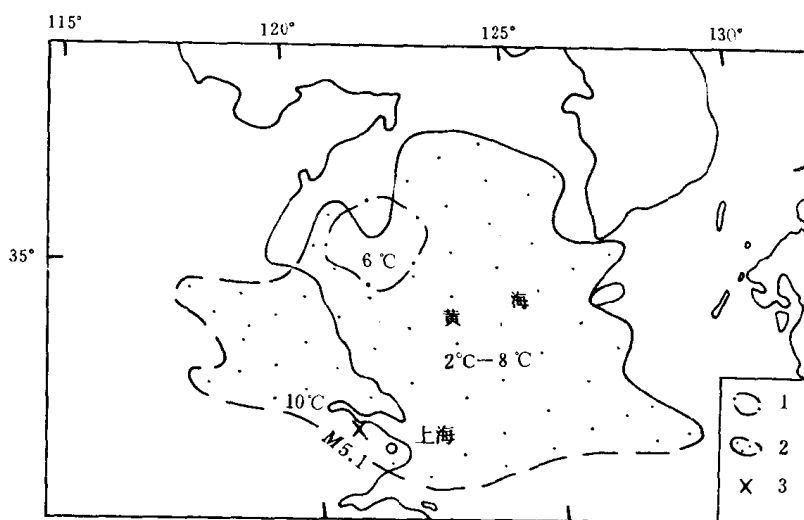


图4 江苏常熟地震增温异常图

1—1990年2月1日增温异常范围；2—1990年2月6日增温异常范围；3—震中

3. **台湾花莲东海域地震**：1992年4月20日2时32分，在N23.8°, E121.7°发生6.8级地震。震前4月16日，在台湾岛东北侧沿冲绳海槽出现北东向的增温异常带，海面温度为21℃，比周围高出2—4℃（彩片7），到4月17日增温异常区急剧扩大，海面最高温度升

至 22℃，增温范围已到达台湾岛东侧海域 N23°附近（彩片 8）。首先，在震情会商会上做了研究，后以正式书面形式向国家地震局分析预报中心做了临震预报，“预测 4 月 17 日至 5 月 4 日，在台湾海峡将发生 4—5 级地震；台湾苏澳东侧海域及台湾岛东北侧海域或琉球群岛将发生 5—6 级地震。如热红外征兆有进一步发展和变化，将进一步补充预报意见”。“台湾中央气象局”事后公布该地震为 5.6 级。总的评价，该次地震三要素预报都比较准。

七、卫星热红外临震增温与地球放气

地震时各断块间彼此摩擦生成大量热，足以使沿着断层两侧的岩石和土壤里的水汽化，并产生大量的电荷，如同雷暴中的放电那样。地震产生强大电场的强烈放电，使低空气体被电离，形成各种波段的地光（包括红外异常）现象。在中强地震前，由于断层释气量的大量增加，在低空电场（原有低空电场和断层摩擦产生的地电场）的作用下产生低空热红外异常。由于热红外异常与地震之间的相互关系的研究还刚刚开始，以前的地震记录没有该方面的资料，但已记录了许多大震前的地光现象。有地光的产生，必然有热红外的异常，它们只是在波长上的差别。其实，地震前大气的红外辐射异常比这种地光出现要早得多。

我们在 1990 年 5 月 23 日小汤山 3.8 级地震前，观测到小汤山温泉和光华热水中游离气体的惰性气体同位素有十分明显的异常变化，同时也有低空电场的明显突跳。5 月 8 日—9 日，5 月 11 日—12 日，5 月 13 日—14 日，北京低空电场突降，最大值为 -720V/m ，并有地面热红外异常。根据热红外卫片，5 月 18 日在北京西北部出现增温异常，大致为南北向，之后异常由南北向逐渐扩展，在 20 日成为东西向斑点状异常。另外，北京外围地区的渤海局部海域于 18 日也出现了热红外异常。

在 7 月 21 日的大海坨 4.5 级地震和 23 日唐山 4.5 级地震前，北京塔院断层土壤气中的惰性气体和一些气体成分有十分明显的变化。震前，7 月 2—3 日北京地区低空电场有突跳现象，最大达 -463V/m 。同时根据热红外卫片资料证实，7 月 21 日怀来大海坨 4.5 级地震的震兆，自 7 月 15 日在北京南面有小范围增温之后，热异常向北移动，16 日增温在北京周围呈北东向条带状，至 7 月 21 日，增温异常在延庆附近便聚集成团；7 月 23 日唐山 4.5 级地震热红外异常在 7 月 18 日出现，由东北向震区移动，21 日呈北东向热异常带到达震区。

1990 年 9 月 22 日，北京沙河东 4.0 级地震前，塔院断层土壤气的各项指标有明显变化。如 CO_2/Ar 正常比值为 1，9 月 11 日开始上升，持续约 10 天，最高值可高出平时约 10 倍。震前，9 月 10 日—11 日，北京地区低空电场突降，最大值为 -419V/m ，延庆最大突降值 -382V/m 。一般这二个地区的正常值为 130V/m 。根据卫片，于 10 日在北京西北部地面出现增温，11 日有北东向条带增温现象，其中渤海海面也有增温现象。12 日北京及渤海地区增温现象特别明显。

1991 年 5 月 30 日，唐山 5.1 级地震前 20 多天，塔院断层土壤气的 CO_2/Ar 值和其它惰性气体同位素比值呈明显的升高变化。另外，5 月 28 日和 29 日北京地区地面 CO_2 出现异常 -2.92×10^{-6} （表 5），根据热红外卫片，分别在 8 日、18 日出现增温异常，这段时间内低空近电场有突降异常 -422V/m 。

1991年7月27日滦县4.7级地震前,塔院断层土壤气中的 CO_2/Ar 、 $^{15}\text{CH}_4/^{16}\text{CH}_4$ 和惰性气体同位素比值都出现了异常, $^{15}\text{CH}_4/^{16}\text{CH}_4$ 的正常值为0.9。同时,地面大气的 CH_4 出现了异常现象,一般情况 CH_4 为 1×10^{-6} ,而7月10日为 6.2×10^{-6} 、16日为 9.3×10^{-6} 、23日为 5.6×10^{-6} 。在这期间,卫星热红外图像显示出连续异常,在7月10日并有低空电场突降 -264V/m (表6)。

表5 北京温室气体含量变化与地面增温一览表*

地震	年月日	地面测量 CO_2 含量($\times 10^{-6}$)	地面温度增值 ($^{\circ}\text{C}$) 6Am	卫星热红外 图像显示	大气低空电场 (V/m)
唐山 5月30日 M5.1 $\Delta 180\text{km}$	1991 5 8		1.2	✓	
	9	缺	0.8	✓	
	10		-0.3	●	-422
	17	资 料	-4.7	✓	
	18		0.14	✓	
	19		-0.40	✓	-422
	20		-0.50	●	
	21	2.92			
29	2.36				

*: ✓示卫星热红外图像有增温显示; ●示卫星热红外图像增温显示达到预报地震指标

CH_4 资料由环境科学院大气所齐立文等提供, CO_2 资料由北京大学环境中心邵可声等提供, 大气低空电场资料由国家地震局地球物理所郝建国提供。

表6 北京地区大气 CH_4 、 CO_2 含量变化与地面增温一览表

地震	年月日	地面大气 CH_4	(10^{-6}) CO_2	地面温度增值 ($^{\circ}\text{C}$) 6Am	卫星热红 外图像显示	大气低空 电场 (V/m)
滦县 7月27日 M4.6 $\Delta 200\text{km}$	1991 7 9	5.4	2.87	0.9	✓	
	10	6.2	2.38	-0.9	✓	-264
	11	3.1	2.67	3.8	✓	
	16	9.3	2.16	1.4	✓云缝	
	19	4.5	2.18		✓	
	20		2.23	2.8	●	
	23	5.6	2.35		✓	
	24	3.0	2.86	1.9	✓	
	25	3.16	4.80		●	
26	2.6	2.63	2.1	●		
27		4.85				

注: ✓、●同表5