

用第二代陆地卫星的热红外资料解译亚热带丘陵山区热量资源的方法

王茂新 叶一舫
(气象科学研究院)

郭振煌
(福建省气象局)

提 要

本文用LANDSAT探测的福建北部山区1984年12月26日白天幅和1985年10月29日夜同幅的TM热红外资料,探讨了了解译东亚热带热量资源的原理及定量方法,并分析了遥感上瞬时气象值在气候上的意义。认为只要有不同季节的遥感资料,用其解译当地热量资源在方法上是可行的。

一、引 言

我国亚热带面积约占国土总面积的四分之一,其中大约70%为丘陵山区。亚热带丘陵山区气候资源丰富,生产潜力很大,对其进行深入研究和开发具有重要意义。几年来,在我国东部亚热带设立近90个剖面观测点进行长年观测和分析,已取得了重要成果。但由于此山区地形极其复杂,垂直、水平方向差异均甚为悬殊,单靠常规观测,即使设立数十个站点仍会深感不足。而陆地卫星(LANDSAT)可以进行大范围同时观测,并且,TM传感器配有热红外波段,分辨率达120m,与常规手段相配合,是会弥补这方面不足的。本文以闽北山区为例,对解译温度资源的方法进行初步探讨。

二、解译原理

LANDSAT的TM传感器有7个波段,其中1—5及7波段为可见光和近红外波段,即测得的主要是地面反射的太阳短波辐射,第6波段为热红外波段,测得的是地球发射的长波辐射^[1]。

根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律

$$B = \sigma T^4 \quad (1)$$

可知黑体的辐照度 B (W/m^2) 与其绝对温

度的4次方成正比,式中 σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^{-4}$)。黑体辐射与其本身温度有着这样密切的关系,那么是否可以通过LANDSAT的热红外资料来解译地表温度呢,实际上,美国、苏联、日本等国很多学者在这方面已进行了不少研究,并取得了许多经验,我们也试以闽北为例,探讨解译东亚热带温度的方法。

公式(1)包括了黑体发射的所有波长的辐射,而LANDSAT离地面约705km,地面发出的热辐射要受大气吸收和散射的影响,从图1可以看出,水蒸气、 CO_2 、 O_3 在一些波段有很强的吸收带^[2],在遥感中必须选择透射率相当高的波段。普朗克定律表明了单色辐亮度与温度及波长的关系

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/k\lambda T) - 1]} \quad (2)$$

式中, $B_\lambda(T)$ 为温度 T 时黑体的单色辐亮度 ($W/m^2 \cdot Sr \cdot \mu m$), h 为普朗克常数 ($6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$), c 为光速 ($3 \times 10^8 m/s$), k 为玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} J/K$)。

由式(2)可以求出在温度为 T 时,黑体辐射的峰值波长 λ_m (μm),即维恩定律

$$\lambda_m = 2897/T \quad (3)$$

我们知道地球表面的温度约为288K,

所以辐射峰值波长约 $10\mu\text{m}$ ，而这正处在大气透射率很高的波带范围即大气窗内（图 1）。地球热辐射的峰值波长恰好在大气窗范围内，这具有很重要的意义。这说明地球表面接受太阳短波辐射使地表变暖之后，又通过大气窗以热辐射形式将能量散失到宇宙空间，在 288K 左右达到平衡，如果大气不在这个窗口，或峰值波长不处在其范围内，情况就会大不相同了。LANDSAT 的 TM 第 6 波段选用的正是此大气窗中的波带（ $10.4\text{--}12.5\mu\text{m}$ ）。从卫星得到的是 8 比特（0—255）数值化的数据，问题是如何从磁带上的数据推算温度。

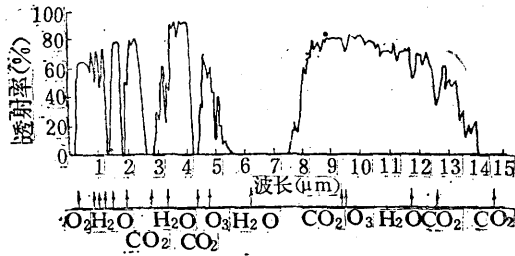


图 1 大气透射特性

1. 求算等效黑体温度

由于热红外波段处于大气窗中，在地面辐射到达卫星传感器的途中，大气的吸收及大气本身的辐射在此波段均较弱，暂不考虑这部分的影响，并且地球表面大部分地物的发射率均在 0.9 以上，接近于黑体辐射（表 1），为处理方便，假设均为黑体^[3]。在这一

表 1 各种物体的发射率

种 类	发 射 率	种 类	发 射 率
黑 麦 田	0.93	水 面	0.92
茂密的牧草地	0.97	冰 面	9.96
苜 蓿 地	0.95	腐 植 土	0.99
松 林	0.97	粘 土	0.97
灌木林	0.90	沙 土	0.90—0.95
草 原	0.90	混 凝 土	0.71—0.88
新 雪	0.99	玻 璃	0.88
旧 雪	0.89	铝 板	0.05

系列假定条件下，求出的地物温度称其为等效黑体温度（ T_{BB} ）。

设卫星高度为 r ，瞬时视场为 S ，瞬时视场角为 β ，则 $S = (\beta r)^2$ （图 2）。若红外传感器受光面积为 A ，则从地面看传感器受光面的立体角 δ 为 $\delta = A/r^2$ 〔4〕。

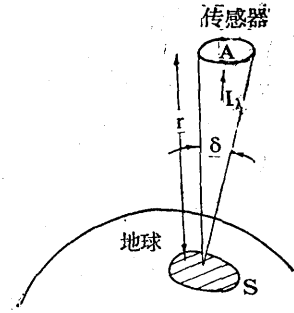


图 2 地面辐射与传感器接收

若地表发射率为 ε_λ ，整个传感器光路对辐射的透过函数为 φ_λ ，大气透射率为 τ_λ ，若不考虑大气辐射的影响，传感器接收的能量为

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \delta \cdot S \cdot \varphi_\lambda \cdot \tau_\lambda \cdot I_\lambda(T_s) d\lambda$$

$$= \frac{AS}{r^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_\lambda \cdot \tau_\lambda \cdot \varepsilon_\lambda \cdot B_\lambda(T_s) d\lambda \quad (4)$$

式中， T_s 为地表温度， $\lambda_1 = 10.4\mu\text{m}$ ， $\lambda_2 = 12.5\mu\text{m}$ ，LANDSAT 的标称飞行高度为 705km ，热红外波段的瞬时视场为 $120\text{m} \times 120\text{m}$ ，传感器受光面积 A 是固定的，所以， $\frac{AS}{r^2}$ 可视为常数，问题取决于地表单位面积在单位立体弧度发出的辐射强度

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_\lambda \cdot \tau_\lambda \cdot \varepsilon_\lambda \cdot B_\lambda(T_s) d\lambda \quad (5)$$

$$I \approx \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_\lambda \cdot B_\lambda(T_s) d\lambda \quad (6)$$

传感器接收到能量后便产生电压 V ，再通过数值转化电路转换成数值 V 。记录在电子计算机兼容磁带 CCT 上，在这过程中要

进行一系列定标和订正,这样就可以再由 V_c 来求算等效黑体温度 T_{BB} 。

根据日本宇宙开发事业团及日本遥感技术中心提供的资料,在热红外波段

$$N = (5.1292 \times 10^{-5} T_{BB} - 0.017651) T_{BB} + 1.6023 \quad (7)$$

式中, N 为辐亮度 ($mW/cm^2 \cdot Sr \cdot \mu m$), T_{BB} 为等效黑体温度 (K), 表明 N 与 T_{BB} 为 2 次关系。而经过订正的 CCT 磁带数值 V_c 与 T_{BB} 的关系为

$$N = \frac{V_c}{255} (N_{max} - N_{min}) + N_{min} \quad (8)$$

式中, N_{max} 是传感器检测的最大辐亮度, 即在 340K 时的辐亮度, 为 $1.53032 mW/cm^2 \cdot Sr \cdot \mu m$, N_{min} 是检测的最小 (200K) 辐亮度, 为 $0.12378 mW/cm^2 \cdot Sr \cdot \mu m$ 。即经过订正后, V_c 与 N 为线性关系, 255 表示 V_c 变化范围为 8 比特, 即 0—255。由式 (7)、(8) 可知:

$$\frac{V_c}{255} (N_{max} - N_{min}) + N_{min} = (5.1292 \times 10^{-5} T_{BB} - 0.017651) T_{BB} + 1.6023$$

$$\frac{N_{max} - N_{min}}{255} V_c = (5.1292 \times 10^{-5} T_{BB} - 0.017651) T_{BB} + 1.6023 - N_{min}$$

$$\text{即 } \frac{1.40654}{255} V_c = (5.1292 \times 10^{-5} T_{BB} - 0.017651) T_{BB} + 1.47852 \quad (9)$$

V_c 与 T_{BB} 为 2 次关系, 知 V_c 即可求出 T_{BB} , 如图 3。

2. 进行大气订正, 求算地表温度

以上求出的 T_{BB} , 并不是地表的真实温度 T_s 。虽然地球大部分地物发射率 ϵ_λ 较高, 在 0.9 以上, 但毕竟不是黑体, $10.4-12.5 \mu m$ 的波段尽管处在大气窗区, 但其透射率 τ_λ 不可能是 100%, 在辐射通路上仍有一部分被水蒸气等物质所吸收 (图 1), 而且也受大气本身辐射的影响, 这样求算出的 T_{BB} 比地表温度偏低, 须进行订正。

实际为传感器所接收的辐射强度, 应在

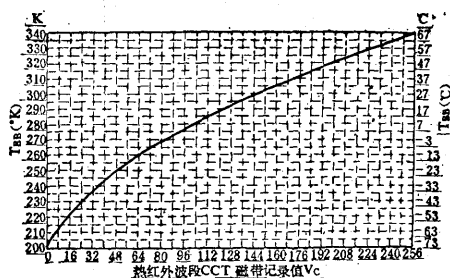


图 3 热红外波段记录值 V_c 与等效黑体温度 T_{BB}

式 (5) 的基础上再加上大气本身辐射的影响, 为了从其解得 T_s , 需要知道大气温度的层结分布, 各波长的透射率 τ_λ 及水蒸气等的分布。尽管可以利用实况分析及预报小网格点的值, 但在精度等方面尚有很多问题有待解决。因此, 在目前阶段, 人们通常不是直接解此方程, 而是通过地面有限的气象站点、航测船、浮标站的实测值 T_s 与求出所对应的 T_{BB} 相对比, 建立经验或半经验公式, 再对大量无实测值的地点用 T_{BB} 求算出 T_s 。

在进行大气订正时, 一般要考虑卫星天顶角, 辐射面的高度, 等效黑体温度, 大气中的吸收物质等。因 LANDSAT 飞行高度 705km, 而扫描宽度只有 185km, 几乎都处于星下点, 可以不考虑天顶角 θ 的影响, 并且, 地面起伏对传输距离的影响也不必考虑, 因此参考日本井上丰志朗、阿部胜宏、谷宏等的经验公式进行订正

$$\Delta T = T_s - T_{BB} = C \cdot W \cdot F(T_{BB}) + [1.0 - F(T_{BB})] \cdot 4.0 \quad (10)$$

式中, $F(T_{BB}) = 1400 / [310 - T_{BB}]^2 + 1400$, W 为水汽含量 (mm)。

水汽含量由附近探空站当天的探空资料, 用有关公式算出。

三、解译方法及结果

1. 扫描数据的处理及密度分割着色

我们使用的是从日本购进的 1984 年

12月26日上午10时和1985年10月29日夜间9时半在闽北过顶的百万分之一热红外波段正底片,记录能量级为8位(0—255),地面分辨率为120m,在底片上相当于120 μ m。用OPTRONICS公司的C-4500图象扫描机以50 μ m孔径将其回扫成数据,记录在计算机磁带上,由于扫描孔径小于120 μ m,不会使信息有较大损失。

因用卫星 CCT 磁带数据扫描成胶片时, 在图象下部扫出有 0, 8, ..., 255 共 24 级标灰阶, 尽管我们用 C-4500 将图片又回扫成数据时的数值会与 CCT 磁带上的有所不同, 我们可以用 (11) 式来进行数据的订正恢复。

$$\hat{y} = y_i + \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} (y_{i+1} - y_i) \quad (11)$$

式中, $y_i (i = 1, 2, \dots, 24)$ 为原始灰阶的标值, x_i 为对应灰阶用 C-4500 扫描出的值 (各取其 200 个取样的算术平均值), $\hat{y}$ 为用扫描值 x 反推算出的 CCT 磁带上的 V 值。

根据图3及式(9)可以算出不同温度所对应的V值,再每隔4K(即4℃)用I²S101图象处理系统着成不同颜色,处理成彩色正片(图4,封三),或先制成彩色负片,再放大成彩色图片。

2. 进行相关分析和大气订正

(1) 采用将毛面聚脂薄膜铺在彩色图片上,描画出 T_{BB} 的等值线图,再与同比比例尺地形图相对应的方法求取各测站位置的 T_{BB} 值(所用的是二十万分之一比例尺的图片)。

(2) 以过顶前后地温、气温观测值及自记气温过顶时的值求过顶时的地温值 T_z 。

(3) T_{BB} 与 T_g 的相关关系。1984 年 12 月 26 日 10 时, R 等于 0.574; 1985 年 10 月 29 日夜 9 时半, R 等于 0.849 ($n=10$)。

(4) 参照公式(10)进行大气订正(此波段大气中的主要吸收物质是水汽)。首先,将各观测站以距离最近的探空站的探空资料算出水汽含量,然后进行回归分析求出

公式(10)第一项的订正系数C, 再代回公式
求出 T_s 。

1984年12月26日10时幅, $C = 1.045$,
1985年10月29日夜間9時半幅, $C = 0.255$ 。

3. 结果

(1) 1984年12月26日10时幅的温度解译图(图5), 是在等密度分割彩色图的基础上, 考虑大气订正做出的。温度场的情况较好地反映在这张图上, 如仅有几个测站的值是达不到这样效果的。而等密度分割彩色图, 则更好地保留了温度随地形变化的信息(图4)。

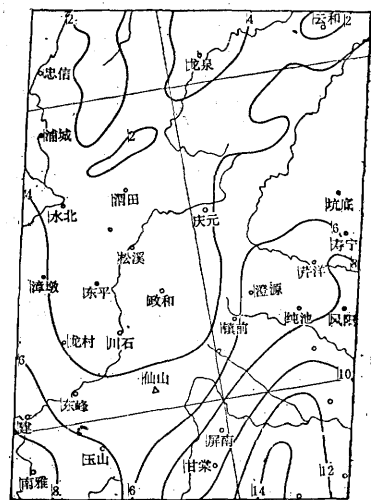


图5 1984年12月26日(10:00)幅的温度解译图(1:250万)

(2) T_s 在气候上的意义

地表（在本文中是指下垫面，即包括裸露地面，也包括植被冠层等）温度 T_s 是某一特定时刻的瞬时值，那么，它在气候上是否有意义，有多大代表性，则是解译热量资源时最为关心的问题。表 2、表 3 中列出了 T_s 与对应测站不同时刻、不同时段的气温 T_a 、土壤表面温度 T_g （根据观测规范，测得的是裸露土壤表面温度）的相关系数值。图 6、图 7 给出了 1984 年 12 月 26 日 10 时和 1985 年 10 月 29 日 21 时 30 分瞬时 T_{BB} 、 T_s 与 T_g

表2 1984年12月26日10时 T_a 与各时段 T_g 、 T_s 的相关关系(R)

时 段	02时	08时	10时	14时	20时	日平均	旬平均	月平均	08时旬平均
T_g	0.788	0.704	0.874	0.557	0.191	0.704	0.210	0.087	0.367
T_s	0.859	0.748	0.737	0.309	0.142	0.595	0.069	0.220	0.446

注: 02时 T_g 、 T_s 及10时 T_g 通过0.001检验, 08时 T_g 、 T_s 、10时 T_s 及日平均 T_g 通过0.05检验。

表3 1985年10月29日21时30分 T_a 与各时段 T_g 、 T_s 的相关关系(R)

时 段	14时	20时	21:30	02时	08时	29日	30日	旬平均	月平均
T_g	0.722	0.940	0.920	0.906	0.911	0.878	0.889	0.948	0.931
T_s	0.966	0.953	0.923	0.908	0.639	0.958	0.942	0.958	0.961
时 段	02时	08时	14时	20时	02时	08时	14时	20时	
	旬平均	旬平均	旬平均	旬平均	月平均	月平均	月平均	月平均	
T_g	0.938	0.954	0.900	0.956	0.917	0.949	0.842	0.938	
T_s	0.964	0.948	0.949	0.950	0.952	0.962	0.935	0.945	

注: 除14时 T_g 、08时 T_s 通过0.05检验外, 其余均通过0.01检验。

的关系图。说明在白天, 同一时刻的 T_s 与 T_g 相关相当密切, 那么就可以根据 T_s 的分布图来估计无测站处的 T_g (10), 也可以估计上午各时刻的 T_a 、 T_g 和日平均 T_g 等, 但对于同一天下午的 T_g 、 T_s 却无代表性, 与旬、月平均 T_g 、 T_s 的相关性也不好, 而这一情况是与08、10时的 T_g 相一致的 (表4)。这可能是由于下午地表温度变化剧烈, 不同下垫面间温度变化的相位与振幅大不同, 相关减弱, 由于湍流等热交换的影响, 气温的变化与地温就相差更远了。同时, 由于测量的时间在

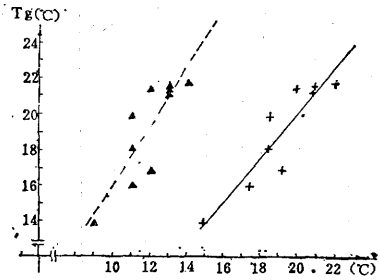


图7 1985年10月29日21时30分 T_{BB} 、 T_s 与 T_g 的关系

虚线表示 $T_g = 1.634T_{BB} - 0.26$ $R = 0.849$
信度0.99
实线表示 $T_g = 1.230T_s - 4.52$ $R = 0.920$
信度0.99

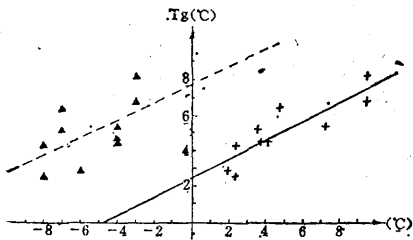


图6 1984年12月26日10时 T_{BB} 、 T_s 与 T_g 的关系

虚线表示 $T_g = 0.4923T_{BB} + 7.74$ $R = 0.574$
实线表示 $T_g = 0.5267T_s + 2.49$ $R = 0.874$
信度0.99

日出之后不久, 迅速变化的增温过程受下垫面状况影响很大, 无法反映当地接受太阳辐射的总量及地表散热平衡。在这方面还存在着不少问题有待解决。

与其相反, 夜间 T_g 的代表性要比预料的好得多。1985年10月29日21时30分的 T_s , 不仅与当日各时刻、日平均的 T_g 、 T_a 相关密切, 而且也与次日及旬、月平均相关甚佳, 虽然夜间 T_s 本身是一个天气上的瞬时值, 但在气候上有很大代表性。这可能是由于夜间不受太阳辐射的影响, 变化不甚剧烈, 比较稳定, 虽 T_s 是瞬时值, 但却充分

表4 1984年12月26日08、10时 T_g 与各时段 T_g 、 T_s 的相关关系(R)

时 段		02时	08时	10时	14时	20时	日平均	旬平均	月平均
08时	T_g	0.567	/	0.721	0.457	0.296	0.721	0.298	0.026
	T_s	0.726	0.717	0.383	0.245	0.037	0.622	0.055	-0.031
10时	T_g	0.883	0.721	/	0.735	0.191	0.816	0.200	0.094
	T_s	0.845	0.811	0.878	0.518	0.170	0.683	0.125	0.241

注：0.683以上通过0.05检验，0.811以上通过0.01检验。

反映了地形等地理因子的影响，因此在气候上有很好的代表性。这样，如能有不同季节的 T_s 值，来估计当地热量资源，在方法上是可以行得通的。

四、总结

用陆地卫星热红外资料解译亚热带山区热量资源，可以在很大程度上弥补地面站点不足的问题，特别是容易定量地分析地形对温度场的影响，这确系分析山区热量资源的有效手段之一。不过，本文仅是在方法上进行初探，尚有很多问题有待进一步解决。

首先，尽管对热红外区而言，大多数地物的发射率均在0.9以上，近似黑体，但不同下垫面的发射率毕竟有所差异，这将直接影响到解译的精度。而要解决这个问题就得充分掌握当地的土壤、水系、植被的分布及地质构造，关于用TM资料解译其分布的研究尚在进行中，预计到1987年底可完成此系列分布图，所以，本文暂未就发射率 ϵ_λ 的影响进行订正，但可以进行粗略估计。

由(7)式可以得出

$$N = \epsilon_\lambda [(5.1292 \times 10^{-5} T_s - 0.017651) T_s + 1.6023] \quad (12)$$

对(12)式取对数得

$$\ln N = \ln \epsilon_\lambda + \ln (5.1292 \times 10^{-5} T_s^2 - 0.017651 T_s + 1.6023) \quad (13)$$

现要讨论在 N 为相同值时，由于 ϵ_λ 不同会使 T_s 受多大影响，对(13)式取微分

得

$$0 = \frac{d\epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda} + \frac{(10.2584 \times 10^{-5} T_s - 0.017651) dT_s}{5.1292 T_s^2 - 0.017651 T_s + 1.6023}$$

此时闽北的 T_s 可取280K（参见图5），

则

$$0 = \frac{d\epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda} + \frac{dT_s}{61.5}$$

$$dT_s = -61.5 \times \frac{d\epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda}$$

闽北大部分地区为茂密的植被所覆盖， ϵ_λ 可取0.97（参见表1）， dT_s 大小约为1.9K，即由于 ϵ_λ 的影响，地表植被温度应比 T_{BB} 偏高1.9K，当然这样求出的 T_s 也得进行大气订正。

其次，温度场的瞬时值与气候值的关系也需进一步进行分析和考验。

文中引用了一些日本宇宙开发事业团及日本遥感技术中心提供的数据、图表，在此深表谢意。

参考文献

- [1] 王茂新、叶一舫，第2代陆地卫星概况及对北京一带地物的初步解译，气象，第12卷，第3期，1986。
- [2] 石井吉德，リモートセンシング“读本”，オーム社，1981。
- [3] 羽生寿郎等，农业气象学，文永堂，1978。
- [4] 日本气象卫星センター，气象卫星ツステムの概説，气象卫星センター技术报告，特别号，1986。

Interpretation of thermal resources in subtropic hilly region with the second generation LANDSAT thermal IR data

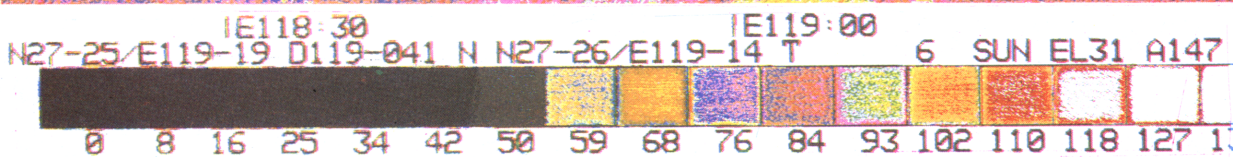
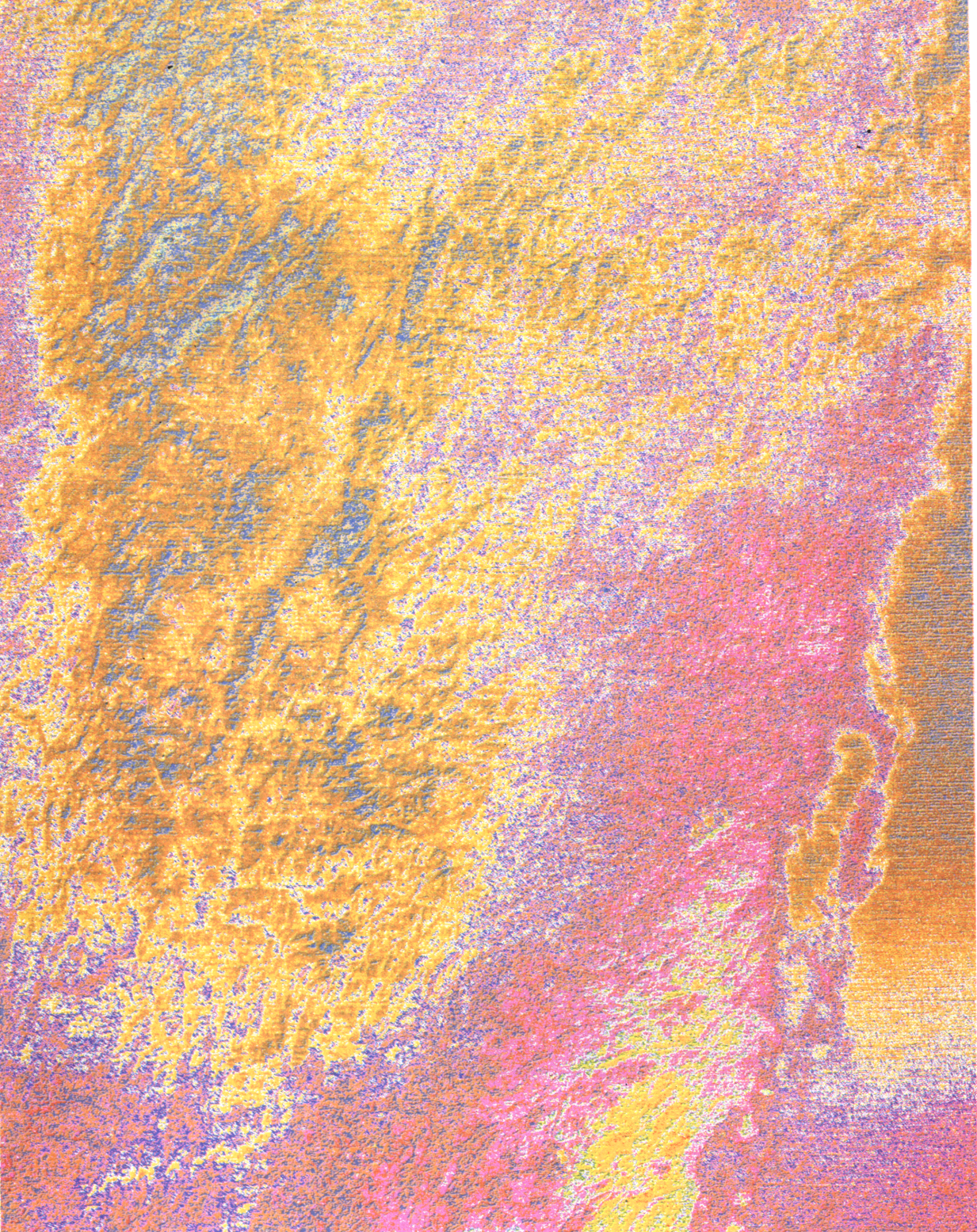
Wang Maoxin, Ye Yifang, Guo Zhenhuang

(Academy of Meteorological Science, S.M.A.)

(Meteorological Bureau, Fujian Province)

Abstract

This paper studies the principle and quantitative method of interpretation on thermal resources on subtropic hilly region in northern Fujian, China using the thermal IR data of LANDSAT Thematic Mapper Sensors in December 26th, 1984 daytime and in October 29th, 1985 night. The significance on climate of remote sensing instantaneous meteorological value is analysed. By the results, when all seasonal remote sensing data is available, the method of interpretation on local thermal resources is feasible.



《用第二代陆地卫星的热红外资料解译亚热带丘陵山区热量资源的方法》

附图 4 1984年12月26日10时幅等密度分割彩色图。