

气象卫星亚像元火点面积和亮温估算方法*

刘 诚 李亚军 赵长海 阎 华 赵洪森

(国家卫星气象中心,北京 100081)

摘 要

该文给出了利用极轨气象卫星 AVHRR 多个红外通道资料在不同火点强度条件下估算亚像元火点面积和温度的方法,包括利用牛顿迭代法求解不同红外波段(如:中红外 $3.7 \mu\text{m}$ 通道和热红外 $11 \mu\text{m}$ 通道,或短波红外 $1.6 \mu\text{m}$ 通道和热红外 $11 \mu\text{m}$ 通道)混合像元表达式建立的二元非线性方程组,得到亚像元火点面积和温度;通过建立亚像元火点面积和温度与 $11 \mu\text{m}$ 混合像元亮温增量和 $11 \mu\text{m}$ 与 $12 \mu\text{m}$ 混合像元亮温增量差异的关系,以查表方式获得对于相同红外波段不同通道(如 $11 \mu\text{m}$ 和 $12 \mu\text{m}$ 通道)亚像元火点面积和温度估算值。

关键词: 卫星遥感 林火监测 亚像元估算

引 言

近些年来,气象卫星在火情监测方面的应用得到了广泛的开展,已成为森林、草原防火日常业务的重要组成部分。目前,向防火部门提供的气象卫星火情监测信息主要是火点位置和范围,即含有火点像元的经纬度及有关地理信息。

极轨气象卫星 AVHRR 扫描辐射计第三通道(中红外波段,波长为 $3.55 \sim 3.95 \mu\text{m}$)对高温热源非常敏感,经处理分析后可从图像上判识出 10^{-1}hm^2 量级的火点。而 AVHRR 的分辨率较低,星下点像元分辨率为 1.1km ,面积约 120hm^2 。在日常火情监测中,经常监测到数个或数十个含有火点的像元。如果以像元分辨率表示明火区面积,则明显夸大了明火的实际面积。尤其在春秋高火险期间,常常在大范围区域同时出现许多大大小小的火点群。此时防火部门需要了解哪些火点的火势相对较大,以便制订适当的防火扑火决策。

极轨气象卫星 AVHRR 探测器具有中红外、热红外波段的通道,根据热辐射原理,高温热源(火点)在中、热红外波段引起的辐射增长率有较大差异。而 AVHRR 红外通道资料特性(空间分辨率和亮温动态范围)使得在资料处理中较容易获取火点在中、热红外通道引起的差异。利用这一特点,建立相应的算法,可以估算混合像元(含火点像元)中明火区的实际面积及温度。

1 AVHRR 红外通道对高温热源敏感程度分析

1.1 AVHRR 通道特性

极轨气象卫星(包括风云一号和 NOAA 卫星) AVHRR 均有波长范围在可见光、近红

* 2002-09-19 收到,2003-09-19 收到修改稿。

外、中红外、热红外波段的5个通道。表1列出各通道特性：

表1 AVHRR通道特性

通道号	波长(μm)	波段	动态范围	敏感对象
CH1	0.58~0.68	可见光	0%~100%(反射率)	云、雪、冰等
CH2	0.7~1.1	近红外	0%~100%(反射率)	云、植被、水体等
CH3	3.55~3.95	中红外	190K~330K	洋面温度、高温热源等
CH4	10.3~11.3	红外	190K~330K	云顶温度、洋面温度等
CH5	11.5~12.5	红外	190K~330K	云顶温度、洋面温度等

AVHRR资料为10比特,量化等级为0~1023,辐射分辨率较高。而星下点空间分辨率为1.1 km,卫星观测到的像元辐射率是该像元覆盖范围内所有各部分地物辐射率的加权平均值,即：

$$N_t = (\sum_{i=1}^n \Delta S_i N_{T_i}) / S \tag{1}$$

式中 N_t 为卫星观测到的该像元辐射率, t 为辐射率 N_t 对应的亮温, ΔS_i 为像元中第 i 个小子区面积, N_{T_i} 为该子区的辐射率, T_i 为该子区温度, S 为像元总面积。

1.2 AVHRR不同红外波段辐射率变化率随温度增长的差异

根据维恩位移定律：

$$T \times \lambda_{max} = 2897.8(K \cdot \mu m)$$

黑体温度 T 和辐射峰值波长 λ_{max} 成反比,即温度愈高,辐射峰值波长愈小。

常温(约300 K)地表辐射峰值波长在9.6 μm左右,靠近AVHRR CH4波长范围,林火燃烧温度一般在600 K以上,其热辐射峰值波长在4.5 μm左右,靠近CH3波长范围。因而常温地表和高温热源(火点)在红外波段黑体辐射有明显差异。

Matson M^[1]在1984年曾对CH3和CH4在含火点像元亮温的明显差异进行分析,发现含火点像元和周围背景像元的亮温差异可达数十度。

从图1中可看到,当温度增高时,CH3辐射率变化率曲线迅速增大,而CH4,CH5变化缓慢。通过计算可知,当温度从300 K增至700 K时,CH3辐射率变化率增大大约250倍,而CH4仅3倍左右。

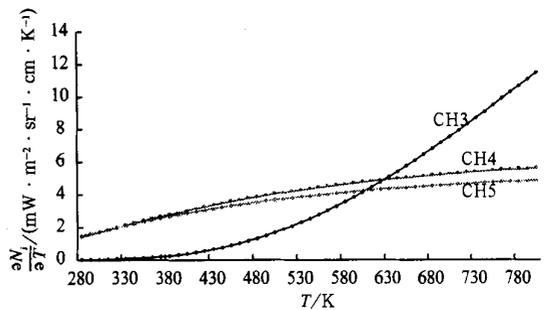


图1 对普朗克黑体辐射公式中温度求导后所反映的CH3,CH4,CH5辐射率随温度增长的变化率曲线

1.3 AVHRR CH3,CH4,CH5混合像元亮温增量随亚像元火点面积和温度变化的差异

当地面出现火点时,含有火点的像元(以下称混合像元)辐射率可由下式表述：

$$N_{if} = P \cdot N_{ihi} + (1 - P) N_{ibg}$$

$$= P \cdot \frac{C_1 V_i^3}{e^{C_2 V_i/T_{hi}} - 1} + (1 - P) \frac{C_1 V_i^3}{e^{C_2 V_i/T_{bg}} - 1} \tag{2}$$

其中： N_{if} 为混合像元辐射率, P 为火点(即明火区)亚像元面积占像元面积百分比, N_{ihi} 为

亚像元火点辐射率, N_{ibg} 为火点周围背景辐射率, T_{hi} 为亚像元火点温度, T_{bg} 为背景温度, $i = 3, 4, 5$, 表示 AVHRR 红外通道序号。 V_i 为通道 i 的中心波数, C_1, C_2 为常数。

由于 AVHRR 分辨率较低, 一般的明火点仅占像元面积的很小部分。对于较高温度的火点, 在 CH3 辐射率可能增加几十倍甚至几百倍, 从而引起 CH3 混合像元的辐射率明显增大, 由此计算的亮温值也将明显增高。

设红外通道混合像元亮温较背景像元亮温的差异(增量)为 ΔT_i , 则:

$$\Delta T_i = T_{if} - T_{ib} = \frac{C_2 V_i}{\ln\left(1 + \frac{C_1 V_i^3}{N_{if}}\right)} - \frac{C_2 V_i}{\ln\left(1 + \frac{C_1 V_i^3}{N_{ib}}\right)} \quad (3)$$

图 2 反映将火点温度 T_{hi} 为 500 K, 背景温度 T_{bg} 为 290 K 代入式(3)时, CH3, CH4, CH5 混合像元亮温与背景像元亮温差异随火点面积和温度的变化程度。

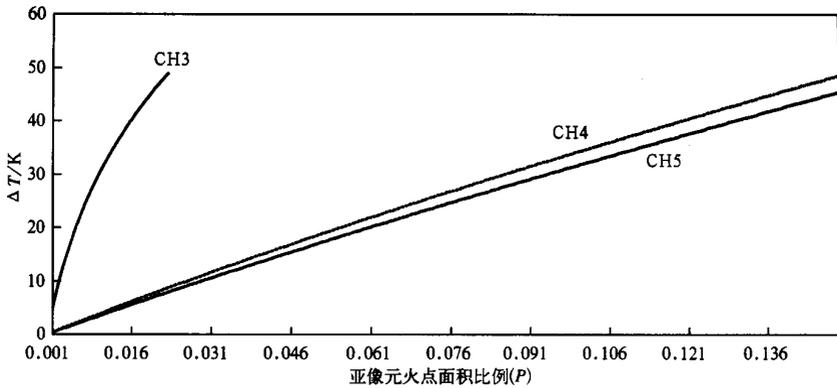


图 2 背景温度为 290 K, 火点温度为 500 K 时, CH3, CH4 和 CH5 混合像元亮温增量随明火点面积(占像元面积比例 P)变化关系曲线

从图 2 可看到, 当火点面积增大时, CH3 混合像元亮温较背景像元亮温的增量急剧增大, 当火点面积达到仅为像元面积的 1% 左右时, CH3 混合像元亮温增量已达到 40 K, 而 CH4, CH5 混合像元亮温较背景像元亮温虽然也有增量, 但远不如 CH3 明显。当火点面积达到像元面积的 12% 左右时, CH4, CH5 混合像元亮温增量才达到 40 K 左右。

2 亚像元火点面积及温度估算方法

由于气象卫星对地面高温热源十分敏感(相对其分辨率而言), 可识别的高温热源点的辐射率可相差数十倍, 由此对应的火点面积也可相差几十倍。同时, 影响森林、草原火点温度的因素也很多, 不同种类(林木、草种)的燃烧温度可能有较大差异, 风力的影响也非常之大。因此, 不同火区的温差可能很大。

在式(2)中, T_{bg} (背景温度) 可由混合像元周围非火点像元获得近似值。因而在式(2)有 P (亚像元火点面积占像元面积比例), T_{hi} (火点温度) 两个未知数, 用单个红外通道建立的混合像元表达式无法估算亚像元火点面积或温度。

根据 AVHRR 红外通道特性(亮温动态范围和空间分辨率),高温热源在不同波段红外通道的辐射增量有明显差异,根据这一特点,建立合适的算法,可以利用不同红外通道的辐射值估算明火点的实际面积及温度。

Dozier J^[2]曾提出利用图解法查找根据 CH3(3.7 μm)和 CH4(11 μm)通道估算亚像元火点面积和温度的方法,使用十分不便,无法在业务中应用,并且未考虑 3.7 μm 饱和的情况,而这在业务监测中经常遇到。

本文提出利用 AVHRR 资料不同通道组合估算亚像元火点面积和温度的 3 种方法,包括:① CH3(3.7 μm)和 CH4(11 μm)通道;② CH4 和 CH5(11 μm 和 12 μm)通道;③ 近红外(1.6 μm)和远红外(11 μm)通道。

可根据卫星遥感火情监测中的实际情况选择其中适合的一种方法。当 CH3 亮温未达饱和时,选用方法①;当 CH3 亮温饱和时,选用方法②;当在 1.6 μm 通道有火情信息反映时,选用方法③(风云一号 AVHRR 第 6 通道和 NOAA-K,L,M 卫星白天的第 3 通道播发 1.6 μm 观测资料)。

2.1 利用 CH3(3.7 μm)和 CH4(11 μm)通道估算亚像元火点面积和温度

根据式(2),可建立一组 CH3,CH4 混合像元表达式:

$$\begin{cases} N_{3f} = P \cdot N_{3hi} + (1 - P) \cdot N_{3bg} \\ N_{4f} = P \cdot N_{4hi} + (1 - P) \cdot N_{4bg} \end{cases} \quad (4)$$

并建立有关 P 和 T_{hi} (即式(4)展开式中的亚像元火点温度)的方程组:

$$\begin{cases} U(P, T) = P \cdot N_{3hi} + (1 - P) \cdot N_{3bg} - N_{3f} = 0 \\ V(P, T) = P \cdot N_{4hi} + (1 - P) \cdot N_{4bg} - N_{4f} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

这是一个二元非线性方程组,本文用牛顿迭代法求解这一方程组中亚像元火点面积比例 P 和火点温度 T_{hi} 的方法。迭代精度可达 10^{-4} 以上。

设火点混合像元 CH3 = 320 K, CH4 = 284 K,背景像元亮温 $T_{bg} = 282$ K。利用牛顿迭代法对火点亚像元面积比例和温度估算结果为: $P = 0.286\%$, $T = 608.4$ K。

得到 P 值后,再乘以像元面积(计算方法略),便可得到亚像元火点面积。

2.2 利用 CH4,CH5(11 μm 和 12 μm)通道估算亚像元火点面积和温度

极轨气象卫星红外通道的亮温上限一般在 320 ~ 330 K 左右,地面出现火点时,CH3 的辐射率将急剧增长,很容易饱和,即达到亮温上限。表 2 列出当像元中火区温度为 500 K 至 700 K,CH3,CH4,CH5 混合像元亮温达到上限时的亚像元火点面积比例 P 的饱和限度(占像元面积百分比)。其中可看到,若火区温度为 700 K,亚像元火点面积仅为像元面积的 0.127% 时,CH3 亮温值就已达上限,因而不适于有关亚像元火点估算。而在实际的火情监测中,一般稍大的火点(含七、八个像元以上)即会出现 CH3 饱和情况。

表 2 CH3,CH4,CH5 在火点温度为 500 K 至 700 K,混合像元亮温饱和时,亚像元火点面积 P 的饱和限度(占像元面积比例)

温度(K)	500	600	700
CH3	0.011247	0.003147	0.001266
CH4	0.105936	0.061296	0.041415
CH5	0.118697	0.070659	0.048718

注:以上辐射率和亮温计算参考了 NOAA-12 AVHRR 红外通道中心波数和定标系数。

从表 2 还可看到:CH₄,CH₅ 对火点等高温目标的面积饱和限度比 CH₃ 高一个量级。在火情监测中,确实也极少出现 CH₄,CH₅ 饱和的情况。本文提出利用 CH₄,CH₅ 资料估算亚像元火点温度与面积的方法如下:

由于 CH₄ 和 CH₅ 的波长很接近,其亚像元面积比例 P 函数曲线的切线斜率也很接近,因此对 CH₄,CH₅ 混合像元表达式,无法用牛顿迭代法解出 P 和 T 值。

从图 1 中 CH₃,CH₄,CH₅ 辐射率随温度增长的变化率曲线可看到,当温度增高时,CH₄ 辐射率增长率大于 CH₅。因而当出现火点时,CH₄ 的辐射增量将大于 CH₅ 的辐射增量,从而引起两个通道亮温增量的差异增大。

有关 CH₄ 亮温增量的表达式和 CH₄ 与 CH₅ 亮温增量差异的表达式如下:

$$CH_{4D} = T_{4f} - T_{4bg} = C_2 V_4 / \ln(1 + C_1 V_4^3 / N_{4f}) - C_2 V_4 / \ln(1 + C_1 V_4^3 / N_{4bg}) \quad (6)$$

$$CH_{45D} = T_{4f} - T_{5f} \quad (7)$$

从图 3 可看出,当 P 变化时(分别取 0.3% 和 0.4%),将形成一组组斜率不同的 CH_{4D} 和 CH_{45D} 曲线。由于 CH_{4D} 和 CH_{45D} 有关 P, T 的函数均为单调递增,因此对应每一对 P, T 均有相应的,也是唯一的一组 CH_{4D} 和 CH_{45D} 值。而我们需要建立的是从 CH_{4D},CH_{45D} 获取 P, T 的关系。

根据以上所述 P, T 与 CH_{4D}, CH_{45D} 的关系,可以建立一个 P, T 对应 CH_{4D},CH_{45D} 的查阅表,通过这一查阅表,可从 CH₄ 亮温增量 CH_{4D} 和 CH₄ 与 CH₅ 亮温增量的差异 CH_{45D} 检索到对应的亚像元火点面积比例 P 和温度 T 的估算值。这里简要介绍建立查阅表的过程和使用方法。步骤如下:

(1) 将 P, T 值代入式(7)和式(8), P 的单位增量为 0.1%。 T 的单位增量为 10 K。生成多个在不同背景温度下,有关 $P, T \rightarrow CH_{4D}, CH_{45D}$ 的数组。

(2) 建立 CH_{4D},CH_{45D} $\rightarrow P, T$ 关系数组。 P 数组和 T 数组中每一个元素值取自对 CH_{4D} 数组和 CH_{45D} 数组检索的对应元素值。

(3) 检索火点亚像元面积和温度。利用混合像元的 CH_{4D} 和 CH_{45D} 即可检索到 P, T 数组中对应的元素地址 (I, J) ,从而得到 P, T 值。

2.3 利用短波红外(1.6 μm)和热红外通道(11 μm)估算亚像元火点面积和温度

卫星从 1.6 μm 通道获取的辐射主要是来自太阳辐射的反射,在不考虑大气影响情况下,地表在 1.6 μm 通道对太阳辐射的反射率达到 100% 时,反射太阳辐射的辐射率约为:

$N_{RFS} \approx 17 \text{ mW} / (\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 。

地表在常温情况下(300 K)1.6 μm 波长的辐射出射度极为微小,仅为 $2.8367 \times 10^{-7} \text{ mW} / (\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 左右,只有当地表温度达到 700 K 以上时,其辐射出射度才达到可和

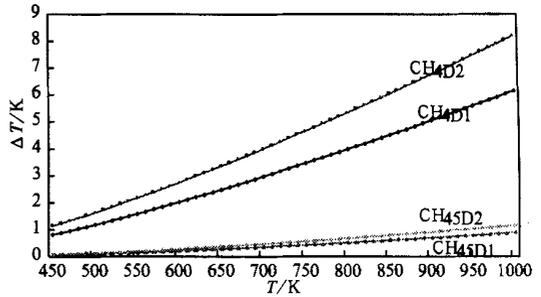


图 3 当 P 分别为 0.3% 和 0.4%,火点温度 T 从 500 K 增至 1000 K 时,CH_{4D} 和 CH_{45D} 的变化的一组曲线

反射太阳辐射率相比的程度。而森林、草原火灾是有可能达到 700 K 以上高温的。在 FY-1C, FY-1D 和 NOAA-16 及 EOS/MODIS 资料的 $1.6 \mu\text{m}$ 通道图像中, 多次出现火点的明显反映。

通过提取 $1.6 \mu\text{m}$ 通道混合像元中的热辐射信息, 可估算亚像元火点面积和温度。其估算方法如下:

首先由周围背景像元的反射率和太阳在 $1.6 \mu\text{m}$ 波长垂直于大气层顶部的辐照度估算混合像元发射的辐射率, 然后建立 $1.6 \mu\text{m}$ 通道混合像元表达式, 并和远红外通道混合像元表达式建立联立方程组(因 NOAA-16 在播发 $1.6 \mu\text{m}$ 资料时, 关闭 $3.7 \mu\text{m}$ 中红外通道), 再用牛顿迭代法即可进行计算。

假定在含火点混合像元和背景像元中 $1.6 \mu\text{m}$ 的反射率和 $11 \mu\text{m}$ 通道(CH4)的亮温分别为:

$$A_{1.6\mu\text{mf}} = 53.2\%, CH_{4f} = 313.2 \text{ K} \quad A_{1.6\mu\text{mbg}} = 27.7\%, CH_{4bg} = 284.7 \text{ K}$$

由混合像元和背景像元 $1.6\mu\text{m}$ 通道反射率差异可计算得到 $1.6 \mu\text{m}$ 通道发射的辐射率约为 $4.34 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 。

由此可建立 $1.6 \mu\text{m}$ 通道混合像元表达式, 经和 $11 \mu\text{m}$ 通道混合像元表达式建立方程组, 利用牛顿迭代法解得有关亚像元火点面积比例 P 和火点温度 T 分别为:

$$P = 1.53\%, \quad T = 972 \text{ K}$$

可以看到这一估算结果远超过一般情况利用 CH3, CH4 估算的结果, 实际上在 $1.6 \mu\text{m}$ 通道出现火点的情况很少, 只有在较大火情发生时有可能出现这一情况。

3 亚像元估算应用举例

图 4 为利用 NOAA-14 卫星 2001 年 10 月 5 日 7:41(世界时)资料对大兴安岭地区的中红外通道(CH3)火情监测图像。图中箭头所指处为位于内蒙古自治区呼伦贝尔盟的一处含有 15 个像元的火点。

表 3 为对该处火点进行亚像元估算的结果。该处火点共有 15 个像元, 其中有 4 个像元(序号为 0, 10, 11, 14)使用 CH3, CH4 资料估算, 其余像元由于 CH3 饱和, 均用 CH4, CH5 资料估算。

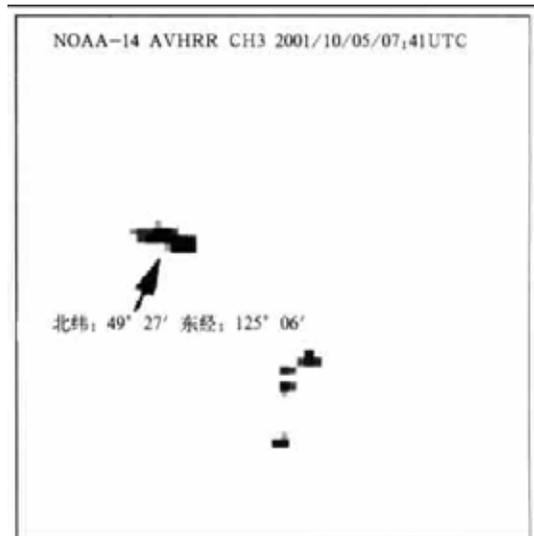


图 4 NOAA-14 卫星 2001 年 10 月 5 日 07:41(世界时)资料 AVHRR CH3 图像

表 3 2001 年 10 月 5 日对内蒙古自治区呼伦贝尔盟一处火点的亚像元估算结果

序号	北纬(°)	东经(°)	CH _{3f}	CH _{4f}	CH _{5f}	T _{bg}	P(%)	SIZE(m ²)	T(K)
0	49.49	125.10	320.90	282.90	281.30	278.53	0.84	6709	524
1	49.48	125.08	321.80	282.30	281.60	278.53	0.50	3995	590
2	49.48	125.09	321.80	282.30	281.60	278.53	0.50	3995	590
3	49.48	125.10	321.80	289.40	287.60	78.53	1.10	8796	680
4	49.48	125.11	321.80	287.20	285.60	278.53	0.70	5593	740
5	49.48	125.12	321.80	287.20	285.70	278.53	0.70	5593	740
6	49.47	125.09	321.80	283.60	282.90	278.53	0.60	4794	630
7	49.47	125.10	321.80	283.70	283.10	278.53	0.90	7191	540
8	49.47	125.11	321.80	283.70	283.10	278.53	0.90	7191	540
9	49.47	125.12	321.80	290.60	289.20	278.53	1.90	15182	570
10	49.47	125.13	314.70	281.20	279.90	278.53	0.45	3595	551
11	49.47	125.14	314.70	281.20	279.90	278.53	0.45	3595	551
12	49.46	125.12	321.80	282.30	281.90	278.53	0.50	3996	590
13	49.46	125.13	321.80	282.30	281.90	278.53	0.50	3996	590
14	49.46	125.14	316.10	280.10	279.70	278.53	0.31	2477	588

4 讨论与结论

由于气象卫星资料分辨率覆盖范围较大,实际火场的动态变化也有一定的随机性,目前还无法得到与卫星观测时间和空间完全匹配的地面火情实测资料。但从利用以上方法研制软件的初步应用结果看,亚像元火点面积和温度估算方法可以有效地反映各火点像元火势程度的大小(即亚像元火点面积的大小和温度的高低)。在多幅亚像元火点估算结果显示图中,可看到具有较高火势的火点(即亚像元火点面积较大,温度较高)一般位于羽状或片状烟区的顶端或边缘,这是由于风力加剧了林火的蔓延和燃烧强度。

通过该方法研制软件对 2002 年 8 月内蒙古原始林区火情和同期俄罗斯远东林区火情,以及 2001 年 10 月我国黑龙江北部林区火情的估算分析,内蒙古原始林区火区的高火势像元(即亚像元火点面积较大,温度较高)数目远少于同期俄罗斯远东林区和 2001 年 10 月我国黑龙江北部林区的高火势像元,反映了此次原始林区地下火、近地面火较多,树冠火较少的特点。另外,在日常业务中监测到的大量焚烧农作物秸秆的火点的亚像元火点面积和温度均较小和较低。

在亚像元火点估算方法应用于监测业务时,以下几点需要加以考虑:

(1) 背景温度的选取方法以及对估算火点亚像元面积的影响 混合像元背景温度的选取可以参考周围与混合像元下垫面类型相同的像元亮温,但是许多火点是由多个相连的火点像元(混合像元)组成,因此如果仅考虑混合像元周围的固定像元来计算,容易将其其它火点像元带入计算。另外,实际监测中火点像元紧邻的像元一般亮温高于背景,否则会被当作噪声点。因此紧邻像元不适于当背景。

(2) 亚像元火点面积估算的概念 对草原、林区(南方和北方可能不同)、农田、工矿等不同下垫面,亚像元火点面积的意义不同。对草原及东北林区多是指火线;对南方林区、农田烧作物杆及工矿区大多是面(或片、点)。

亚像元火点估算的面积和温度仍然是一个平均值,在估算的亚像元面积中,还有可能有不同温度的分布,例如在这个高温区中更高的高温点。另外,显然对火点面积和温度的估算反映的是卫星观测的瞬间状态,其后有可能因当地风力、地形、可燃物密度等条件发生变化,因此应用时需考虑这些情况。

参考文献

- 1 Matson M, Schneider S R. Fire Detection Using the NOAA Series Satellite. NOAA Technical Report NESDIS 7, 1984.
- 2 Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of sub-pixel resolution. *Remote Sensing of Environment*, 1981, 11: 221 ~ 229.

THE METHOD OF EVALUATING SUB-PIXEL SIZE AND TEMPERATURE OF FIRE SPOT IN AVHRR DATA

Liu Cheng Li Yajun Zhao Changhai Yan Hua Zhao Hongmiao
(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

A method to evaluate the sub-pixel size and temperature of fire spot was presented by using the multiple infrared channel data from polar-orbiting meteorological satellite sensor under various fire spot conditions with the different infrared band data, for example, the mid-band ($3.7 \mu\text{m}$) and thermal-band ($11 \mu\text{m}$), or short infrared band ($1.6 \mu\text{m}$) and thermal-band ($11 \mu\text{m}$). The Newton's iteration method can be used to find an accurate solution from a dual non-linear coupled equation established by the expression of mixed pixel. For the different channels in the same infrared band, the relationship, between sub-pixel size and temperature of active fire vs the brightness temperature increment of mixed pixel in $11 \mu\text{m}$ channel and difference of brightness temperature increment of mixed pixel in $11 \mu\text{m}$ and $12 \mu\text{m}$ channel, can be established by generating a look up table, and from the table, the evaluating of sub-pixel size and temperature of fire spot can be derived from the brightness temperature of a mixed pixel.

Key words: Remote sensing Forest fire monitoring Sub-pixel evaluation