

气象卫星遥感热源点强度估算方法初探

刘 诚 李亚军 阎 华 赵洪森 徐 喆 赵长海

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

提 要

所谓热源点强度指的是气象卫星观测的含有火点像元中亚像元火点面积大小和温度高低的程度。极轨气象卫星 AVHRR 辐射计具有中红外、热红外及近红外通道,而高温热源点(即火点,如林火、草原火等)在不同红外波段发射辐射率有较大差异。根据高温热源点在不同红外波段(中红外、热红外和近红外波段)的黑体辐射特性和 AVHRR 通道特点(波长、空间分辨率、亮温动态范围等),可以利用多个红外通道资料估算亚像元火点面积和温度。对于由中红外 $3.7\mu\text{m}$ 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,可利用牛顿迭代法求解火点亚像元面积和温度的精确近似解。对于在近红外 $1.6\mu\text{m}$ 通道反映的高强度火点像元,可从像元信息中提取地表发射的辐射率,进而建立由近红外 $1.6\mu\text{m}$ 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,也可利用牛顿迭代法求解其火点亚像元面积和温度的精确近似解。根据亚像元火点面积和温度估算值的大小予以分级,可在一定程度上反映气象卫星监测热源点的强度,从而为森林、草原防火部门提供重要的火情监测信息。

关键词: 卫星遥感 火点监测 强度估算

引 言

目前,气象卫星火情监测业务服务中向森林、草原防火部门提供的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)和火点及火区所具有的像元个数。通过多年的气象卫星火情监测经验积累和技术开发,利用对高温热源非常敏感的极轨气象卫星 AVHRR 第三通道(中红外波段,波长为 $3.55\sim 3.95\mu$),并附以其它通道资料,已可以探测到几亩大小的火点,仅占 AVHRR 星下点像元分辨率(为 1.1km ,面积约 120hm^2)的千分之几。而在日常火情监测中,经常监测到数个或数十个,甚至上百个含有火点的像元。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。尤其在春季和秋季防火期的高火

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。

近几年来,随着卫星遥感火情监测在森林、草原防火工作中作用的加强,防火部门不断提出对卫星遥感火情监测信息新的需求,希望能得到反映含有火点像元(以下称混合像元)中火点实际面积和温度,即所谓热源点强度的信息。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)在中红外、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)使得在资料处理中可以获取火点在中红外、热红外通道引起的亮温差异。

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 气象卫星亚像元火点面积和温度估算原理

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 公里。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:

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

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 个子区面积, N_{Ti} 为该子区的辐射率, T_i 为该子区温度, S 为像元总面积。

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:

$$\begin{aligned} N_{mix} &= P \times N_{hi} + (1 - P) N_{bg} \\ &= P \times \frac{C_1 V_i^3}{e^{C_2 V_i / T_{hi}} - 1} + (1 - P) \times \\ &\quad \frac{C_1 V_i^3}{e^{C_2 V_i / T_{bg}} - 1} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: N_{mix} 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_{hi} 为火点辐射率, N_{bg} 为火点周围背景辐射率, T_{hi} 为火点温度, T_{bg} 为背景温度, $i = 3, 4, 5$, 表示 AVHRR 红外通道序号。

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。而影响森林、草原火点温度的因素也很多,包括可燃物种类、密度、风力等。不同种类(林木、草种)的燃烧温度有可能有较大差异,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(1)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(1)有 P (火点亚像元面积占像元面积百分比), 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面积或温度。

AVHRR 有三个红外通道,尤其是有中红外和热红外两个波段的通道。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。例如,可利用 CH3(3.7 μ m)和 CH4(11 μ m)通道混合像元不同辐射率增量估算亚像元火点面积和温度。

我国风云一号 C 星和 D 星均有波长为 1.6 μ m 的近红外通道,美国 NOAA 极轨气象卫星序列从 NOAA-K 开始白天将 AVHRR 第三通道改为播发 1.6 μ m 通道资料。卫星白天在 1.6 μ m 通道观测的信息主要是太阳辐射的反射,但高强度的火点在该通道也有反映。根据背景像元的可见光和热红外通道,可从 1.6 μ m 通道信息中提取地表发射的辐射率,从而可以结合热红外通道混合像元的辐射率增量估算亚像元火点面积。

2 利用 CH3(3.7 μ m)和 CH4(11 μ m)通道估算火点亚像元面积和温度

根据式(1),可建立一组 CH3, CH4 混合像元表达式:

$$\begin{cases} N_{3mix} = P \times N_{3hi} + (1 - P) N_{3bg} \\ N_{4mix} = P \times N_{4hi} + (1 - P) N_{4bg} \end{cases} \quad (2)$$

在式(2)的展开式中, T_{bg} (背景温度)可从混合像元周围非火点像元获得近似值,例如取周围 3×3 或 5×5 像元矩阵的算术平均值。因此在式(2)中仅有 P 和 T_{hi} 两个未知数。由式(1)可建立有关 P 和 T_{hi} 的方程组(式中 T 即为 T_{hi}):

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

这是一个二元非线性方程组, 可以用牛顿迭代法得到这一方程组的精确近似解。设点 $M_0(P_0, T_0)$ 是方程组(1)的一组近似解,

$U(P, T)$ 和 $V(P, T)$ 在点 $M_0(P_0, T_0)$ 的线性近似公式是:

$$\begin{cases} U(P, T) = U(P_0, T_0) + \frac{\partial U}{\partial P}(P - P_0) + \frac{\partial U}{\partial T}(T - T_0) \\ V(P, T) = V(P_0, T_0) + \frac{\partial V}{\partial P}(P - P_0) + \frac{\partial V}{\partial T}(T - T_0) \end{cases} \quad (4)$$

在点 $M_0(P_0, T_0)$ 附近方程组(1)的近似方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial P}(P - P_0) + \frac{\partial U}{\partial T}(T - T_0) + U(P_0, T_0) = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial P}(P - P_0) + \frac{\partial V}{\partial T}(T - T_0) + V(P_0, T_0) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

设系数行列式

$$J_0 = \begin{vmatrix} \frac{\partial U}{\partial P} & \frac{\partial U}{\partial T} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial T} \end{vmatrix}_{M_0} \neq 0$$

则方程组(2)的解记作 (P_1, T_1) :

$$\begin{cases} P_1 = P_0 + \frac{1}{J_0} \begin{vmatrix} \frac{\partial U}{\partial T} & U_0 \\ \frac{\partial V}{\partial T} & V_0 \end{vmatrix} \\ T_1 = T_0 + \frac{1}{J_0} \begin{vmatrix} U_0 & \frac{\partial U}{\partial P} \\ V_0 & \frac{\partial V}{\partial P} \end{vmatrix} \end{cases}$$

其中 $U_0 = U(P_0, T_0)$, $V_0 = V(P_0, T_0)$, 导数取在点 M_0 的值。

设 M_n 为 (P_n, T_n) , 则从 (P_n, T_n) 计算 (P_{n+1}, T_{n+1}) 的迭代公式是:

$$\begin{cases} P_{n+1} = P_n + \frac{1}{J_n} \begin{vmatrix} \frac{\partial U}{\partial T} & U_n \\ \frac{\partial V}{\partial T} & V_n \end{vmatrix} \\ T_{n+1} = T_n + \frac{1}{J_n} \begin{vmatrix} U_n & \frac{\partial U}{\partial P} \\ V_n & \frac{\partial V}{\partial P} \end{vmatrix} \end{cases}$$

其中 $U_n = U(P_n, T_n)$, $V_n = V(P_n, T_n)$,

J_n 是系数行列式在 M_n 点的值, 导数取在 M_n 点的值。

按以上过程迭代直到所需精度, 例如精度为 10^{-4} , 则当: $|U(P_n, T_n)| \leq 0.0001$ 且 $|V(P_n, T_n)| \leq 0.0001$ 时停止迭代。

例 1: 设火点混合像元 $CH3 = 320K$, $CH4 = 284K$, 背景像元亮温 $T_{bg} = 282K$ 。利用牛顿迭代法对火点亚像元面积和温度估算结果为:

$$P = 0.286\%, T = 608.4K$$

3 利用近红外 ($1.6\mu m$) 和热红外通道 ($11\mu m$) 估算火点亚像元面积和温度

3.1 原理

卫星从 $1.6\mu m$ 通道获取的信息主要是来自太阳辐射的反射。太阳表面温度为 $5800K$, 设 I_{sun} 为太阳表面在波长 $1.6\mu m$ (中心波数为 6250) 处的辐射出射度, 将太阳表面温度 $5800K$ 和 $1.6\mu m$ 通道中心波数 6250 代入普朗克黑体辐射公式, 计算得 $I_{sun} = 783019 mW/m^2 \cdot cm$ 。

到达地球大气层顶部时的辐射率为:

$N_{sun} = I_{sun} \times S_{sr}$, 其中 S_{sr} 为太阳作为一个平面辐射源对地球所张的立体角, $S_{sr} = (S_{\alpha}/S_{\alpha_0}) \times 2\pi$, 其中 S_{α} 为太阳圆平面

积, S_{dx} 为以日-地距离为半径的半圆表面积, 乘以 2π 表示平面对半圆所张的立体角。将有关数据代入:

$$\begin{aligned} S_{gr} &= (S_{sz}/S_{dx}) \times 2\pi \\ &= [(7 \times 10^5)2\pi]/[(1.5 \times 10^8)^2 \times 2\pi] \\ &\times 2\pi \\ &= 6.845 \times 10^{-5}, \end{aligned}$$

因而太阳在大气层顶部(与太阳垂直)处, $1.6\mu\text{m}$ 波长辐照度约为: $N_{sun} = I_{sun} \times S_{gr} = 53.5976 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 。

在不考虑大气影响情况下, 地表在 $1.6\mu\text{m}$ 通道的对太阳辐射的反射率达到 100% 时, 反射太阳辐射的辐射率相当于太阳在垂直于大气层顶部的辐照度除以 π , 即: $N_{RFS} = N_{sun}/\pi \approx 17 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 。

而地表在常温情况下(300K) $1.6\mu\text{m}$ 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 700K 以上时, 其辐射出射度才达到可和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 700K 以上高温的。

3.2 从 $1.6\mu\text{m}$ 通道信息中提取火点发射的辐射率

从 $1.6\mu\text{m}$ 通道获取的辐射率 $N_{1.6\mu}$ 包括对太阳辐射的反射和地表自身发射的辐射, 即:

$$N_{1.6\mu} = N_{1.6E} + N_{RF} \quad (7)$$

这里, $N_{1.6\mu}$ 为混合像元 $1.6\mu\text{m}$ 通道辐射率, N_{RF} 为对太阳辐射反射的辐射率, $N_{1.6E}$ 为地表发射的辐射率。火点发射的辐射率含在地表发射的辐射率 $N_{1.6E}$ 中, 为得到 $N_{1.6E}$, 首先需计算出 $N_{1.6\mu}$ 和 N_{RF} 。

$N_{1.6\mu}$ 和 N_{RF} 均可由反射率计算得辐射率。即:

$$N_{1.6\mu} = A_{1.6\mu\text{m}} \times N_{RFS} \quad (8)$$

$$N_{RF} = A_{1.6\mu\text{b}} \times N_{RFS} \quad (9)$$

这里, $A_{1.6\mu\text{m}}$ 为混合像元 $1.6\mu\text{m}$ 通道的反射率, 可直接获得。

$A_{1.6\mu\text{b}}$ 为 $1.6\mu\text{m}$ 通道混合像元中火点背景的反射率, 可从周围像元获取, 条件是必须为晴空陆地像元, 即:

$A_{1.6\mu\text{b}} > A_{0.58\mu}$, 且 $A_{0.58\mu} <$ 云门限值, $T_4 >$ 陆地门限值。这里 $A_{0.58\mu}$ 为可见光通道 CH1 反射率, T_4 为 CH4 亮温。

求得 $N_{1.6\mu}$ 、 N_{RF} 后, 可得到 $N_{1.6E}$:

$$N_{1.6E} = N_{1.6\mu} - N_{RF} \quad (10)$$

而 $N_{1.6E}$ 由火点发射的辐射率和火点周围背景的辐射率两部分组成。

3.3 将 $N_{1.6E}$ 代入方程组求解 P , T

建立 $1.6\mu\text{m}$ 通道混合像元表达式:

$$\begin{aligned} N_{1.6\mu\text{mix}} &= P \times N_{1.6\mu\text{ph}} + (1 - P) \\ &\times N_{1.6\mu\text{bg}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $N_{1.6\mu\text{bg}}$ 为火点周围背景的辐射率, $N_{1.6\mu\text{ph}}$ 为火点发射的辐射率, 并与远红外通道($11\mu\text{m}$)的混合像元表达式建立方程组, 利用以上的牛顿迭代法解得有关火点亚像元面积比例 P 和火点温度 T 的精确近似解。

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

$$A_{1.6\mu\text{mix}} = 53.2\%, \text{CH4}_{\text{mix}} = 313.2\text{K} \quad (12)$$

$$A_{1.6\mu\text{bg}} = 27.7\%, \text{CH4}_{\text{bg}} = 284.7\text{K} \quad (13)$$

将混合像元和背景像元 $1.6\mu\text{m}$ 通道反射率差异代入式(11), (12), (13), 可得到:

$$\begin{aligned} N_{1.6\mu\text{mix}} &= (A_{1.6\mu\text{mix}} - A_{1.6\mu\text{bg}}) \times N_{RFS} = \\ &4.34 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}) \end{aligned}$$

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火点亚像元面积比例 P 和火点温度 T 的精确近似解分别为:

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

可以看出,这一结果远远超过用中红外与热红外波段估算的亚像元火点面积和温度值。

4 热源点强度等级分类

通过例 1 和例 2 的估算结果可看出,气象卫星亚像元火点面积和温度估算值可能有相当大的差异,因此可反映不同程度的火点

强度。根据火点亚像元面积和温度估算结果可进行热源点强度等级分类。亚像元火点估算面积越大,温度越高,热源点强度等级越高。热源点强度等级的划分方法应根据不同监测区域的特点,例如,林区和草原由于燃烧温度不同,划分等级的范围也可能不同。表 1 为其中的一种热源点强度等级划分。

表 1 亚像元估算结果火势等级分类

热源点强度亚像元面积	1	2	3	4	5
<3000	<600K	600K~750K	>750K		
3000~3500	<580K	580K~680K	680K~800K	>800K	
3500~6500	<500K	500K~630K	630K~720K	720K~850K	>850K
6500~10000	<500K	500K~600K	600K~700K	700K~800K	>800K
10000~20000	<500K	500K~580K	580K~650K	650K~750K	>750K
>20000	<500K	500K~550K	550K~630K	630K~700K	>700K

5 讨论与结论

从例 1 和例 2 的估算结果可看出,利用气象卫星 AVHRR 中红外波段(CH3)和热红外波段(CH4)的混合像元可估算较小或较微弱的亚像元火点面积和温度,而利用近红外波段(1.6 μ m)和热红外波段(CH4)的混合像元可估算较大或较强的亚像元火点面积和温度。

在气象卫星亚像元火点估算方法的处理和应用中有以下几点需要加以考虑:

a. 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。例如可选取 3 $\times$ 3 或 4 $\times$ 4 像元的平均值。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固定像元计算,容易将其他火点像元带入计算。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作为背景像元参与计算。

b. 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、工矿等不同下垫面而意义不同。因为实际火场的形状在草原及东北林区可能是火线,在南方林区、农田烧作物杆及工矿大概是面(或片、点)。

亚像元估算的面积和温度仍然是一个平均值,在估算的亚像元火点范围中,可能还有不同温度的分布,例如在这个高温区中还有更高的高温点。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, 1984, 7.
- 2 Dozier, J. "A method for satellite identification of surface temperature fields of sub-pixel resolution," Remote Sensing of Environment, 1982, 11: 221-229.