

文章编号: 1004-4574(2008) 03- 0152- 06

# 基于 MODIS火点指数监测森林火灾

赵文化, 单海滨, 钟儒祥

(国家卫星气象中心广州气象卫星地面站, 广东 广州 510640)

**摘要:** 在利用 MODIS 红外辐射遥感数据分析异常热点光谱辐射特性的基础上, 提出了一个新的火情监测模型归一化差异火点指数, 并通过几起较大的森林火灾对该模型进行了分析和验证, 给出了该监测模型的详细算法。EOS-MODIS 探测器具有多光谱、高光谱及热点监测动态范围宽的特点, MODIS 的新一代多光谱探测器 NPOESS NPP V IRS 同样继承了 MODIS 的优势, 为归一化差异火点指数算法模型提供了广阔的应用前景。

**关键词:** 森林火灾; 火灾监测; 归一化差异火点指数

**中图分类号:** S762.3<sup>+</sup>2      **文献标识码:** A

## A new model for the MODIS fire monitoring: normalized difference thermal index

ZHAO Wen-hua, SHAN Hai-bin, ZHONG Ru-xiang

(Guangzhou Meteorological Satellite Station, Guangzhou 510640, China)

**Abstract** In this paper, based on analyzing the characteristic of the hot spot spectral radiance by use of related MODIS bands data, a new model named normalized difference thermal index (NDTI) was developed for the fire detection and monitoring. The algorithm of this model was discussed and given in details. Furthermore, the NDTI model was validated through a day fire case and a night fire case occurring in Heyuan, China. The NDTI may be widely used for sensor of the EOS-MODIS, NOAA-AVHRR, GOES-VAS, future NPP-V IRS, future Chinese FY3 and more.

**Key words** forest fire; fire monitoring; normalized difference thermal index

MODIS 在 3-14 $\mu$ m 的短波红外、中波红外和长波红外区间设置了 16 个观测通道, 其中包括专门为火情监测而设置的两个 4 $\mu$ m 通道, 分别为低增益的 3959nm 通道 B21 和高增益的 3959nm 通道 B22, 其中高增益通道同时也作为其他应用。仅就红外探测而言, 与同类探测器 NOAA-AVHRR、GOES-VAS 相比, EOS-MODIS 主要在 3 个方面具有明显的优势: 一是光谱分辨率高, B21-B25 通道带宽 (FWHM) 为几十纳米的量级, 3959nm 通道带宽为 59nm, 已经具有高光谱遥感 (hyperspectral remote sensing) 的能力。二是 DN 数字量化精度高, 具有 12Bit 的数字化采样。三是饱和温度高, 对高温物体的辐射监测具有较宽的动态范围, 其中 3959nm 高增益通道饱和温度为 350K, 低增益通道饱和温度则高达 500K, 用于辅助火情监测的 11030nm 通道饱和温度亦有 400K 之高, 而 AVHRR、VAS 探测器的通道饱和一般在 330K 左右, 这一点对火情监测非常重要, 为开发 MODIS 特色的火情算法提供了基础。MODIS 的火情监测算法模型 (以下称为推荐算法) 是从 NOAA-AVHRR、GOES-VAS 算法改进而来, 相比之下 MODIS 火情监测推荐算法具有更高的监测精度, 可

收稿日期: 2007-07-13    修订日期: 2007-10-21

基金项目: 受广州市科技局科技攻关项目支持。项目名称《广州市卫星遥感林火实时监测系统》(项目编号 2004Z3-E0041, 2004-2006)

作者简介: 赵文化 (1966-), 男, 工程师, 主要从事气象卫星遥感应用研究。E-mail: zhaowenhua@tom.com

以提供更多的火情监测内容例如明火、闷烧、辐射能量和火情等级划分。但是, 推荐算法模型基于光谱亮度温度, 在实际应用中, 对于直接广播 (DB) 用户而言, 单条接收轨道数据量非常大, 将 1B 辐射数据集转换为亮温数据集需要大量的运算时间。另外, 推荐算法需要建立火点背景窗口, 过程复杂数学运算步骤多, 需要耗费大量的运算时间。对于火情监测应用而言, 实时性非常重要。本文在分析火点辐射特征的基础上提出基于辐射率的火情监测算法模型。

## 1 火点辐射特征

根据维恩位移定律, 物体辐射峰值波长  $\lambda_{max}$  随温度升高向短波方向移动:

$$\lambda_{max}(T) = \frac{2892}{T} \quad (1)$$

式 (1) 中,  $\lambda$  的单位为  $\mu\text{m}$ ,  $T$  的单位为 K。图 1 显示了辐射峰值随温度的变化情况。统计数据显示一般林火燃烧温度介于 500~1000K 之间, 因此其辐射能量应主要集中在  $2.8\mu\text{m} \sim 5.7\mu\text{m}$  之间。通过地面的实验研究结果证明包括林火在内的高温燃烧火焰都具有相似的光谱辐射特性, 其辐射主要集中在两个离散的区域, 强带在  $4 \sim 5\mu\text{m}$  之间, 弱带在  $2 \sim 3\mu\text{m}$  之间, 而其他谱段的辐射则相对小的多, 如图 2 所示。由此可见, 高温燃烧属于选择性辐射体, 设辐射率为  $R$ , 比辐射率为  $\varepsilon$ , 普朗克黑体定律函数为  $B$ , 则燃烧辐射可表示为:

$$R(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda)B(\lambda, T) \quad (2)$$

$$\varepsilon(\lambda)_{max} = \varepsilon(\lambda) |_{4 \sim 5\mu\text{m}} \quad (3)$$

利用 MODIS 实测观测数据可以分析火点的光谱辐射特性。图 3 为使用 MODIS 红外观测数据对 2005 年 12 月 17 日 11 时 02 分广东省河源地区所发生的一起林火灾火点辐射的计算结果, 图中菱形符号代表 MODIS 的 16 个热红外通道在  $3 \sim 15\mu\text{m}$  波长范围的分布位置。综合考虑大气透射窗口, MODIS 将火情监测低增益通道设置为 3959nm。3959nm 通道测得的河源林火灾火点辐射达到  $30\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$ 。处于  $3 \sim 5\mu\text{m}$  大气窗口内的 MODIS B20, B22, B23, B24, B25 通道在火点辐射下均达到饱和状态, 而 B27, B28 通道由于落在大气吸收带内也无法获得可靠的观测值。尽管如此, 3959nm 通道的辐射数据和其他通道的辐射数据仍然大体上为我们构造出火点在  $3 \sim 15\mu\text{m}$  范围的选择性辐射曲线轮廓。

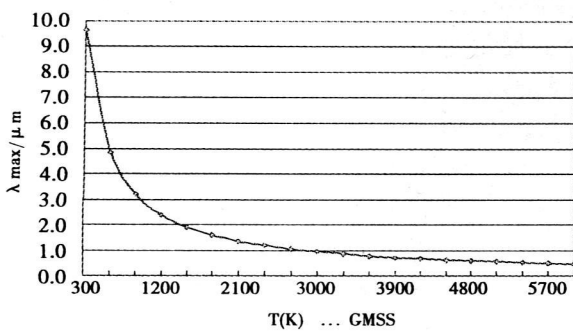


图 1 辐射峰值波长随温度的变化

Fig. 1 Variation of radiative peak wavelength with temperature

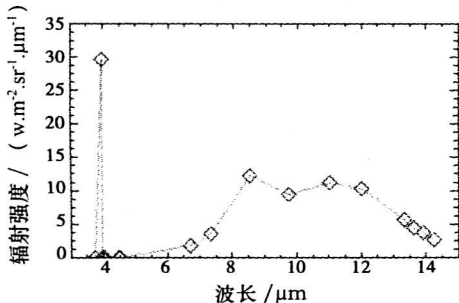


图 3 河源林火的火点辐射

Fig. 3 Radiation of fire spot in Heyuan forest fire

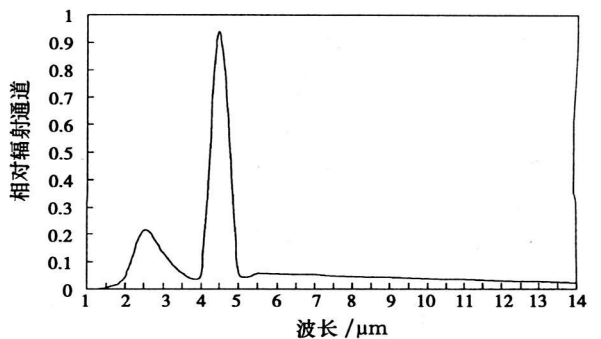


图 2 辐射的主要波段

Fig. 2 Primary waveband of radiation

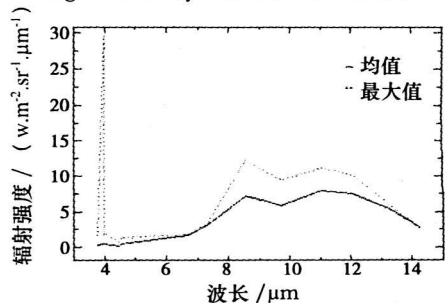


图 4 平均辐射强度随波长的变化

Fig. 4 Variation of average radiation intensity with wavelength

河源林火火点周围 100 km 范围包括了植被、裸土、山体和湖泊等地表类型,因此在这些地表背景下对火点辐射的分析具有典型代表性。对火点地区  $213 \times 160 = 34080$  个扫描样本的所有 16 个通道辐射率进行数值统计可以得到区域平均辐射强度沿波长的均值分布曲线,如图 4 所示,虚线表示火点的辐射分布。从图 3 和图 4 可以看到,火点在 3959nm 通道的辐射强度达到  $30W/m^2/sr/\mu m$ ,是该通道辐射均值的 20 倍,要远远大于其周围背景象元,其辐射强度特征非常明显。对比而言,火点给其他观测通道所带来的辐射增量则相对较小。例如 11030nm 通道仅有约 0.5 倍的辐射增长,而处于长波红外波段的 13635nm, 13935nm 和 14235nm 观测通道的辐射率则几乎没有感知到任何变化。火点辐射呈现出明显的非均匀性分布。许多相关研究表明,虽然火点辐射非均匀性分布包含大气非均匀吸收对观测结果的影响,但是其主要原因在于火点本身的选择性辐射特性。因此,利用火点的选择性辐射特性可以建立一个基于辐射观测数据的火情监测模型。这也正是本文的立论依据。

## 2 NDT I 指数模型

基于以上分析可以知道,MODIS 3959nm 通道的火点响应和其他通道相比具有根本差别。参照 MODIS 推荐算法的通道选择组合考察 11030nm 通道,11030nm 通道受火点辐射影响较小,其辐射成分中大部分分量是来自于火点下垫面其他地表类型的贡献,也就是说 11030nm 通道基本上包含了火点的背景辐射信息。利用这两个通道的这种辐射性质差异,参照 NDVI, NDSI 等指数监测模型,可以建立一个基于辐射的反映火点强度的归一化差异火点指数 (normalised difference thermal index, NDT I)  $I_{NDT}$ :

$$I_{NDT} = \frac{R_{21} - R_{31}}{R_{21} + R_{31}} \tag{4}$$

其中  $R_{21}$ ,  $R_{31}$  分别为 3959nm 和 11030nm 通道观测辐射率。 $I_{NDT}$  属于比值指数,是无量纲的。 $I_{NDT}$  也同时拥有比值指数的其他优点,主要体现在 3 个方面,一是有效衰减探测仪器本身的噪声成分,二是一定程度上抵消大气的影响,三是去除了探测器的扫描角度响应函数的影响。

在不考虑大气吸收情况下可以对常规地表 NDT I 做以下模拟计算。将式 (2) 代入  $I_{NDT}$  的公式中,得到:

$$I_{NDT} = \frac{\epsilon(21)B_{(21,T)} - \epsilon(31)B_{(31,T)}}{\epsilon(21)B_{(21,T)} + \epsilon(31)B_{(31,T)}} \tag{5}$$

常温下大部分地表类型近似为灰体,  $\epsilon(21) = \epsilon(31)$ , 上式简化为:

$$I_{NDT} = \frac{B_{(21,T)} - B_{(31,T)}}{B_{(21,T)} + B_{(31,T)}} \tag{6}$$

公式 (6) 即为黑体和灰体的  $I_{NDT}$  计算公式,从公式看出,黑体或灰体的  $I_{NDT}$  只和温度有关。图 5 描绘了这种关系。常态下地表温度 300K 时的  $I_{NDT}$  为  $[-0.86]$ , 但当温度为 400K 时  $I_{NDT}$  将快速增长到  $[-0.34]$  并在 500K 时达到  $[+0.2]$ 。实际应用中需要对卫星观测的辐射值做大气吸收订正。11030nm 通道需要做水汽订正, 3959nm 通道还需要做气体吸收订正,这里不作进一步讨论。

河源火情地区  $213 \times 160$  扫描样本的  $I_{NDT}$  散射图如图 6 (a), (b) 所示,图 6 (a) 为白天情况,图 6 (b) 为夜间情况。白天由于太阳辐射影响  $I_{NDT}$  均值稍高,约为  $[-0.89]$ , 夜间均值为  $[-0.92]$ 。这与式 (6) 计算结果是一致的。大部分地表样本的  $I_{NDT}$  都落在  $[-1, -0.8]$  区间范围,尤其是在夜间。超出该范围的样本表现出特别的情形。裸土的  $I_{NDT}$  一般在  $[-0.87]$  左右, 植被、湖泊和海洋一般为  $[-0.89]$  左右, 主要地表类型常态下的  $I_{NDT}$  几乎没有明显差别, 具有稳定的指数取值, 浓积云白天由于反射作用具有较高的指数, 见图 7。根据  $I_{NDT}$  公式,  $I_{NDT}$  介于  $[-1, +1]$  之间, 河源林火的  $I_{NDT}$  达到  $[+0.45]$ 。显然, 较大的  $I_{NDT}$  数值代表较高的火情指数。使用  $I_{NDT}$  监测林火火点关键在于根据地区和白天夜间差异确定一个合适的监测门限, 一般情况下, 门限取值在  $[-0.8 - 0.5]$  之间。门限过小将会检测到一些非火点热点, 例如生产热点等, 门限过大将会漏检一些小面积或闷烧火点。

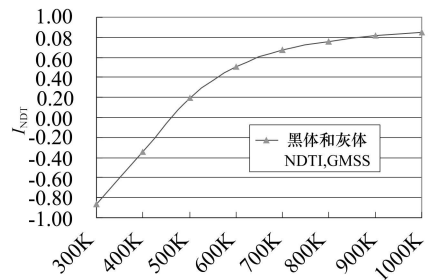


图 5  $I_{NDT}$  与温度的关系

Fig 5 Relationship between  $I_{NDT}$  and temperature

用于监测火情的计算机程序应该在 GUI 设计中包含修改白天和夜间监测门限参数的自定义功能。

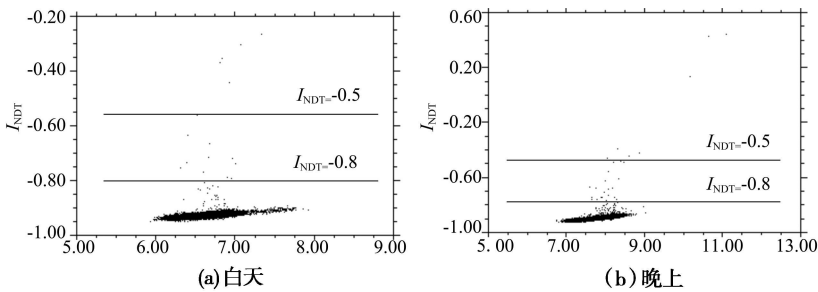


图 6 某扫描样本的  $I_{NDT}$  散时图

Fig 6 Scattering diagram of  $I_{NDT}$  of a scanned sample

类似 NDVI 的做法, 可以利用  $I_{NDT}$  指数对热点火点进行分类研究。这种分类可以是基于火点类型或者强度。例如火点属于林火或者天然气燃烧或者火山爆发等, 类型判断需要结合热点的辐射谱线, MODIS 只能提供部分高光谱谱线。MODIS 推荐算法使用  $4\mu\text{m}$  单通道亮温大小划分火点的强度级别。可以将  $4\mu\text{m}$  亮温划分法经过黑体辐射定律映射为辐射率划分方法, 也可以建立  $I_{NDT}$  划分方法。



图 7 不同地表类型对应的  $I_{NDT}$  值

Fig 7 Values  $I_{NDT}$  corresponding to different kinds of earth's surface

### 3 算法实现

实际 MODIS 火情监测应用中的数据源一般为已经完成定标和定位的 HDF 文件格式的 1B 数据, 计算火情指数  $I_{NDT}$  需要 MOD021KM 文件中的 TEB 数据集  $4\mu\text{m}$  和  $11\mu\text{m}$  辐射数据以及经纬度数据集。1KM 文件中的经纬度数据集是对沿扫描方向 1354 个样本和沿轨道方向的 1/5 抽样子集, 如果需要火点的原始精确定位信息则还需要 MOD03 定标文件, 一般情况下对该抽样子集进行插值(重采样)已经可以满足定位精度要求, 所以计算  $I_{NDT}$  只需要一个 1KM 文件。另外, 在白天情况需要过滤太阳耀斑, 一般使用  $645\text{nm}$  和  $858\text{nm}$  即 B1, B2 通道的反射率, 但是并不需要读取这两个通道的全部数据, 而仅需读取预判火点对应的反射率数据, HDF 编程接口 API 支持科学数据集的定点读取操作。由于 1B 数据中的辐射率和反射率是以 SI 的形式存储的, 因此需要使用伸缩算法进行物理量反算。

火点所产生的长波红外辐射一般不会穿透云, 无论何种算法基本上不可能在有云覆盖的地区检测到火情。过滤云是一个可选的操作。然而计算机火情自动检测程序的设计应当力求最少的大容量数据集的读写操作

和最小化的数学运算规模, 是否需要云检测可能是一个会影响计算速度的关键因素。MODIS 推荐算法中包含过滤云操作以避免复杂的毫无意义的后续运算。 $I_{NDT}$  指数算法情况则有所不同。与过滤太阳耀斑的简单算法相比, 无论在白天还是夜间云检测都必须对至少两个通道的数据进行逐点的加减运算或逻辑判断, 这样在避免了  $I_{NDT}$  运算操作的同时又产生了几乎相同的运算时间。因此,  $I_{NDT}$  指数计算不必过滤云。图 8 为使用

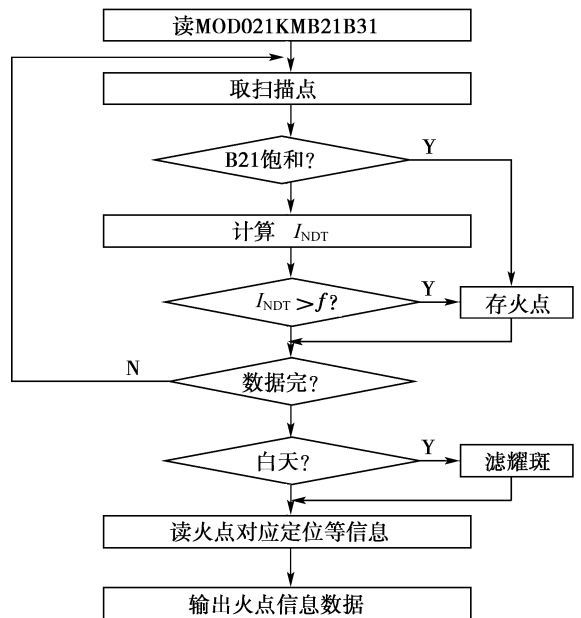


图 8 火点信息数据计算流程图

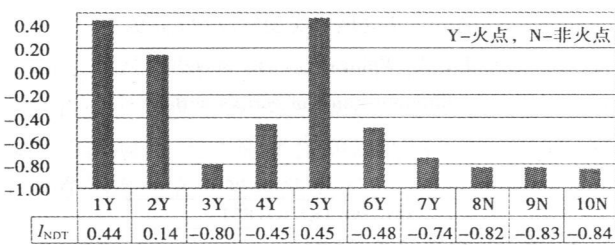
Fig 8 Flowchart of calculating fire spot information data

$I_{NDT}$ 火情指数实时检测火点的计算过程, 其中  $f$  为判断阈值, 需要区分白天或夜间。

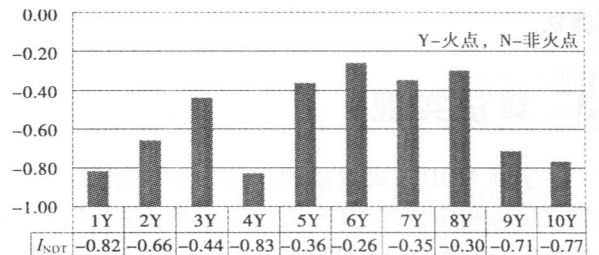
### 4 验证和校正

综合以上分析, 使用  $I_{NDT}$  指数模型进行火点检测在理论上是完全可行的。余下的工作主要是通过大量的验证和校正确定一个合适的门限。白天和夜间可以使用不同的门限标准。MODIS  $4\mu m$  通道对热点火点非常敏感, 可以感知数百平方米的火点, 监测林火的门限应当过滤生产性热点的干扰。许多农业种植区在夏收或秋收季节都有焚烧作物秸秆的习惯, 这种小面积燃烧很容易被检测到并且其  $I_{NDT}$  一般都接近  $[-0.8]$ , 适当调高门限可以滤除这些生产性虚假火点。另一方面, 过大的门限将导致漏检一些处于发展阶段的林火火点。对于监测林火, 一个比较好的解决办法是使用地理信息系统 GIS 技术, 将火情自动监测系统所输出的火点数据作为 GIS 的输入数据与土地利用数据库结合起来, 可提供准确的林火判断。

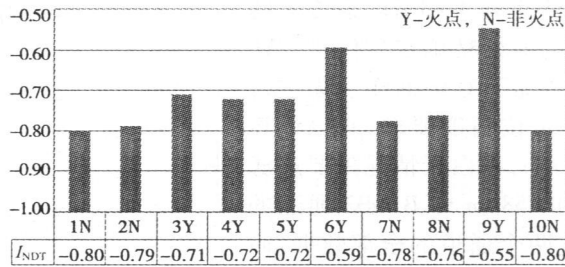
本文使用 MODIS 推荐算法帮助选择适当的门限和对  $I_{NDT}$  方法获得的火点进行回归验证分析, 获得了较好的效果。图 9 (a), (b), (c) 分别显示了使用 MODIS 推荐算法监测广东河源 2005 年“12 16”特大林火白天、夜间和云南安宁 2006 年“3 29”特大林火所得火点情况及其对应的  $I_{NDT}$ 。综合结果显示, 对于河源和安宁火情, 选择检测门限  $f = (\text{白天} - 0.75, \text{夜间} - 0.8)$  能够使火点识别率达到 93%, 使得  $I_{NDT}$  指数方法判识准确度与 MODIS 推荐算法达成一致, 完全满足火情监测的实际需要。对于基于  $I_{NDT}$  的其他应用, 可以微调门限以适应不同地区的微小差异。



(a)2005-12-16 河源林火 (白天)



(b)2005-12-16 河源林火 (晚上)



(c)2006-03-29 安宁林火

图 9 森林火点情况及对应的  $I_{NDT}$  值

Fig 9 Fire spot situation of two forest fires and their corresponding values  $I_{NDT}$

### 5 结论

火点表现出与其他常态探测点完全不同的辐射特征, 利用火点选择性辐射特征可以建立基于辐射率的 MODIS NDTI 火点指数模型, 这种双通道比值指数和 NDVI 一样具有衰减仪器噪声和抵消常规大气影响的优点。  $4\mu m$  火点辐射通道和  $11\mu m$  背景分量通道的组合突出了火点信息, 选择合适的  $I_{NDT}$  门限,  $I_{NDT}$  指数能够准确检测火点, 识别率可达到 93%。

根据对实时接收轨道的实测, 由于使用极少的数据集数学运算操作, NDTI 模型比 MODIS 推荐火情算法

在计算速度上快两倍以上。MODIS 推荐算法包含许多温度计算操作, 并且需要建立分析窗, 即使采用查找表方法也需要耗费大量运算时间。对于一个实时接收处理的实时监测系统而言, 海量空间观测数据的快速计算处理非常重要。

MODIS NDTI 火情指数可以推广到同类探测器的应用中, 例如 NOAA - AVHRR, GOES - VAS 以及即将运行的 NPP - VIIRS 和 FY3 平台。

## 参考资料

- [ 1 ] 星地通公司. EOS MODIS 资料接收处理系统技术手册 [M]. 北京: 气象出版社, 2001: 11- 12
- [ 2 ] 刘玉洁, 杨忠东, 等. MODIS 遥感信息处理原理与算法 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 260- 278
- [ 3 ] Algorithm Technical Background Document MODIS FIRE PRODUCTS (Version 2. 2 Nov. 10 1998), Yoram Kaufman and Chris Justice