

文章编号:1001-9014(2011)02-0104-06

# 基于观测几何的环境卫星红外相机遥感火点监测算法

贺宝华<sup>1,3</sup>, 陈良富<sup>1</sup>, 陶金花<sup>2</sup>, 苏林<sup>1</sup>, 王子峰<sup>1</sup>,  
李莘莘<sup>1</sup>, 韩冬<sup>1</sup>, 张莹<sup>1,3</sup>, 余超<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室,北京 100101;  
2. 中国科学院大气物理研究所 大气边界层物理与大气化学国家重点实验室,北京 100029;  
3. 中国科学院研究生院,北京 100049)

**摘要:**MODIS V4 算法在观测天顶角较大或太阳天顶角较大时会出现火点漏判现象,针对这个问题,通过数值模拟的方法分析了由明火与背景地物组成的火点像元的亮温在不同观测几何条件下的变化,并在 MODIS V4 算法基础上提出了针对环境卫星红外相机的基于观测几何的遥感火点监测算法.通过高分辨 CCD 数据建立烟羽掩码对多景环境卫星火点监测结果进行了验证.与 MODIS 火点产品对比,环境卫星在火点定位以及小面积火点识别方面具有优势.

**关键词:**MODIS V4; 观测几何; 环境卫星红外相机; 火点监测  
**中图分类号:**TP391.41 **文献标识码:**A

## A contextual fire detection algorithm based on observation geometry for HJ-1B-IRS

HE Bao-Hua<sup>1,3</sup>, CHEN Liang-Fu<sup>1</sup>, TAO Jin-Hua<sup>2</sup>, SU Lin<sup>1</sup>, WANG Zi-Feng<sup>1</sup>,  
LI Shen-Shen<sup>1</sup>, HAN Dong<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1,3</sup>, YU Chao<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;  
2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of  
Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;  
3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** MODIS V4 fire detection algorithm has problems of fire omissions at large scan geometries. In order to solve this problem, the brightness temperature changes of fire pixels, which consist of fire and background surface at different scan geometries, were analyzed. Active potential fire detecting thresholds were developed according to scan geometries. A fire detection algorithm for the HJ-1B-IRS based on MODIS V4 algorithm was presented. Using HJ-1B-CCD data, we validated the fire detection results of HJ-1B-IRS with the fire detection method based on smoke plumes. In comparison to MODIS fire products, HJ-1B-IRS fire product shows advantage on fire location and small fire detection.

**Key words:** MODIS V4 ; observation geometry; HJ-1B-IRS; fire detection

**PACS:** 95.30. Jx, 95.75. Rs, 95.85. Jq

## 引言

生物质燃烧会造成严重的空气污染,产生大量有害气体,危害人类健康,引发的火灾也对人类的生命安全造成严重的威胁.地面监测火灾需要耗费大量人力物力且只能做到点状监测,而使用卫星遥感方法,可以进行大范围、全天候的火灾监测,火点遥

感监测算法从最初应用于 NOAA/AVHRR 的单通道算法、双通道算法和上下文算法发展到现在的 MODIS 火点探测第四版(V4)算法,虽然算法精度不断提高,但仍然存在观测几何较大时出现火点漏判的问题<sup>[1-4]</sup>,例如 Wang 在 MODIS 图像中扫描角较大时发现了大量亮温低于 310K 的火点像元<sup>[5]</sup>.

2008 年我国发射了用于监测环境污染、生态破

收稿日期:2010-05-17,修回日期:2010-07-06

Received date: 2010-05-17, revised date: 2010-07-06

基金项目:863 计划重大项目(2006AA06A303);中国科学院知识创新工程重大项目(kzcx1-yw-06-01)

作者简介:贺宝华(1985-),男,河南平顶山人,博士研究生,研究方向为大气环境遥感,E-mail:baohua.he@gmail.com.

坏和自然灾害的 HJ-1A 和 HJ-1B 两颗卫星,其中 HJ-1B 卫星搭载了高分辨率 CCD 相机及由中国科学院上海技术物理研究所研制的红外相机,其中红外相机四个波段范围分别为  $0.75 \sim 1.10 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \sim 1.75 \mu\text{m}$ 、 $3.50 \sim 3.90 \mu\text{m}$ 、 $10.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 。虽然国内学者提出了基于环境卫星模拟数据的火点监测算法,但是并未解决在观测天顶角较大或太阳天顶角较大时出现的火点漏判现象<sup>[6]</sup>。针对 HJ-1B 红外相机数据特点,通过模拟的方法分析了由明火与背景地物组成的火点像元的亮温在不同观测几何的变化情况,并根据模拟结果提出了不同观测几何条件下的潜在火点判定阈值及绝对火点判定阈值,在 MODIS V4 算法基础上设计了基于观测几何的环境卫星红外相机火点监测算法。使用同时相同区域的 HJ-1B-CCD 高分辨数据制作烟羽掩膜,并采用基于烟羽掩膜的火点监测方法开展了对环境卫星火点监测结果的验证。通过与 MODIS 火点产品的对比,进一步评价环境卫星在火点探测方面的特点。

## 1 不同观测几何下火点像元亮温的模拟

MODIS V4 算法主要分为两步<sup>[4]</sup>:首先根据潜在火点阈值 310K 确定潜在火点像元,根据绝对火点阈值 360K 确定绝对火点像元;然后基于窗口特征的空间统计分析以确定真实火点,排除耀斑、沙漠边缘等虚假火点。潜在火点阈值的设定是一个重要的问题,阈值过高会遗漏火点,阈值过低会在背景像元中引入较多的噪声而造成虚假火点,绝对火点阈值的设定也有同样问题。为了确定潜在火点阈值与绝对火点阈值,使用模拟的方法来分析火点像元的亮温特性。

假设火点像元只由背景地物和明火两部分组成,并且假设地表为朗伯体,那么火点像元的辐亮度可表示为<sup>[2]</sup>:

$$R = p((1 - \varepsilon_b) \cos(\theta_s) E_s \tau(\theta_s) \tau(\theta_v) + \varepsilon_b B(T_b) \tau(\theta_v)) + (1 - p) \varepsilon_f B(T_f) \tau(\theta_v) \dots \quad (1)$$

其中, $p$  为背景地物面积比例, $1 - p$  为明火面积比例, $\varepsilon_b$  为地物背景发射率, $1 - 1 - \varepsilon_b = \rho_b$  为地物背景反射率, $\varepsilon_f$  为明火发射率, $T_b$  为背景地物温度, $T_f$  为明火温度, $\tau$  为大气透过率, $\theta_v$  为观测天顶角, $\theta_s$  为太阳天顶角, $E_s$  为太阳常数。式(1)右边第 1 项是地物反射,第 2 项是地物自身发射,第 3 项是火焰自身发射。

模拟的方法是根据式(1),使用 MODTRAN4 分别计算背景地物与明火在环境卫星红外相机第三波

段的辐亮度,然后乘以它们各自在火点像元中所占的面积比例,最后将乘积相加即得到火点像元的辐亮度。模型参数设定如下:像元星下点面积为  $90000 \text{m}^2$  (像元面积会随着观测天顶角变化),明火温度为 1000K,明火在中红外通道发射率为 0.95,明火面积为  $0 \text{m}^2$ ,  $0.9 \text{m}^2$ ,  $9 \text{m}^2$  和  $90 \text{m}^2$ ,太阳天顶角范围为  $0^\circ \sim 60^\circ$ ,观测天顶角为  $0^\circ \sim 30^\circ$ ,背景地物选择为低反射率的常绿针叶林、常绿阔叶林、热带草原和农田,以及高反射率的岩石、沙漠和沥青。将背景地物的温度设定为夏季平均地面温度 300K,大气模式设定为中纬度夏季。

模拟结果如图 1 所示,从图中发现:一.火点像元的亮温  $T_3$  随着观测天顶角和太阳天顶角的增大而降低,图 1 中,常绿针叶林火点像元在观测天顶角和太阳天顶角皆为  $0^\circ$ ,有面积  $9 \text{m}^2$  温度 1000K 的明火时, $T_3$  为 324.4K;当观测天顶角增大为  $30^\circ$ ,太阳天顶角增大为  $60^\circ$ ,有面积  $9 \text{m}^2$  温度 1000K 的明火时, $T_3$  降低为 316.5K。二.在明火面积较小时,火点像元亮温随太阳天顶角变化较大,随观测天顶角变化较小;而当明火面积较大时,火点像元亮温随太阳天顶角变化较小,随观测天顶角变化较大。图 1 中纵轴方向为观测天顶角方向,横轴方向为太阳天顶角方向。常绿针叶林火点像元,当明火面积为  $0 \text{m}^2$  和  $0.9 \text{m}^2$  时,横向亮温差较大,达到 7K,而纵向亮温差很小,只有 1K 左右,如图 1(a),图 1(b);而当明火面积达到  $90 \text{m}^2$  时,横向亮温差很小,只有 1K 左右,而纵向亮温差达到 10K,如图 1(d),而且对于其它几种背景地物的模拟结果也具有同样的现象。

通过模拟发现,火点像元亮温随观测几何变化较大。采用固定的火点阈值方法,如果设定阈值过高,那么由于观测几何较大时火点像元的亮温较低,便会导致火点的漏判;如果设定阈值过低,那么由于观测几何较小的无火点像元亮温较高,又会导致在背景像元中引入较多的噪声。因此根据观测几何设定观测阈值是十分重要的。

## 2 火点监测算法

### 2.1 云和水陆识别

根据对红外数据的统计设定云识别阈值,只要满足  $\rho_1 > 0.6$ 、 $T_4 < 265 \text{K}$  或者  $(\rho_1 > 0.4$  且  $T_4 < 285 \text{K})$  这些条件的像元皆认为是云像元,其中  $\rho_1$  为红外相机第一波段反射率, $T_4$  为红外相机第四波段亮温。耀斑现象会导致虚假火点,而且在水陆交界处由于水陆温度差异较大也会产生虚假火点<sup>[3]</sup>,所以必须建立水陆掩

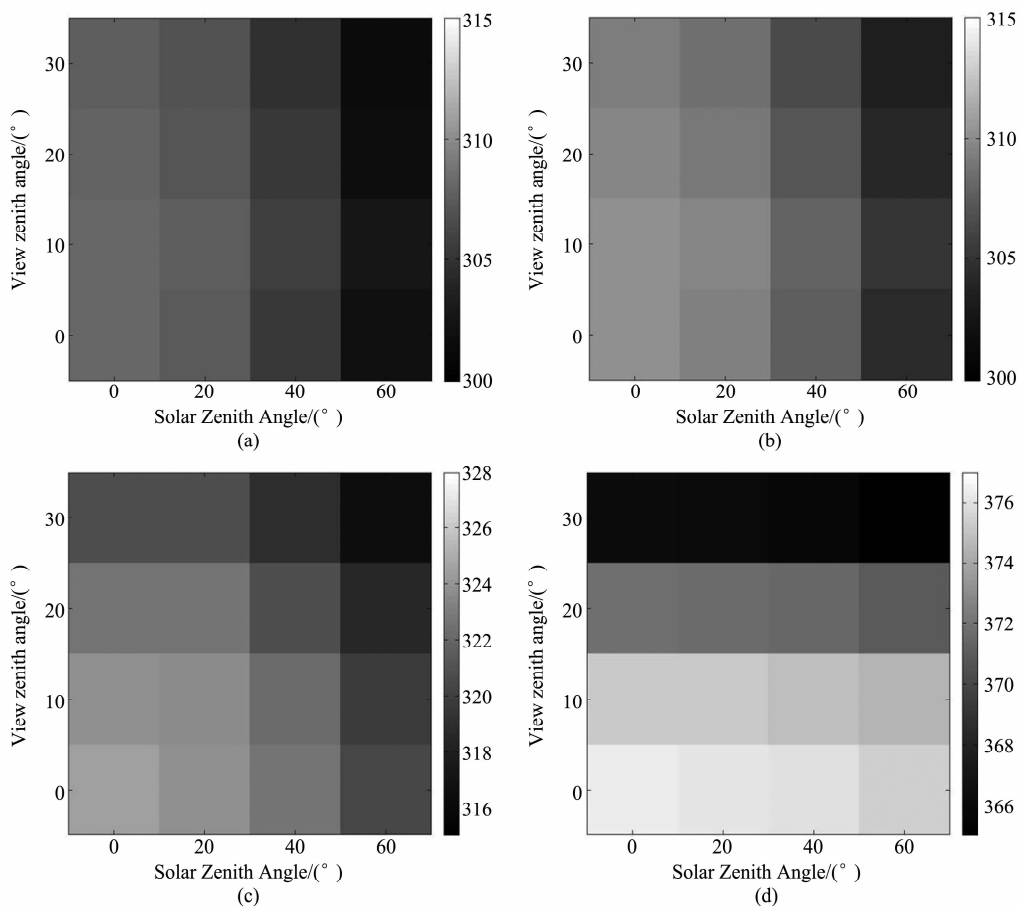


图 1 温度为 300K 的常绿针叶林与温度为 1000K 的明火组成的混合像元的  $T_3$  随着观测几何变化 (a) 明火面积  $0\text{m}^2$  (b) 明火面积  $0.9\text{m}^2$  (c) 明火面积  $9\text{m}^2$  (d) 明火面积  $90\text{m}^2$   
 Fig. 1  $T_3$  for the pixel comprised of evergreen needle forest (temperature 300K) and 1000K fire with different areas at different observation geometries (a) fire area  $0\text{m}^2$  (b) fire area  $0.9\text{m}^2$  (c) fire area  $9\text{m}^2$  (d) fire area  $90\text{m}^2$

膜来排除这些问题. 水体掩膜为  $\rho_1 < 0.1, \rho_2 < 0.1$  且  $\rho_1 > \rho_2$ , 其中  $\rho_2$  为红外相机第一波段反射率, 凡是满足这个条件的像元皆认为是水体像元.

### 2.2 潜在火点识别

设定火点阈值应考虑传感器特性(动态范围和量化等级等)和所要监测的火点特性(燃烧物质, 过火面积和季节因素等)<sup>[3]</sup>, 因为主要讨论观测几何对于火点监测的影响, 所以仅使用数值模拟的方法给出了潜在火点判定阈值和绝对火点判定阈值. 潜在火点阈值和绝对火点阈值均以表格的形式给出, 如表 1, 表 2 所示, 对于不在表中给出的观测几何, 可使用插值方法确定其阈值. 设定能监测到的火情是面积最小  $9\text{m}^2$ , 温度 1000K 的明火, 计算观测几何  $(\theta_s, \theta_v)$  下此种明火与多种背景地物(常绿阔叶林, 常绿针叶林, 热带草原和农田)组成的火点像元的亮温, 然后将亮温平均值设定观测几何  $(\theta_s, \theta_v)$  下潜在火点判定阈值  $T_3(\theta_s, \theta_v)$ , 具体阈值如表 1.

表 1 基于观测几何的潜在火点识别阈值 ( $T_{3,p}$ ) 表  
 Table 1 Potential fire detection thresholds ( $T_{3,p}$ ) based on observation geometry

| 观测天顶角 $\theta_v$ ( $^\circ$ ) | 第三通道亮温 (K)                    |     |     |     |
|-------------------------------|-------------------------------|-----|-----|-----|
|                               | 太阳天顶角 $\theta_s$ ( $^\circ$ ) |     |     |     |
|                               | 0                             | 20  | 40  | 60  |
| 0                             | 325                           | 324 | 323 | 321 |
| 10                            | 324                           | 324 | 323 | 320 |
| 20                            | 323                           | 323 | 321 | 319 |
| 30                            | 321                           | 321 | 319 | 316 |

凡是在观测几何  $(\theta_s, \theta_v)$  下, 如果陆地非云像元满足  $T_3(\theta_s, \theta_v) > T_{3,p}(\theta_s, \theta_v)$  且  $T_3 - T_4 > 20\text{K}$ , 同时  $\rho_1 < 0.3$  这些条件, 那么这个像元就是潜在火点.

### 2.3 绝对火点判定

选用明火面积较大的火点像元对绝对火点阈值进行模拟. 选取面积为  $90\text{m}^2$  温度为 1000K 的明火, 在观测几何  $(\theta_s, \theta_v)$  下, 分别计算其与多种背景地物(常绿阔叶林, 常绿针叶林, 热带草原和农田)组成的火点像元的亮温, 然后取亮温平均值为观测几何  $(\theta_s, \theta_v)$  下的绝对火点阈值  $T_{3,abs}(\theta_s, \theta_v)$ , 具体阈值见表 2.

表 2 基于观测几何的绝对火点识别阈值 ( $T_{3,abs}$ ) 表  
Table 2 Absolute fire detection thresholds ( $T_{3,abs}$ ) based on observation geometry

| 观测天顶角 $\theta_v$ (°) | 第三通道亮温 (K) |     |     |     | 太阳天顶角 $\theta_s$ (°) |    |    |    |
|----------------------|------------|-----|-----|-----|----------------------|----|----|----|
|                      | 0          | 20  | 40  | 60  | 0                    | 20 | 40 | 60 |
| 0                    | 377        | 376 | 376 | 376 |                      |    |    |    |
| 10                   | 375        | 375 | 375 | 375 |                      |    |    |    |
| 20                   | 372        | 372 | 372 | 371 |                      |    |    |    |
| 30                   | 366        | 366 | 366 | 365 |                      |    |    |    |

凡是在观测几何 ( $\theta_s, \theta_v$ ) 下, 如果像元满足  $T_3(\theta_s, \theta_v) > T_{3,abs}(\theta_s, \theta_v)$ , 那么这个像元就是真实火点像元。

#### 2.4 真实火点确认

以潜在火点为中心, 建立大小为  $N \times N$  像元的背景窗口, 从中选取无云陆地非背景火点像元作为背景像元。背景火点像元的定义是白天  $T_3 > 330K$  且  $T_3 - T_4 > 25K$  的像元。设有效背景像元数目为  $N_v$ , 窗口大小从  $10 \times 10$  逐渐增大到  $20 \times 20$ , 当满足  $N_v > 0.25N^2$  时停止增大窗口, 统计窗口内背景像元特性。设  $T_{3PF}$  是潜在火点的像元第三通道亮温,  $T_{34PF}$  是潜在火点的像元第三通道与第四通道亮温差,  $T_{3b}$  = 背景像元  $T_3$  平均值,  $\sigma_{3b}$  = 背景像元  $T_3$  平均绝对偏差,  $T_{34b}$  = 背景像元的  $T_3 - T_4$  平均值,  $\sigma_{34b}$  = 背景像元的 ( $T_3 - T_4$ ) 的平均绝对偏差,  $\delta'_3$  为背景火点像元的亮温平均绝对偏差。凡是不满足 ( $T_{3PF} > T_{3b} + 3\sigma_{34b}$ ) 且 ( $T_{34PF} > T_{34b} + 3.5\sigma_{34b}$ ) 且 ( $T_{34PF} > T_{34b} + 10K$ ) 且 [ $(T_{4PF} > T_{4b} + \sigma_{4b} + 1.1K)$  或 ( $\delta'_3 > 5K$ )] 等条件的潜在火点像元便是虚假火点。

#### 2.5 虚假火点去除

排除耀斑、水陆边缘和沙漠边缘等造成的虚假火点仍采用 V4 算法中的方法<sup>[1]</sup>, 这里不作详细介绍。

### 3 结果与验证

#### 3.1 基于烟羽掩膜的算法验证

Wang 使用烟羽监测美国东南部火点取得了较好结果<sup>[5]</sup>, 因为 HJ-1B-CCD 相机空间分辨率为 30m, 在可见光区域可以良好地识别烟羽, 而且 CCD 相机和红外相机的影像重合区域较大, 所以可使用同时像同区域的 CCD 影像, 通过目视识别的方法建立烟羽掩膜, 并使用基于烟羽掩膜的火点识别方法建立相对真实的火点数据集, 对红外相机火点监测结果进行验证。如图 2 所示, 华北地区由于焚烧秸秆, 产生了大量的烟羽。

将真实火点像元数目记为  $M_r$ , 基于红外相机探测到的真实火点像元数目记为  $M_{rf}$ , 虚假火点像元数

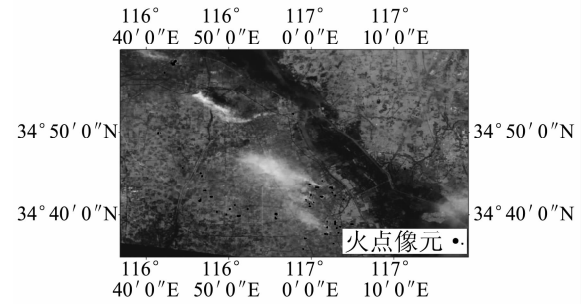


图 2 2009 年 6 月 15 日环境卫星红外相机火点监测结果, 红色火点标注在 CCD 相机真彩图上

Fig. 2 Fire events detected by the HJ-1B-IRS algorithm on June 15, 2009 (Fire spots were marked in red with the background of HJ-1B-CCD true color images)

目记为  $M_{wf}$ , 那么火点像元正确识别率为  $\frac{M_{rf}}{M_f}$ , 火点像

元错误判断率为  $\frac{M_{wf}}{M_{rf} + M_{wf}}$ . 选取 2009 年 6 景环境卫星红外数据与对应的 CCD 数据, 使用基于烟羽掩膜的火点识别方法建立真实火点像元库, 然后对基于红外相机的火点监测结果进行验证, 结果如表 3 所示。

表 3 环境卫星红外相机火点判别结果统计

Table 3 The statistics of fire spots identification results for HJ-1B-IRS fire detection algorithm

| 日期    | 地区  | 太阳天顶角 $\theta_s$ (°) | $M_r$ | $M_f$ | $M_{rf}$ | $M_{wf}$ | $\frac{M_{rf}}{M_f}$ | $\frac{M_{wf}}{M_{rf} + M_{wf}}$ |
|-------|-----|----------------------|-------|-------|----------|----------|----------------------|----------------------------------|
|       |     |                      |       |       |          |          |                      |                                  |
| 04-25 | 黑龙江 | 35.91                | 154   | 154   | 119      | 18       | 77.27%               | 13.14%                           |
| 06-15 | 山东  | 19.40                | 360   | 360   | 262      | 42       | 72.78%               | 13.82%                           |
| 10-06 | 湖北  | 40.70                | 61    | 61    | 45       | 8        | 73.77%               | 15.09%                           |
| 10-29 | 广东  | 40.86                | 54    | 54    | 48       | 4        | 88.89%               | 7.69%                            |
| 10-30 | 广东  | 41.49                | 68    | 68    | 59       | 5        | 86.76%               | 7.81%                            |
| 12-19 | 广东  | 50.13                | 58    | 58    | 50       | 3        | 86.21%               | 5.66%                            |

#### 3.2 与 MODIS 火点产品对比

选取 2009 年 10 月 29 日广东地区环境卫星红外数据火点产品与 MODIS 火点产品 MOD14 进行对比, 我们发现环境卫星火点与 MODIS 火点在空间分布方面较为吻合, 环境卫星可监测到 MODIS 探测到的火点, 并且环境卫星监测到了一些 MODIS 未识别的火点, 如图 3(b)、(d)、(e)、(f), 同时在图中也可看出环境卫星火点产品与真实火情更近, 如图 3(a)、(c)、(g), 这也说明了环境卫星红外相机在火点定位方面优于 MODIS。

采用 Schroeder 的方法<sup>[7]</sup>, 统计每个 MODIS 像元中的环境卫星火点像元个数, 以此来比较两种火点产品。选取 18 景环境卫星红外数据制成 300m 分辨率的火点产品与对应的 1km 分辨率的 MODIS 火

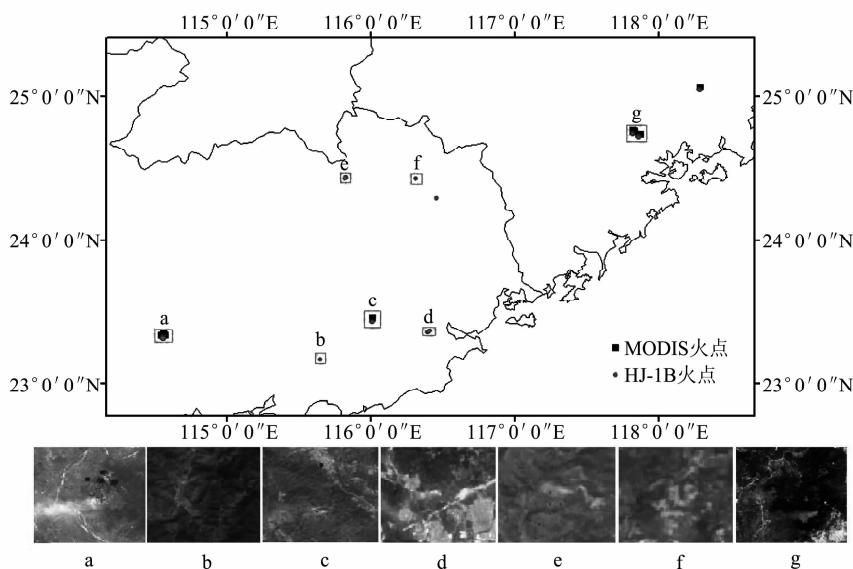


图3 2009年10月29日环境卫星红外相机火点产品与MODIS火点产品对比

Fig. 3 Comparison between fire spots detected by the HJ-1B-IRS algorithm and MODIS fire products on October 29<sup>th</sup>, 2009

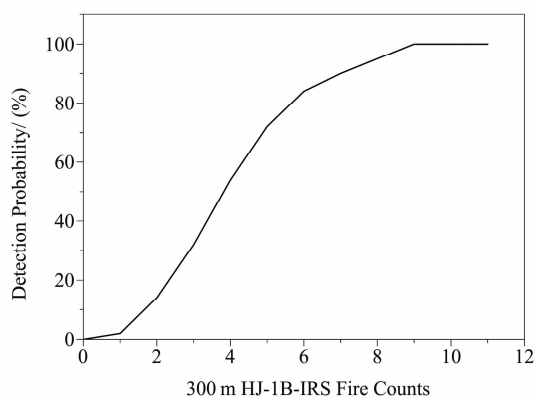


图4 基于环境卫星红外相机火点监测结果的MODIS火点监测概率曲线

Fig. 4 Fire detection probability curve for MODIS fire detection products based on HJ-1B-IRS fire detection products

点产品 MOD14 进行对比,结果如图4所示。

随着 MODIS 像元中环境卫星火点像元个数的上升,MODIS 监测到火点的概率也逐渐上升,当环境卫星火点像元个数在2个以下时,MODIS 监测火点的概率低于20%,而当环境卫星火点像元个数在7个以上时,MODIS 监测火点的概率高于90%,这说明环境卫星在监测小面积火情方面更具优势。

#### 4 结论

通过数值模拟方法分析了不同地物背景下火点混合像元的亮温在不同观测几何下的变化情况,根据模拟结果提出了基于观测几何的潜在火点阈值和绝对火点阈值,在 MODIS V4 算法的基础上建立了基

于观测几何的火点监测算法。使用 CCD 数据建立基于烟羽掩膜的数据集对算法进行了验证,与 MODIS 火点产品相比,环境卫星在两者图像重合区域几乎可监测到 MODIS 监测的所有火点,并且在火点定位以及小面积火点识别方面,环境卫星具有优势。虽然算法目前根据模拟结果确定了潜在火点阈值和绝对火点阈值,但是还应根据真实火点数据对其进行修正。使用基于烟羽掩膜的火点监测算法建立的真实火点数据集只是相对真实,还应根据实地验证数据来验证火点监测结果。

**致谢** 本文得到了国家环保部卫星环境应用中心厉青博士、王中挺博士等人的支持,感谢张丽娟、丁敬雷在数据下载方面提供了有益的帮助。

#### REFERENCES

- [1] Giglio L, Descloitres J, Justice C O, *et al.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **87**(2-3): 273—282.
- [2] Giglio L, Kendall J D, Justice C O, *et al.* Evaluation of global fire detection algorithms using simulated AVHRR infrared data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**(10): 1947—1985.
- [3] Giglio L, Csizsar I, Restas A, *et al.* Active fire detection and characterization with the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(6): 3055—3063.
- [4] Kaufman Y J, Justice C O, Giglio L, *et al.* Potential global fire monitoring from EOS-MODIS[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D24): 215—238.

(下转 114 页)

- 147—154.
- [2] QU Yong-Hua, DUAN Xiao-Liang, GAO Hong-Yong, *et al.* Quantitative retrieval of soil salinity using hyperspectral data in the region of Inner Mongolia Hetao irrigation district [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (屈永华, 段小亮, 高鸿永, 等. 内蒙古河套灌区土壤盐分光谱定量分析研究. *光谱学与光谱分析*), 2009, **29**(5): 1362—1366.
- [3] Chang C W, Laird D A. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N [J]. *Soil Science*, 2002, **167**(2): 110—116.
- [4] WU Yun-Zhao. Heavy metal pollution in suburban soils of the Nanjing area—a feasibility study of remote sensing geochemistry [D]. *Doctoral Thesis of Nanjing University* (吴昀昭. 南京城郊农业土壤重金属污染的遥感地球化学基础研究. *南京大学博士学位论文*), 2005.
- [5] WANG Lu, LIN Qi-Zhong, JIA Dong, *et al.* Study on the prediction of soil heavy metal elements content based on reflectance spectra [J]. *Journal of Remote Sensing* (王璐, 蔺启忠, 贾东, 等. 基于反射光谱预测土壤重金属元素含量的研究. *遥感学报*), 2007, **11**(6): 906—913.
- [6] Moron A, Cozzolino D. Exploring the use of near infrared reflectance spectroscopy to study physical properties and microelements in soils [J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2003, **11**(2): 145—154.
- [7] Siebielec G, McCarty G, Stuczynski T I, *et al.* Near-and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for measuring soil metal content [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, **33**(6): 2056—2069.
- [8] XIE Xian-Li, SUN Bo, HAO Hong-Tao. Relationship between visible-near infrared reflectance spectroscopy and heavy metal of soil concentration [J]. *Acta Pedologica Sinica* (解宪丽, 孙波, 郝红涛. 土壤可见光—近红外反射光谱与重金属含量之间的相关性. *土壤学报*), 2007, **44**(6): 982—993.
- [9] XU Bin-Bin. Study on reflectance spectra of soil profiles [J]. *Soils* (徐彬彬. 土壤剖面的反射光谱研究. *土壤*), 2000, **32**(6): 281—287.
- [10] ZHOU Ping. Quantitative retrieve of soil constituents using hyper spectrum [D]. *Doctoral Thesis of China University of Geosciences: Beijing* (周萍. 高光谱土壤信息的量化反演. *中国地质大学(北京)博士学位论文*), 2006.
- [11] Hummel J W, Sudduth K A. Soil moisture and matter prediction of surface and subsurface soil using and NIR soil [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, **32**(2): 149—165.
- [12] TIAN Qing-Jiu. Hyperspectral remote sensing archaeology on Xixi shell Mound site in Jiangsu [J]. *Remote Sensing Application* (田庆久. 江苏西溪贝丘遗址的高光谱遥感考古研究. *遥感应用*), 2007, (1): 22—25.
- [13] XIU Lian-Cun, ZHENG Zhi-Zhong, YU Zheng-Kui, *et al.* Mineral analysis technology application with near infrared spectroscopy in identifying alteration minerals [J]. *Acta Geologica Sinica* (修连存, 郑志忠, 俞正奎, 等. 近红外光谱分析技术在蚀变矿物鉴定中的应用. *地质学报*), 2007, **81**(11): 1584—1590.

(上接 108 页)

- [5] Wang W T, Qu J J, Hao X J, *et al.* An improved algorithm for small and cool fire detection using MODIS data: A preliminary study in the southeastern United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **108**(2): 163—170.
- [6] Qian Y G, Yan G J, Duan S B, *et al.* A contextual fire detection algorithm for simulated HJ-1B imagery [J]. *Sensors*, 2009, **9**(2): 961—979.
- [7] Schroeder W, Prins E, Giglio L, *et al.* Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(5): 2711—2726.