

## 热红外遥感中大气透过率的研究(二):大气透过率模式的应用

龚绍琦<sup>1,2</sup>, 孙海波<sup>1</sup>, 王少峰<sup>3</sup>, 国文哲<sup>1</sup>, 李云梅<sup>2</sup>

- (1. 南京信息工程大学 遥感学院, 江苏 南京 210044;
2. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046;
3. 中国人民解放军 73608 部队, 江苏 南京 210028)

**摘要:** 大气透过率是热红外遥感中的一个重要参数。针对前文构建的大气透过率模式, 以我国环境灾害卫星 HJ-1B 红外相机 IRS 第 4 通道的大气透过率模式为例, 利用辐射传输模型 MODTRAN 模拟水体辐亮度, 对模式中的变量引入不同的误差, 将模拟的辐亮度反演水温, 分析不同气溶胶模型、水汽量、能见度和观测天顶角对反演水温的敏感性。并将该大气透过率模式用于 HJ-1B/IRS 热红外图像中, 反演了 2009 年 4 月 17 日、21 日、22 日和 25 日太湖水温。研究结果表明: 同一波段、不同气溶胶模型的大气透过率模式在反演温度时会产生不同的误差, 以气溶胶模型为平流雾的最大、对流型的最小; 大气透过率模式中 3 个变量的误差与温度反演的误差呈线性关系, 即变量的误差越大, 温度反演的误差也越大; 以水汽量对温度反演最敏感, 观测天顶角其次, 能见度最弱。该大气透过率模式用于 4 天遥感图像反演中, 除 4 月 17 日反演的误差稍高, 均方根误差和平均相对误差分别为 1.127 °C 和 5.75%, 其他 3 天的均方根误差都小于 1 °C、平均相对误差在 5% 以下, 说明所建的大气透过率模式在热红外遥感中具有较高的应用精度。

**关键词:** 热红外遥感; 大气透过率模式; HJ-1B/IRS; 温度; 误差

**中图分类号:** P237; TP79   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2013-06

## Study on atmospheric transmittance of thermal infrared remote sensing(II): application of atmospheric transmittance model

Gong Shaoqi<sup>1,2</sup>, Sun Haibo<sup>1</sup>, Wang Shaofeng<sup>3</sup>, Guo Wenzhe<sup>1</sup>, Li Yunmei<sup>2</sup>

- (1. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. Key Lab of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;
3. No. 73608 of the Chinese People's Liberation Army, Nanjing 210028, China)

**Abstract:** Atmospheric transmittance is an important parameter in the thermal infrared remote sensing. For the atmospheric transmittance models in the previous paper, taking the transmittance model of the infrared camera(IRS) onboard chinese environment and disaster monitoring satellite(HJ-1B)as an example, the radiance at top atmosphere over waters was simulated, a series of error were brought to the variables in the atmospheric transmittance model, and the temperature from the simulated radiance was retrieved. Given

收稿日期: 2014-11-10; 修订日期: 2014-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(40801145); 江苏高校优势学科建设工程; 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室开放基金; 2012 年度国家级大学生实践创新训练计划项目 (201210300008); 2013 年度江苏省大学生实践创新训练计划项目 (201310300063Y)

作者简介: 龚绍琦(1979-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事资源与环境遥感方面的研究工作。Email: shaoqigong@163.com

that, the sensitivity of aerosol model, water vapor, visibility and view zenith affecting on retrieved temperature was analyzed. The atmospheric transmittance model was applied to 4 HJ/IRS thermal infrared images and the water surface temperature on April 17, 21, 22 and 25, 2009 was retrieved in lake Taihu, China. The results show that the atmospheric transmittance model within different aerosol models for any channel produce various errors during the temperature retrieving from the remote sensed radiance, that the error is the largest for the advective fog model and is the lowest for the tropospheric model, that the retrieved error of temperature displays the linear trend with the error of variables in the atmospheric transmittance models, the water vapor is the most susceptible for the temperature retrieving, the second for the view zenith and the third for visibility. When the atmospheric transmittance model is applied to HJ/IRS thermal infrared images for retrieving the water surface temperature, the error on April 17 is a little high which the root mean square error (RMSE) and the mean relative error (MRE) are  $1.127^{\circ}\text{C}$  and  $5.75\%$  respectively, while the RMSE on other 3 days is below  $1^{\circ}\text{C}$  and their MRE is less than  $5\%$ . This illustrates that the atmospheric transmittance model have the perfect application accuracy in the thermal infrared remote sensing.

**Key words:** thermal infrared remote sensing; atmospheric transmittance model; HJ-1B/IRS; temperature; error

## 0 引言

任何温度超过绝对零度的物体都会发射红外能量,热红外遥感是利用遥感器接收地表物体在大气窗口  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  波段范围的红外辐射信息进行地表特征的探测<sup>[1]</sup>。热红外遥感技术在地表温度、地表能量平衡、城市热岛效应、森林火灾、旱灾、矿藏、地热等方面都有很广泛的应用<sup>[1]</sup>。

根据热辐射传输方程,卫星传感器接收到的热辐射亮度由 3 部分组成:地表发射的热辐射亮度、大气下行和大气上行发射的辐亮度。其中前两者都要穿过大气层后才被卫星传感器所接收,辐射亮度会发生衰减,大气透过率是反映红外辐射衰减的一个物理量,同时也是卫星热红外遥感反演地表温度的一个重要参数。当物体的红外辐射在大气中传输时,一方面会受到大气分子,如水汽、二氧化碳、臭氧、甲烷、氧化氮等气体的吸收<sup>[2]</sup>,另外还受大气分子以及液态和固态的分散颗粒物,如云、雾、烟等气溶胶物质的散射,造成物体红外辐射在大气中的衰减<sup>[3]</sup>。在卫星热红外遥感中,大气透过率是影响遥感精度的关键参数,前文通过辐射传输模型 MODTRAN 模拟,构建了基于大气模型、气溶胶模型、水汽量、能见度和观测天顶角的 5 个因素的大气透过率查找表,分析了不同参数对热红外大气透过率光谱曲线

的影响,确定了影响大气透过率的关键因子,并针对不同类型的气溶胶模型构建了基于水汽量、能见度和观测天顶角的常用卫星传感器热红外通道的大气透过率经验模式<sup>[4]</sup>。该研究将对所建常用卫星传感器热红外通道的大气透过率经验回归模型进行敏感性分析,并以我国环境卫星 HJ-1B/IRS 热红外数据为例,将所建的大气透过率模型应用到单窗算法中,以反演的太湖水温结果来验证大气透过率模型的应用精度。

## 1 数据处理与方法

### 1.1 大气透过率模式对反演温度的敏感性分析方法

大气透过率是卫星热红外数据反演地表温度的关键参数之一,为了进一步评价前文所建的大气透过率模式对反演地表温度的影响,将对大气透过率模式进行敏感性分析。敏感性分析通常是先假定某参数有一微小误差,其他参数不变或在指定的范围内变化,分析不同情况下由这一误差带来的最终结果的变化<sup>[5]</sup>。通过下式可分析参数误差引起反演地表温度的误差<sup>[6]</sup>:

$$\Delta T_s = |T_s(x + \Delta x) - T_s(x)|$$

式中: $x$  为进行敏感性分析的参数; $\Delta x$  为该参数  $x$  的误差; $T_s(x + \Delta x)$  和  $T_s(x)$  分别为输入参数  $x$  含有  $\Delta x$  误差和没有误差下反演得到的地表温度, $\Delta T_s$  为输入参

数  $x$  含有  $\Delta x$  误差时反演地表温度产生的误差。

为了对大气透过率模式中的参数进行敏感性分析,这里仅以前文所建的中国环境灾害卫星 HJ-1B 红外相机 (IRS) 第 4 通道的大气透过率模式为例展开说明。参考前人的做法<sup>[5-8]</sup>,利用辐射传输模型 MODTRAN4.0 模拟水体上空 HJ-1B 卫星 IRS 传感器热红外通道接收到的入瞳辐亮度,模拟时的输入参数为:大气模型为中纬夏季、气溶胶模型为大气透过率模式的 6 种类型、水面温度为 300 K、水的发射率为 0.99、水汽量为  $2.5 \text{ g/cm}^2$ 、能见度为 25 km、以及观测天顶角为  $45^\circ$ 。由于大气透过率模式中的参数为大气水汽量、能见度和观测天顶角,水汽量的误差以 0.05 为间隔、 $\pm 0.5 \text{ g/cm}^2$  之间的范围变动;能见度的误差以 0.5 为间隔、 $\pm 5 \text{ km}$  之间的范围变动;观测天顶角的误差以 0.5 为间隔、 $\pm 5^\circ$  之间的范围变动。因此,将带有误差  $\Delta x$  的参数  $x$  带入大气透过率模式中计算出 IRS 第 4 通道的透过率,根据单窗算法<sup>[9]</sup>,由模拟的辐亮度反演出水温  $T_s(x+\Delta x)$ ,并和输入的水温  $T_s(x)$  进行对比,计算反演的水温误差  $\Delta T_s$ 。反演所需要的大气平均作用温度由 MODTRAN 模拟时的温湿廓线根据参考文献[10]计算得到,为 286.9 K。

## 1.2 热红外遥感在太湖水温反演中的方法

在对大气透过率模式敏感性分析的基础上,将验证大气透过率模式在热红外遥感中的应用精度。这里仍以中国环境灾害卫星 HJ-1B 的红外相机 (IRS) 第 4 通道热红外数据为例,根据单窗算法<sup>[9]</sup>反演太湖的水温。IRS 有 2 个近红外 ( $0.75\text{--}1.10 \mu\text{m}$  和  $1.55\text{--}1.75 \mu\text{m}$ )、1 个中红外 ( $3.50\text{--}3.90 \mu\text{m}$ ) 和 1 个热红外 ( $10.5\text{--}12.5 \mu\text{m}$ ),共 4 通道,影像的幅宽为 720 km,前 3 个通道的空间分辨率为 150 m,热红外通道为 300 m。文中所用到的太湖地区 IRS 遥感影像日期为 2009 年 4 月 17 日、21 日、22 日和 25 日,影像质量好、无云彩,数据为 LEVEL 2 级产品,下载于中国资源卫星应用中心。卫星过境前后用水温表测量太湖水面温度,精度为  $0.2^\circ\text{C}$ 。

### 1.2.1 遥感影像的预处理

#### (1) 遥感影像的辐射校正

由于从中国资源卫星中心下载的 HJ-1B/IRS 卫星影像是原始的信号值,需通过辐射校正转化为图像辐亮度。根据数据头文件提供的辐射校正公式,对

HJ-1B/IRS 第 4 波段进行辐射校正。

$$L = \frac{DN - b}{g} \quad (1)$$

式中:  $g = 59.421 \text{ DN}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$ ,  $b = -25.441$ 。利用遥感图像处理软件 ENVI 进行辐射校正,从而计算出辐亮度值  $L$ 。

#### (2) 遥感影像亮温计算

根据普朗克定律计算亮度温度  $T_B$ :

$$T_B = \frac{C_2}{\lambda \ln(1 + \frac{C_1}{\lambda^5 L})} \quad (2)$$

式中:  $C_1 = 2\pi hc^2 = 1.191\,043\,56 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4 \text{m}^{-2} \text{sr}$ ,  $C_2 = hc/k = 1.438\,768\,5 \times 10^4 \mu\text{mK}$ ;  $h$  为普朗克常数,取  $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ,  $c$  为真空中的光速,取  $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $k$  为玻耳兹曼常数,取  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $\lambda$  为 HJ-1B/IRS 第 4 波段的中心波长  $\lambda = 11.576 \mu\text{m}$ ;  $L$  为辐亮度值,经由该公式计算后便可得到图像的亮温值。

### 1.2.2 温度遥感的单窗算法

单窗算法 (Mono-window Algorithm) 是覃志豪等<sup>[9]</sup>根据地表热辐射传导方程,推导出的一个利用 Landsat TM 第 6 波段数据反演地表温度的算法,该算法普遍适用于单个热红外波段的遥感影像,其计算公式如下:

$$T_s = \{a(1-C-D) + [b(1-C-D) + C + D]T_0 - DT_a\} / C \quad (3)$$

式中:  $T_s$  为反演的地表温度;  $T_0$  为大气顶层由卫星传感器获得的亮度温度;  $a$  和  $b$  是单窗算法中定义的温度参数  $L = B(T) / [B(T) / \partial T]$  与温度  $T$  之间的线性回归系数,在  $-5\text{--}45^\circ\text{C}$  时,  $a = -62.360$ ,  $b = 0.4395$ ,回归决定系数  $R^2 = 0.999$ ,均方根误差  $\text{RMSE} = 0.1206$ ;  $C = \varepsilon\tau$ ;  $D = (1-\tau)[1 + (1-\varepsilon)\tau]$ ,  $\varepsilon$  为地表发射率;大气透过率  $\tau$  将使用前文构建的大气透过率模型计算<sup>[4]</sup>;  $T_a$  是大气平均作用温度, K,可利用近地层气温  $T_0$  根据经验模型  $T_a = 44.97098 + 0.80512T_0$  计算得到<sup>[10]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 大气透过率模式对反演温度的敏感性分析

利用 MODTRAN 模拟的辐亮度反演地面的水温,分析同一波段、不同气溶胶模型下,大气透过率模式中变量引入不同程度的误差后对反演水温的影响,图 1 为带有不同误差的水汽量、能见度和观测天顶角对反演水温时产生的误差情况。从图上可见,不

同气溶胶模型的大气透过率模式在反演水温时会产生不同的误差,以气溶胶模型为平流雾的误差最大、对流型的最小,误差由大到小依次为:平流雾、辐射雾、海洋型、城市型、乡村型、对流型。大气透过率模式中 3 个变量的误差与水温反演的误差呈线性关系,即变量的误差越大,导致水温反演的误差也越大。对于大气透过率模式中的单个变量,水汽量误差在 $\pm 0.15 \text{ g/cm}^2$ 时,水温反演的误差为 0.5 K 左右;误差在 $\pm 0.30 \text{ g/cm}^2$ 时,水温反演的误差约为 1.0 K;误差达到 $\pm 0.5 \text{ g/cm}^2$ 时,水温反演的误差 1.5~2.0 K 左右,而气溶胶为平流雾的大气透过率模式的误差要更高。能见度误差导致水温反演的误差相对较小,误差在 $\pm 0.5 \text{ km}$ 时,除了气溶胶为平流雾的误差为 2.48 K 和 3.46 K、辐射雾的为 1.06 K 和 1.38 K 外,其余模式的误差均在 0.6 K 以下。观测天顶角误差对水温反演的误差也较小,误差在 $\pm 0.5^\circ$ 时,除了气溶胶为平流雾的误差为 1.51 K 和 1.03 K、辐射雾误差的为 0.84 K 和 0.55 K 外,其余模式的误差均在 0.65 K 以

下。总体而言,在大气透过率模式的 3 个变量中,以水汽量对反演水温最为敏感,观测天顶角其次,能见度最弱,这也就是在诸多地温反演算法中,大气透过率的确定仅考虑水汽量的原因。

## 2.2 大气透过率模型在太湖水温遥感中的应用

为了进一步验证前文所建的大气透过率模式在卫星遥感中的应用精度,这里将以中国环境减灾卫星 HJ-1B/IRS 遥感图像为例,并以太湖为研究区,采用单窗算法反演太湖水温。太湖是中国第三大内陆浅水湖泊,水域面积为  $2338.1 \text{ km}^2$ ,平均深度 2 m,受水体富营养化的影响,水温往往是太湖蓝藻水华的关键因子。由于 HJ-1B/IRS 资料在时间和空间分辨率上很好地满足内陆水体遥感的需要,因此此研究具有一定的实际应用价值。

在单窗算法反演太湖水温的过程中,有 3 个关键参数:水的发射率、大气透过率和大气平均作用温度。由于水体接近黑体,其发射率比较稳定,通过查 ASTER 光谱库(<http://speclib.jpl.nasa.gov/>)得到 HJ/IRS 第 4 通道中心波长处的发射率为 0.989 4;而大气平均温度  $T_a$  可由近地层气温  $T_0$  根据经验模型  $T_a = 44.97098 + 0.80512T_0^{[10]}$  计算得到;根据太湖所处的地理位置和气溶胶特性,选择气溶胶模型为城市型的 HJ-1B/IRS 大气透过率模式来计算卫星过境时的大气透过率。卫星过境太湖时的大气参数见表 1,表中的能见度和气温是由位于太湖的气象站——东山站(58358)当天 8 点和 14 点的观测值插值得到,数据来自中国气象科学数据共享服务网;水汽量资料是位于太湖北部的太阳光度计 940 nm 水汽通道测得,从全球气溶胶 AERONET 网站下载得到。由此可计算出 HJ/IRS 过境太湖时的大气平均作用温度  $T_a$  和大气透过率  $\tau$ ,并进一步根据单窗算法反演出太湖的水温(图 2)。从图上可见,4 月 22 日的水温最高,统计的平均值为  $21.92^\circ\text{C}$ ,标准差也最大,为  $1.277^\circ\text{C}$ ,说明卫星过境时整个太湖水温的空间差异较大;4 月 21 日其次,平均值和标准差分别为  $21.92^\circ\text{C}$  和  $1.178^\circ\text{C}$ ;4 月 17 日再次,均值和标准差依次为  $19.69^\circ\text{C}$  和  $0.770^\circ\text{C}$ ;4 月 25 日的水温最低,平均值和标准差分别为  $18.57^\circ\text{C}$  和  $0.692^\circ\text{C}$ 。

利用卫星过境前后太湖实测的水温数据来验证 HJ/IRS 热红外图像反演的结果,并用偏差 Bias、均方

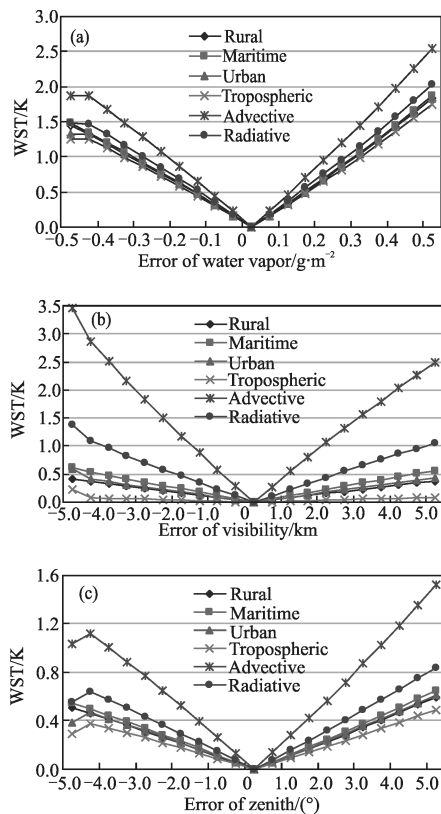


图 1 不同大气透过率模式变量误差引起的水温反演误差

Fig.1 Retrieval errors of water surface temperature caused by that of variables in the atmospheric transmittance model



根误差 RMSE 和平均相对误差 MRE 来评价遥感反演的精度(表 2),实测点的位置如图 2 所示(a~d 分别为 2009 年 4 月 17 日、21 日、22 日和 25 日)。从表 2 可见,2009 年 4 月 17 日有两个验证点的偏差在 1.6 °C 左右、4 月 22 日有 1 个验证点的偏差在 1.4 °C,其他

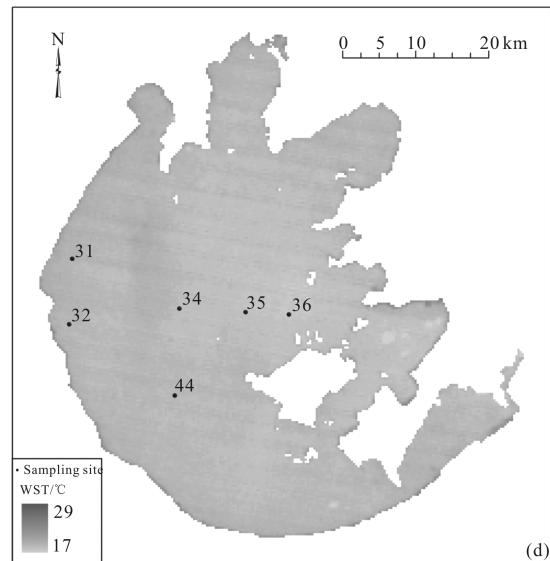
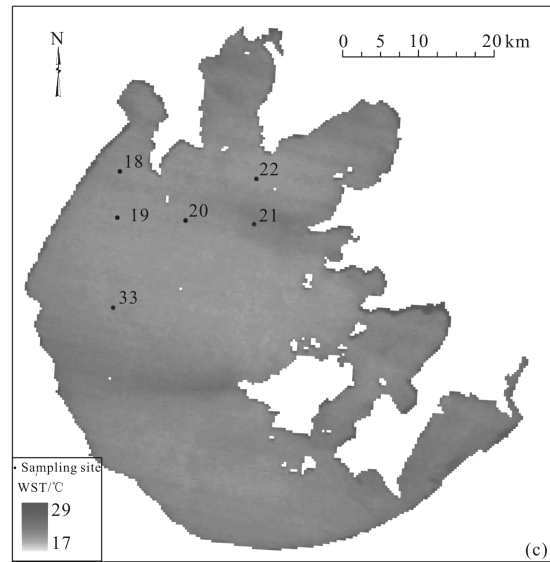
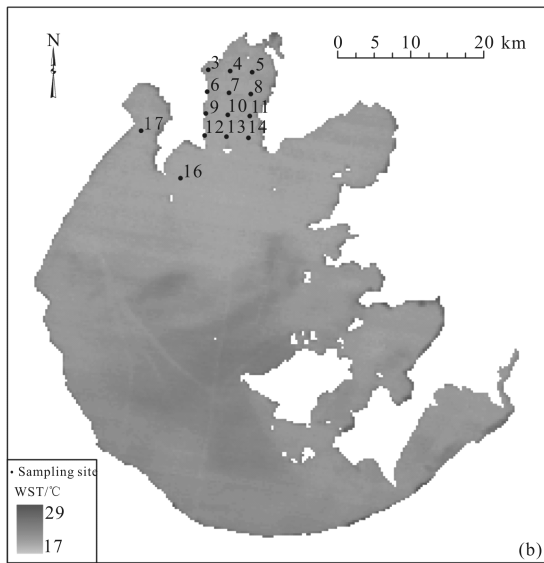
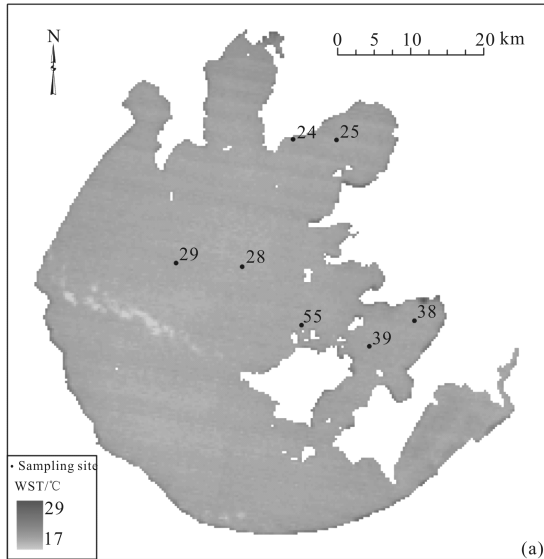


图 2 HJ-1B/IRS 反演太湖水温分布图

Fig.2 Retrieved water surface temperature from HJ-1B/IRS images in lake Taihu

日期的所有验证点中偏差均在 1.25 °C 以下;对于均方根误差和平均相对误差,以 4 月 17 日图像最高,分别为 1.127 °C 和 5.75%,其他日期的均方根误差都

表 1 HJ/IRS 过境太湖时的大气参数

Tab.1 Atmospheric parameters of HJ/IRS passing through lake Taihu

Date	Time /GMT	Visibility /km	Air temperature /°C	Water vapor /cm	Zenith angle /(°)	Effective mean atmospheric temperature/K	Atmospheric transmittance
Apr.17	2:35	14.0	16.5	1.650	27.764	278.174	0.689
Apr.21	2:38	14.5	21.3	1.190	20.027	282.039	0.775
Apr.22	3:03	10.5	21.0	1.774	23.703	281.797	0.670
Apr.25	2:41	14.5	17.0	1.456	18.350	278.577	0.744

表2 太湖水温遥感反演结果与实测值对比

Tab.2 Comparison between retrieval water surface temperature and measured one in lake Taihu

Date	NO.	Measured value/°C	Retrieved value/°C	Bias/°C	Date	NO.	Measured value/°C	Retrieved value/°C	Bias/°C	
April 17	24	17.8	19.42	-1.62	April 21	3	20.4	21.44	-1.04	
	25	17.7	19.31	-1.61		4	20.2	20.36	-0.16	
	28	18.3	19.31	-1.01		5	20.4	20.17	0.23	
	29	18.5	19.51	-1.01		6	20.1	20.72	-0.62	
	38	19.0	19.94	-0.94		8	21.4	20.36	1.04	
	39	19.0	19.73	-0.73		9	20.4	19.81	0.59	
	55	19.1	19.52	-0.42		10	20.3	20.60	-0.30	
April 22	18	21.4	21.29	0.11		11	20.7	19.99	0.71	
	19	19.8	20.86	-1.06		12	19.1	20.17	-1.07	
	20	20.1	21.50	-1.40		13	19.4	20.54	-1.14	
	21	21.9	22.34	-0.44		14	20.4	19.44	0.96	
	22	22.1	20.86	1.24		15	18.9	19.99	-1.09	
	33	22.1	21.29	0.81		16	18.6	19.81	-1.21	
	31	19.3	19.14	0.16						
April 25	32	18.2	18.95	-0.75		Date	Mean	S.D.	RMSE	MRE
	34	19.3	18.17	1.13		Apr.17	19.69	0.770	1.127	5.75%
	35	19.2	17.98	1.22	Apr.21	21.37	1.277	0.859	3.94%	
	36	19.4	18.39	1.01	Apr.22	21.92	1.178	0.956	4.02%	
	44	19.1	18.75	0.35	Apr.25	18.57	0.692	0.865	4.03%	

小于 1 °C、平均相对误差在 5% 以下,说明文中构建的大气透过率模型应用于热红外遥感是可行的,进行遥感反演能取得较好的精度。为了阐明此研究遥感反演的精度,可与国内其他学者利用 HJ-1B/IRS 热红外图像反演温度的结果进行对比。黄妙芬等利用 10 景 HJ-1B/IRS 热红外图像,根据单窗算法反演了辽东湾的水温,与 EOS/MODIS 温度产品的绝对平均误差为 7.84 °C<sup>[11]</sup>;孙俊等利用 HJ-1B/IRS 热红外图像反演了太湖流域的地表温度,与 MODIS 温度产品相比的误差为 1.23 K<sup>[12]</sup>;余晓磊和巫兆聪利用环境一号卫星热红外影像反演了渤海海表温度,与 MODIS 温度产品相比的相对误差在 5% 左右<sup>[13]</sup>;赵少华等利用 HJ-1B/IRS 热红外由单窗算法反演了宁夏的地表温度,比同步的 MODIS 温度产品的精度差小 1 K<sup>[14]</sup>。以上学者将 HJ-1B/IRS 反演温度的结果均与 MODIS 温度产品进行对比分析,由于 MODIS 温度产品本身具有一定的误差,即在晴空条件下 MODIS 地温产品的精度为 1 K,在平静的湖面和干燥天气情况下获取的精度可达到 0.5 K<sup>[15]</sup>。因此,以上学者利用 HJ-1B/IRS 热红外图像反演温度的绝对

精度比实际还要低。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

(1)通过大气透过率模式对反演温度的敏感性分析表明:同一波段、不同气溶胶模型的大气透过率模式在反演温度时会产生不同的误差,误差由大到小依次为:平流雾、辐射雾、海洋型、城市型、乡村型、对流型。大气透过率模式中 3 个变量的误差与温度反演的误差呈线性关系,即变量的误差越大,导致温度反演的误差也越大。水汽量误差在  $\pm 0.15 \text{ g/cm}^2$ 、 $\pm 0.30 \text{ g/cm}^2$  和  $\pm 0.5 \text{ g/cm}^2$  时,水温反演的误差分别为 0.5 K、1.0 K 和 1.5-2.0 K 左右;能见度和观测天顶角的误差在  $\pm 5 \text{ km}$  和  $\pm 5^\circ$  范围变动时,水温反演的误差除了以平流雾和辐射雾的模式稍高外,其他误差均在 0.60 K 和 0.65 K 以下;以水汽量对温度反演最敏感,观测天顶角其次,能见度最弱。

(2)将所建的大气透过率模型应用于环境减灾卫星 HJ-1B 红外相机 IRS 热红外数据的太湖水温遥感中,反演了 2009 年 4 月 17 日、21 日、22 日和 25 日的

太湖水温,并用同步实测的水温进行验证。结果表明大部分验证点的水温偏差均在 $1.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下;对于均方根误差和平均相对误差,以4月17日反演的误差最高,分别为 $1.127\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $5.75\%$ ,其他日期的均方根误差都小于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、平均相对误差在 $5\%$ 以下,说明文中构建的大气透过率模型应用于热红外遥感是可行的,进行遥感反演能取得较好的精度。

### 3.2 讨论

大气透过率是热红外遥感的关键参数,文中基于辐射传输模型MODTRAN,构建了大气透过率查找表,分析了影响大气透过率的关键因子,建立了常用卫星传感器热红外通道大气透过率的多元线性回归模型,并开展了以HJ-1B/IRS热红外数据的太湖水温遥感实例验证,取得了较好的反演精度。在以往的大气透过率经验模型<sup>[17-19]</sup>中,影响大气透过率的主要变量是水汽量,而文中的研究表明:气溶胶的类型、形状、大小(气溶胶模型)、浓度(能见度)、大气斜程(观测天顶角)都会对热红外波段大气透过率造成显著的影响,因此文中针对不同气溶胶模型构建的大气透过率多元线性回归模型具有很好的适用性。由于文中缺乏实测大气透过率资料,没有对所建的大气透过率模型进行直接的验证,这是论文的不足之处,希望在以后的研究加以完善和补充,不断提高大气透过率模型的精度。

致谢:文中所使用的HJ-1B/IRS热红外图像来自于中国资源卫星应用中心,气温和能见度数据来自中国气象科学数据共享服务网,水汽量来自全球气溶胶Aeronet网的太湖站点,该站点是由中科院地理与湖泊研究所马荣华研究员负责采集,对以上提供数据的部门表示衷心的感谢。

### 参考文献:

- [1] Tian Guoliang. Thermal Infrared Remote Sensing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)  
田国良. 热红外遥感[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [2] Wei Heli, Song Zhengfang. The calculation of infrared atmospheric transmittance [J]. *J Infrared Millim Waves*, 1995, 14(2): 159-160. (in Chinese)  
魏合理, 宋正方. 红外辐射大气透射率的计算 [J]. 红外与毫米波学报, 1995, 14(2): 159-160.
- [3] Yang Manzhong, Song Jinsong, Yin Jian. Method research on the calculation ratio of atmospheric transmission of infrared radiation[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2005, 25(2): 601-603. (in Chinese)  
杨满忠, 宋劲松, 尹健. 红外辐射的大气透过率计算方法研究[J]. 火箭与制导学报, 2005, 25(2): 601-603.
- [4] Gong Shaoqi, Sun Haibo, Wang Shaofeng, et al. Study on atmospheric transmittance of thermal infrared remote sensing I. derivation of atmospheric transmittance model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, In press. (in Chinese)  
龚绍琦, 孙海波, 王少峰, 等. 热红外遥感中大气透过率的研究(一): 大气透过率模型的构建[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1692-1698.
- [5] Qin Z, Olmo G D, Karnieli A, et al. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-advanced very high resolution radiometer data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D19): 22655-22670.
- [6] Duan Sibao, Yan Guangjian, Qian Yonggang, et al. Two single-channel algorithms on land surface temperature derivation based on simulated data of HJ-1B satellite [J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(9):1001-1008. (in Chinese)  
段四波, 阎广建, 钱永刚, 等. 利用HJ-1B模拟数据反演地表温度的两种单通道算法 [J]. 自然科学进展, 2008, 18(9): 1001-1008.
- [7] Hu Juyang, Tang Shihao, Dong Lixin. Land surface temperature retrieval from FY3A/MERSI [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(4): 531-538. (in Chinese)  
胡菊阳, 唐世浩, 董立新. FY3A/MERSI地表温度反演[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(4): 531-538.
- [8] Zhao Limin, Yu Tao, Tian Qingjiu, et al. Error analysis of the land surface temperature retrieval using HJ-1B thermal infrared remote sensing data [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(12): 3359-3362. (in Chinese)  
赵利民, 余涛, 田庆久, 等. HJ-1B热红外遥感数据地表温度反演误差分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(12): 3359-3362.
- [9] Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from landsat TM data and its application to the israel-egypt border region [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18): 3719-3746.
- [10] Gong Shaoqi, Zhang Xiru, Wang Shaofeng, et al. Study on the estimated model of effective mean atmospheric

- temperature for land surface temperature remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(4): 531–538. (in Chinese)
- 龚绍琦, 张茜茹, 王少峰, 等. 地表温度遥感中大气平均作用温度估算模型研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(4): 531–538.
- [11] Huang Miaofen, Mao Zhihua, Xing Xufeng, et al. A model for water surface temperature retrieval from HJ-1B/IRS data and its application [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2011, 89: 81–86. (in Chinese)
- 黄妙芬, 毛志华, 邢旭峰, 等. HJ1B/IRS 水温反演模型及监测示范[J]. *国土资源遥感*, 2011, 89: 81–86.
- [12] Sun Jun, Zhang Hui, Wang Qiao, et al. Three methods for inverting land surface temperature of the Taihu Lake basin using HJ-1 satellite thermal infrared channel [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(2): 100–104. (in Chinese)
- 孙俊, 张慧, 王桥, 等. 利用环境一号卫星热红外通道反演太湖流域地表温度的3种方法比较[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(2): 100–104.
- [13] Yu Xiaolei, Wu Zhaocong. SST retrieving of Bohai Sea using thermal infrared images on HJ-1 satellite [J]. *Ocean Technology*, 2011, 30(2): 1–6. (in Chinese)
- 余晓磊, 巫兆聪. 利用环境一号卫星热红外影像反演渤海海表温度[J]. *海洋技术*, 2011, 30(2): 1–6.
- [14] Zhao Shaohua, Qin Qiming, Zhang Feng, et al. Research on using a mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Chinese satellite for environment and natural disaster monitoring(HJ-1B)data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1552–1556. (in Chinese)
- 赵少华, 秦其明, 张峰, 等. 基于环境减灾小卫星(HJ-1B)的地表温度单窗反演研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(6): 1552–1556.
- [15] Wan Zhengming. MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD)[R]. NAS5-31370, 1999: 1–77.