维普资讯 http://www.cqvip.com

第29卷 第3期 海 洋 学 报 Vol. 29, No. 3
2007年5月 ACTA OCEANOLOGICA SINICA May 2007

利用Landsat数据反演近岸海水表层温度的大气校正算法

邢前国[1,2,3], 陈楚群[2*], 施 平[1,2]

(1. 中国科学院 烟台海岸带可持续发展研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院 南海海洋研究所, 热带海洋环境动力学重点实验室, 广东 广州 510301; 3. 广东省环境科学与技术公共实验室, 广东 广州 510650)

摘要: 介绍了一种将大气效应考虑在内、利用 Landsat TM、ETM+热红外数据进行近海岸海表水温反演的单窗算法. 在该算法中, 将地表气温、相对湿度等常规气象资料作为初始参数, 根据对流层中大气温度随高度呈线性降低、水汽随高度呈指数衰减的规律, 建立了估算平均大气温度及水汽含量的通用模式. 通过与实测数据及 MODIS Terra 海表水温产品比较发现, 该算法能够提高运用 TM/ETM+TIR 单波段数据进行近岸海表水温(SST)反演的精度: 一方面, 反演所得结果更接近于海表实际水温; 另一方面, 它在一定程度上剔除大气中的水汽对 SST 反演的影响, 进而提高海表水温的温度对比度. 该提出的大气校正算法只需地表大气温度及相对湿度资料, 该算法也无需进行大气模式的界定.

关键词: 海表水温; 热红外; 遥感; 气温; 湿度

中图分类号: P731.11; P722.7; X87 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-4193(2007)03-0023-08

1 引言

遥感是一种估算海表水温(SST)的有效手段, AVHRR 及 MODIS 热红外数据被广泛地应用到当前全球 SST 的反演中. AVHRR 及 MODIS 等热红外(TIR)波段数据空间分辨分力均为 1.1 km, 在近海岸及陆地水环境中的运用显得过于粗糙, 使得它们在地型复杂的近海 SST 反演的应用受到限制. Tang 等人[1]曾运用 AVHRR 数据对大亚湾核电站温排水的季节变化特征进行了监测, 但其空间分辨效果则不太令人满意. 而 TM(120 m), ETM+(60 m), ASTER(90 m)等的热红外波段则具有较高的空间分辨力, 在陆地及近海环境监测中有较高的应用价值[2].

影响 SST 反演精度的的因素很多[3], 特别是大气效应的大气透过率及大气程辐射会增加反演结果的不确定性. AVHRR 及 MODIS 数据在反演 SST 得以广泛应用, 得益于其采用的分裂窗算法可以一定程度上剔除大气(主要是水汽)的对热辐射传输的影响, 而 TM 和 ETM+均只有一个热红外波段, 难以剔除水汽的影响, 从而使得其热红外波段在内陆水体[4,5]及近海环境的应用上也受到限制. 为了突破这种局限, 许多学者采用统计型经验算法或者干脆忽略大气效应, 如文献[6,7]运用 TM 或 ETM+的热红外波段的辐亮度与实测 SST 间相关性进行 SST 反演; Thomas 等人[8]则建立了根据图像灰度值与实测 SST 间的相关性的 SST 反演算法; Ahn 等人[9]干脆不考虑大气效应直接采用由 NASA[10]提供的简化的普朗克公式来计算 SST. 这些算法的反演精度小到 0.2 ℃、大到 3.4 ℃均有报道[6~8], 但

收稿日期: 2006-05-25; **修订日期**: 2007-03-02.

基金项目: 国家 863 项目(2002AA639130); 广东省科技创新项目(2KB06701S).

作者简介: 邢前国(1975—), 男, 湖北省广水市人, 博士, 目前主要从事海岸带环境遥感方面的研究工作. E-mail: xingqg@163.com

* **通讯作者**, cqchen@scsio.ac.cn

维普资讯 http://www.cqvip.com

重要的是，这些算法难以推广应用到其他大气条件不同的情形下.

采用同步实测的大气廓线数据及辐射传输模型可能是最好的大气校正方法[5,8]，但是在大多数情况下，我们通常没有与遥感数据相一致的大气廓线数据. Qin 等人[11]开发了一种很有用的单窗算法用 Landsat-5 TM TIR 数据来反演地表温度. 在 Qin 等人的算法中，有效大气温度及水汽含量的估算需基于相应的大气模式[12]. 但是，对于海陆交互作用强烈的海岸带来说，则难于划分其上部的大气模式，如果又处于不同纬度带的过渡带，要识别其大气模式则更难. 本文的研究工作同样采用日常的气象数据来估算有效平均大气温度及大气水汽含量，但并不基于大气模式，而是基于我们所知道的对流层中大气温度随高度呈线性降低、水汽随高度呈指数衰减的规律. 我们期望通过本工作来提高运用 Landsat TM/ETM+ TIR 数据反演近海岸水体 SST 的精度.

2 星上辐亮度与星上亮温

热红外波段记录的信息反映了来自地物及大气层的综合热能信息，这种能量我们称之为星上辐亮度(L_λ)，其对应的温度称为星上亮度温度(T_{sensor}).

TM 和 ETM+第 6 波段波宽为 10.40～12.50 μm，空间分辨力分别为 120 m 和 60 m. TM 和 ETM+接受的辐射能量，即辐亮度，可用下式计算[10]：

$$L_\lambda = \left(\frac{LMAX - LMIN}{QCALMAX - QCALMIN}\right)\times (DN - QCALMIN) + LMIN, \quad (1)$$

其中，DN 为像元值；$LMAX$ 和 $LMIN$ 分别为定标常数，传感器辐射亮度的范围；$QCALMAX$ 和 $QCALMIN$ 分别为将辐亮度转换成灰度时的整个灰度域的最高、最低值. 不同的处理系统，其值会有差异，它们可从数据的文件中获取.

再通下式可以获得与星上辐亮度相对应的温度，即星上亮度温度：

$$T_{sensor} = \frac{K_2}{\ln(k_1/L_\lambda + 1)}, \quad (2)$$

其中，T_{sensor} 为星上亮度温度(单位为 K)；k_1，K_2 为定标常数，见表 1[10,13] 所示；L_λ 表示波长为 λ 的辐亮度.

表 1 TM/ETM+ TIR 波段定标参数

卫星传感器	热红外波段定标常数	
	k_1/W·m^{-2}·sr^{-1}·m^{-1}	K_2/K
Landsat-4 TM	671.62	1 284.30
Landsat-5 TM	607.76	1 260.56
Landsat-7 ETM+	666.09	1 282.71

3 SST 反演单窗算法

3.1 考虑大气效应的算法(算法 I)

基于辐射传输方程，见公式(3)，Qin 等人[11]考虑了大气的影响因素，运用热辐射传输模型(RTM，LOWTRAN)推导出一种反演地表温度的单窗算法，见式(4)，该式适用于地物温度 0～70 ℃. 本文将基于此法对海表水温进行反演试验.

$$L_{\lambda,sensor} = \tau_\lambda[L_{\lambda,surface} + (1-\varepsilon_\lambda)L_{\lambda,\downarrow}] + L_{\lambda,\uparrow}, \quad (3)$$

其中，$L_{\lambda,sensor}$ 和 $L_{\lambda,surface}$ 分别为星上、地表辐亮度；$L_{\lambda,\uparrow}$ 和 $L_{\lambda,\downarrow}$ 分别为大气上行、下行辐射；ε_λ 为地表发射率.

$$T_s = \{A(1-C-D) + [B(1-C-D) + C+D]T_{sensor} - DT_a\}/C, \quad (4)$$

其中，T_s 为地表温度；T_{sensor} 为传感器接受的辐亮度对应的亮温，由于大气影响，不等于地表亮温 T_B；T_a 为有效平均大气温度；A，B 为常数，其值分别为 −67.355 351，0.458 606；$C=\varepsilon\tau$，ε 为地物的发射率，τ 为大气透过率；$D=(1-\tau)[1+(1-\varepsilon)\tau]$.

式(4)中 T_a，ε，τ 为 SST 反演的未知参数. 就 SST 反演而言，其海水的发射率可能随海水的悬浮物含量等因素发生改变，但这种变化幅度不大，且大气中水汽的增加也会使得 SST 的反演对海表发射率的变化不敏感[14]；就式(4)本身而言，该算法对一定的 ε 估算误差都能保持较高的反演精度. 因此，对物化特征较为均一的海水而言，ε 可取一近似值，本文取 0.985. 由于 T_a 和 τ 的误差对反演精度影响较大，要进行准确估算. Qin 等人[11]运用 LOWTRAN 对大气透过率与水汽含量(w)的关系进行模拟发现，τ 随 w 增加而减少的这种关系在 0.4～4 g/m^2 整个范围内是一种非线性的关系，但在小范围内接近线性关系，如表 2[11,15] 所示.

维普资讯 http://www.cqvip.com

表 2　大气透过率估算

大气状况	水汽/g·cm^{-2}	大气透过率
高温(35 ℃)	0.4～1.6	$\tau=0.974\,290-0.080\,07w$
	1.6～3.0	$\tau=1.031\,412-0.115\,36w$
低温(18 ℃)	0.4～1.6	$\tau=0.982\,007-0.096\,11w$
	1.6～3.0	$\tau=1.053\,710-0.141\,42w$

因此，需要进行估算的参数是有效平均大气温度(T_a)及水汽含量(w).

3.1.1　估算有效平均大气温度及水汽含量

有效平均大气温度可以用下式进行估算：

$$T_a=\frac{1}{w}\int_0^z 1\,000T_z\rho_{vz}\mathrm{d}z, \tag{5}$$

其中，w 为气柱中水汽总量(kg/m^2)；T_z 为距地表高度为 z(km)处的大气温度(K)；ρ_{vz} 为距地表高度为 z(km)处的单位体积水汽量(kg/m^3).

在 11 km 的对流层中每上升 1 km 气温下降 6.5 K，据此按下式推算不同高度 z 的气温：

$$T_z=T-6.5z, \tag{6}$$

其中，T 为海表气温(K)；z 为高度(km).

根据水汽含量随高度呈指数下降的规律，推算不同高度 z 的水汽含量 ρ_{vz}(kg/m^3)：

$$\rho_{vz}=\rho_v\exp(-z), \tag{7}$$

其中海表水汽含量 ρ_v(kg/m^3)由下式计算：

$$\rho_v=\frac{e}{R_vT}, \tag{8}$$

其中，R_v 为水汽气体常数，取值 461.495 J/(kg·K). 水汽压 e(Pa)由下式得到：

$$e=e_sRH, \tag{9}$$

其中，RH 为相对湿度；e_s 为饱和水汽压(Pa)由下式[16]得到：

$$e_s=611\exp\left[\frac{a(T-273.15)}{T-b}\right], \tag{10}$$

其中，a=17.67 K，b=29.65 K.

每平方米气柱中水汽总量 w(kg/m^2)：

$$w=\int_0^Z 1\,000\,\rho_v z\mathrm{d}z, \tag{11}$$

在不同的纬度，对流层的厚度存在差异，但当 $z>10$ km 时，w 值对 z 值的变化并不敏感，如表 3 所示，气温在 10～40 ℃间气柱水汽总量变化不到 0.01 kg/m^2，故 z 值可近似取 10 km.

3.1.2　海表气温与相对湿度

本文采用的是晴空无云的 TM，ETM+影像，且获取影像前 5 d 都没有观测到降水，可以认为所研究区域内该时段大气较稳定，大气的垂直波动以及在较小地域范围内的水平变化可忽略.

表 3　对流层不同厚度的气柱水汽总量(kg/m^2)

气温 T/℃ (地上 2 m 处)		气柱水汽总量 9 km	10 km	11 km	12 km	13 km
RH= 0.8	10	7.509 8	7.510 4	7.510 6	7.510 7	7.510 7
	20	13.813 4	13.814 4	13.814 9	13.815 0	13.815 1
	30	24.267 2	24.269 1	24.269 8	24.270 1	24.270 2
	40	40.918 6	40.921 8	40.923 0	40.923 4	40.923 5
RH= 0.4	10	3.754 9	3.755 2	3.755 3	3.755 35	3.755 3
	20	6.906 7	6.907 2	6.907 45	6.907 5	6.907 5
	30	12.133 6	12.134 5	12.134 9	12.135 0	12.135 1
	40	20.459 3	20.460 9	20.461 5	20.461 7	20.461 7

海表气温及相对湿度本文采用大亚湾生物资源综合实验站的当日上午 10:00(卫星过境的大致时间)的观测数据.

3.2　不考虑大气效应的算法(算法Ⅱ)

Weng 等人[17]采用式(12)进行陆面温度反演，此式简单，它不考虑大气透过率及程辐射等大气影响因素，即 $T_B=T_{sensor}$，也可用作 SST 的简单反演，本文采用此算法同前面的算法进行对比.

$$T=\frac{T_B}{1+(\lambda T_B/\rho)\ln\varepsilon}, \tag{12}$$

其中，λ 为辐射亮度的波长，峰值限幅波长的平均值(11.5×10^{-6} m)；$\rho=h\times c/\sigma(1.438\times10^{-2}$ mK)；σ 为波耳曼常数(1.38×10^{-23} J/K)；h 为普朗克常数(6.626×10^{-34} J·s)；c 为光速(2.998×10^8 m/s)；ε 为发射率.

4　试验验证

4.1　试验区简介

大亚湾位于珠江口东侧(22°30′～22°51′N，114°30′～114°50′E)，西南邻香港，西邻大鹏湾，东接红海湾，面积约 600 km^2，是一个半封闭型的亚热带海湾(如图 1 所示). 它也是广东省重要的水产资源保护区. 近年来，大亚湾沿岸经济迅速发展，能源电力工业也发展迅速，大亚湾核电站(1 800 MW)已于 1994 年正式投入商业运行，岭澳核电站(4 000 MW)正在建设中，大亚湾东部海岸 8 000 MW 的电站也在规划当中. 电站的温排水对该海区的生态环境存在着潜在威胁.

维普资讯 http://www.cqvip.com

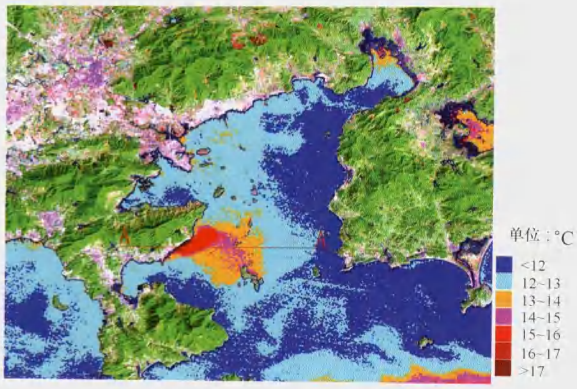

图 1 大亚湾遥感图

本影像是由 Landsat-5 TM 于 2004 年 2 月 15 日获取的. 其中陆地部分为 7,4,2 波段对应 R,G,B 合成；水体部分是大亚湾海域的 SST 分布图，图中核电站温排水的影响区清晰可见.

A—A：温度空间剖面线

4.2 验证方法

为验证反演的效果，于 Landsat-5 TM 过境（上午 9:30～10:00 间）的同日 2000 年 1 月 3 日上午 10:00～11:00 之间，我们在大亚湾海域进行实地海表温度测量，共 20 个站位，水温取水面下 0.5 m 处的温度.

2001 年 12 月 31 日的 Landsat-7 ETM+（上午 10:00 前后过境）时没有相对海表水温实测数据，我们采用同日上午 11:08 前后过境的 MODIS Terra 的 SST 产品（经 SeaDAS 4.6 处理）进行对比：在保证 MODIS 像元纯净的情况下，在图像上采取 26 个样点；由于 ETM+TIR 波段的空间分辨力是60 m，而 MODIS 相应波段的空间分辨力为 1 km，故与 MODIS 对应的点的 ETM+ 的 SST 值我们采用 17×17 窗口内像元的平均值.

5 结果与讨论

5.1 有效平均大气温度及水汽的估算

Qin 等人[11] 按 LOWTRAN 中的 4 种大气模式，建立了相应的 T_a-T 算式（表 4），但如何界定现场的大气状况属于何种模式比较主观. 以实际气温为例，当 $T=18.2$ ℃及 $T=17.4$ ℃时，若不清楚大气属于何种模式，算得的 T_a 相差可达 14 K（表 4），若再通过式(4)来推算 T_s 则会带来较大误差.

本文根据式(5)与式(11)建立的有效平均大气温度与水汽估算模式，称通用模式，无需对大气的所属模式进行分类，只需知道当时地表上空 2 m 处的气温 T 及相对湿度 RH 即可. 通过本模式对上述同样两天的数据处理的结果如表 4 所示，该结果与 Qin 等人所采用的热带大气和中纬度冬季大气模式结果很接近，最大相差 0.40 K. 大亚湾地处 22°30′～22°51′N，是南海北部一个典型亚热带海湾，若主要考虑其地理位置，2001 年 12 月 31 日大亚湾的大气模式可近似视为热带大气；若主要考虑季节，从结果看也很接近中纬度冬季大气模式.

表 4 估算有效平均大气温度

大气模式	算法	T_a/K	
		$T=18.2$℃	$T=17.4$℃
USA 1976	$T_a=25.939\,6+0.880\,45T$	282.46	281.75
热带大气	$T_a=17.976\,9+0.917\,15T$	285.19	284.45
中纬度夏季大气	$T_a=16.011\,0+0.926\,21T$	296.32	295.55
中纬度冬季大气	$T_a=19.270\,4+0.911\,18T$	284.74	284.01
	最大差值	13.86	13.80
通用模式	参见式(5)	284.83	284.05

5.2 两种算法的比较

5.2.1 海表绝对温度

将大气因素考虑在内的式(4)的算法在这里简称为算法Ⅰ，不考虑大气因素式(13)的算法简称为算法Ⅱ.

2000 年 1 月 3 日我们在大亚湾海域进行了 SST 的同步测量，20 个站位实测温度范围为 16.47～18.45 ℃，如图 2 所示. 算法Ⅰ所得各站温度与实测温度的平均低 2.40 ℃，算法Ⅱ平均低 2.44 ℃，两种算法与实测结果具有明显的线性相关特性（见图 3）. 尽管两种算法所得结果在本例中绝对值差别不大（不能归结为效果算法Ⅰ的效果不好，具体见下一部分讨论），但这种差异是具有高显著性意义的（配对 t 检验，$p<0.01$），也就是说算法Ⅰ所得结果与实测结果差别更小. 这种遥测值与实测值的差异有多种原因，首先是海上采样时间滞后于卫星过境时间，而上午海表水温处于上升过程中，这会使遥感测量的温度偏低；其次，表层海水的薄边界层效应也可能使遥感测得的海表温度（skin temperature）低于水下 0.5 m 处的水温；再者，Landsat-5 TM 已运行多年，仪器老化会使记录的信号与实际接受到的信号产生偏差[13].

维普资讯 http://www.cqvip.com

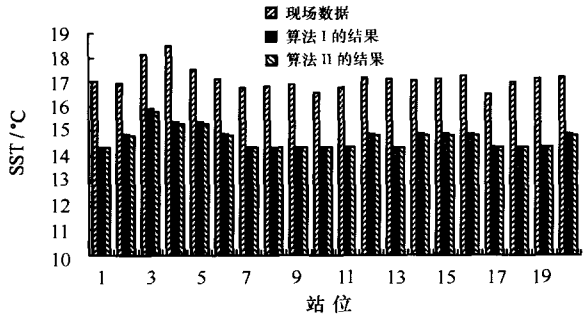

图 2　20 个站位的实测及反演所得的 SST

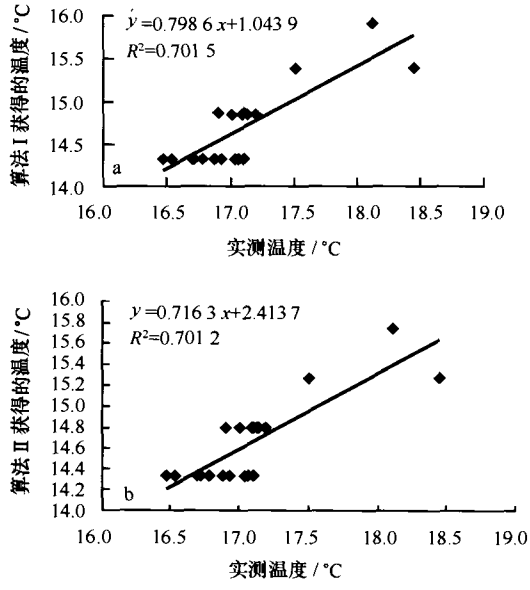

图 3　算法 I 和 II 的结果同实测数据的相关性

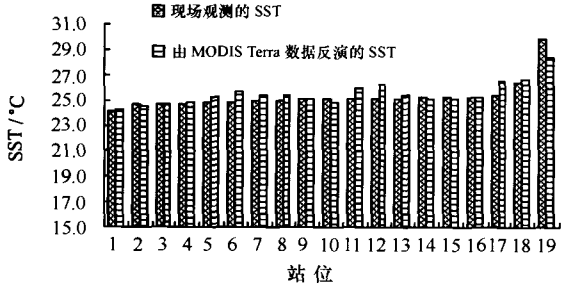

图 4　2004 年 10 月 29 日由 MODIS Terra 数据反演的与同步观测的大亚湾海表水温数据

对于 2001 年 12 月 31 日卫星过境的 ETM+TIR 数据,由于没有实测数据,我们采用与之同日过境的 MODIS Terra SST 产品进行对比. 我们运用不同时期的大亚湾附近海域的实测海温(9:50～10:59)与同日 MODIS Terra TIR 数据(10:55～11:00)经 SeaDAS 处理得的 SST 结果进行了对比,两者相差很小(0.23 ℃±0.57 ℃, 见图 4),这说明 MODIS Terra SST 产品也适用于大亚湾海域,用来作对比是可行的. 结果显示,算法 I 和 II 结果都低于 MODIS Terra 反演的 SST 值,差值分别为:1.26 ℃±0.26 ℃,1.89 ℃±0.30 ℃,两种算法的结果经配对 t 检验也呈高显著性差异($p<0.01$). 算法 I 所得结果与 MODIS Terra SST 的差值较算法 II 与之的差值低 0.6 ℃,也就是说,算法 I 要优于算法 II. 考虑到 MODIS Terra 过境时间较 ETM+晚大致 1 h, ETM+算法 I 的 SST 值与 MODIS Terra 的差别应该更小一些,两者的实际反演精度应更接近. ETM+良好的定标性能对提高反演精度可能起了重要作用. ETM+与 MODIS Terra 的 SST 具有很好的相关性,且与样点单个像元相比,以样点为中心的17×17 个像元窗口的 ETM+平均值与 MODIS Terra 的相关性更高,见图 5.

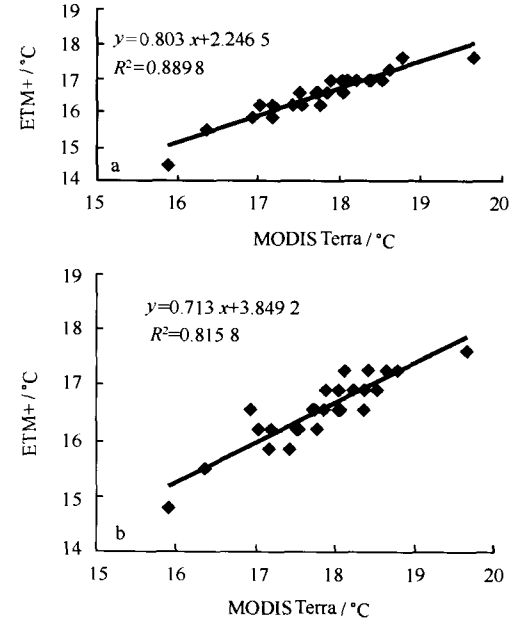

图 5　ETM+TIR 数据反演所得 SST 与 MODIS Terra SST 产品比较

a. ETM+的 SST 值为 17 个像元平均值,b. ETM+的 SST 值为单个像元的值

表 5　A—A 剖面地表温度差(最高温度—最低温度)(℃)

日期	最高温—最低温		算法 I —算法 II
	算法 I	算法 II	
2004-02-15	13.33	11.73	1.60
2001-12-31	8.14	7.19	0.95
2000-01-03	8.48	7.40	1.08

维普资讯 http://www.cqvip.com

5.2.2 海表温度对比度

为对两种算法的结果进行对比，我们建了一条如图1所示的从核电站沿岸自西向东的剖面A—A，对该面的温度分布进行对比. 因为只是针对两种算法进行比较，本文也在选取陆地地物作为研究对象的同时没有考虑不同地物的发射率变化，同海水一样都是取0.985. 对2000年1月3日、2004年2月15日的TM及2001年12月31日的ETM+TIR数据处理所得剖面的温度分布如图6所示.

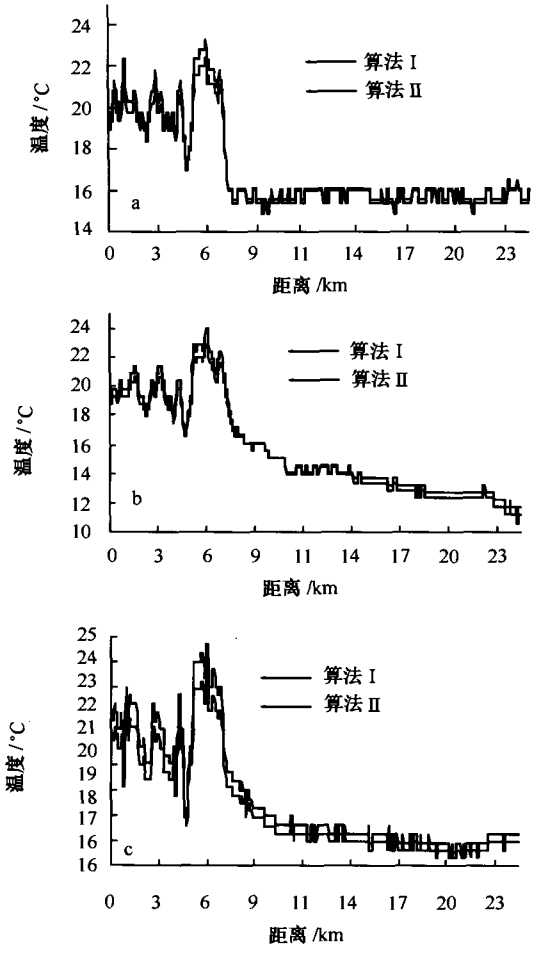

图6 A—A剖面两种不同反演算法温度对比
a,b,c分别为2000年1月3日、2004年2月15日的TM及2001年12月31日ETM+ TIR数据

温度对比度可定义对同一剖线上温度最高与最值的差值. 如表5所示，算法Ⅰ的温度范围要明显大于算法Ⅱ，这表明算法Ⅰ提高了地表温度对比度. 这种效应可解释为大气作用结果，亚热带气团湿度较高，这使信号受到较大衰减，并且降低了温度对比度. 根据热辐射传输方程式(3)可以知道大气的影响效应可以由下式ΔL表示：

$$\Delta L = L_{\lambda,\mathrm{sensor}} - L_{\lambda,\mathrm{surface}} = (\tau_\lambda - 1)L_{\lambda\mathrm{surface}} + \tau_\lambda(1-\varepsilon_\lambda)L_\lambda, \quad (13)$$

即，大气辐射使遥感器接受信息增加，大气也同时使地物发射的热信号在传到传感器的过程中发生损失. 在这两种作用的效果差不多的情况下，考虑大气效应与否都不会有较大差异，这也解释了为什么在某些大气状态下大气校正并没有使结果明显改变，如2000年1月3日的TM TIR影像.

6 结论与展望

本文运用气温、相对湿度等常规气象资料，根据对流层中大气温度随高度呈线性降低、水汽随高度呈指数衰减的规律，建立了估算平均大气温度及水汽含量的通用模式，从而避免界定大气模式的困难，算法本身简单清晰；所需参数很容易从日常发布的气象监测数据中获取.

将算法Ⅰ应用于高空间分辨力的TM/ETM+TIR波段进行近海岸SST反演的效果较好，同没有进行大气校正的结果相比，其结果与实际海面水温更为接近，能够提高反演的精度；并且该算法表现出较好的剔除大气中水汽影响的能力，能够提高利用卫星遥感海面水温的温度对比度，这使其在水汽含量较高的热带、亚热带地区的应用更显实际意义.

需要指出的是，在估算大气透过率时，按Qin等人的方法根据地表大气温度将大气划分为两类(18 ℃时，35 ℃时)，这种划分的界线太模糊，特别是在亚热带、热带海域水汽含量较高的情况下估算大气透过率易造成较大的误差. French等[18]对大气实测数据进行分析发现，在没有考虑有效大气温度的情况下，运用水汽含量估算大气透过率容易产生较大的误差，造成的反演结果偏差可高达7 ℃. 所以，有必要将大气温度考虑在内建立更精确的大气透过率估算模型.

另外，本文是针对TM及ETM+TIR数据的，因TM及ETM+的观测角可近似天底角，由观测角引起的大气效应的改变可以忽略. 对于其他的传感器，不同视角的像元的大气效应则可能需要根据视角进行修正.

作者十分感谢匿名审稿专家对本文的改进提出的修改建议，同时还要感谢中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站提供的相关气象数据，以及中国科学院遥感卫星地面站、美国马里兰大学全球观测实

维普资讯 http://www.cqvip.com

验室提供的 Landsat 遥感数据.

参考文献:

[1] TANG D L, KESTER D R, WANG Z, et al. AVHRR satellite remote sensing and shipboard measurements of the thermal plume from the Daya Bay, nuclear power station, China[J]. Remote Sensing of Environment,2003,84(4):506—515.

[2] YANG X, LAN R, DU Y,et al. Technical foundation research on high resolution remote sensing system of China's coastal zone[J]. Acta Oceanologica Sinica,2004,23(1):109—118.

[3] MAO Z, ZHU Q, PAN D. An operational satellite remote sensing system for ocean fishery[J]. Acta Oceanologica Sinica,2004,23(3):427—436.

[4] RITCHIE J C, COOPER C M. Remote sensing techniques for determining water quality: Application to TMDLs[C]. TMDL Science Issues Conference, Water Environment Federation. Alexandria, VA,2001. 367—374.

[5] SCHOTT J R, BARSI J A, NORDGREN B L, et al. Calibration of Landsat thermal data and application to water resource studies[J]. Remote Sensing of Environment,2001,78(1—2):108—117.

[6] CHEN C, SHI P, MAO Q. Application of Remote Sensing Techniques for Monitoring the Thermal Pollution of Cooling—Water Discharge from Nuclear Power Plant. Journal of Environmental Science and Health[J]. Part A—Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering,2003, A38(8):1 659—1 668.

[7] SUGA Y, OGAWA H, OHNO K, et al. Detaction of surface temperature from Landsat—1/ETM+[J]. Advanced Space Research, 2003,32(11): 2 235—2 240.

[8] THOMAS A, BYRNE D, WEATHERBEE R. Coastal sea surface temperature variability from Landsat infrared data[J]. Remote Sensing of Environment,2002,81(2—3) :262—272.

[9] AHN Y, SHANMUGAM P, LEE J, et al. Application of satellite infrared data for mapping of thermal plume contamination in coastal ecosystem of Korea[J]. Marine Environmental Research, 2006, 61(2):186—201.

[10] Landsat Project Science Office. Landsat 7 Science Data User's Handbook. URL: http://ltpwww. gsfc. nasa. gov/IAS/handbook/handbook_toc. html, Goddard Space Flight Center, NASA, Washington, DC (last date accessed: March 30, 2005).

[11] 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), 3 719—3 746.

[12] BERK A, BERNSTEIN L Sl, ROBERTSON D C. MODTRAN: a moderate resolution model for LOWTRAN 7 [R]. GL—TR—89—0122, Spectral Sciences,1989.

[13] CHANDER G, MARKHAM B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003,41(11):2 674—2 677.

[14] LIU W Y,FIELD R T, GANTT R G,et al. Measurement of the surface emissivity of turbid waters[J]. Remote Sensing of Environment,1987,21(1):97—109.

[15] SOBRINO J A, JIMéNEZ-MUñOZ J C, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. Remote Sensing of Environment,2004,90(4): 434—440.

[16] LU D, SONG J. A Simplified atmospheric correction procedure for estimating surface temperature from AVHRR thermal data[J]. GI-Science and Remote Sensing, 2004,41(1):81—94.

[17] WENG Q, LU D, SCHUBRING J. Estimation of land surface temperature - vegetation abundance relationship for urban heat island studies[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4):467—483.

[18] FRENCH A N, NORMANB J M, ANDERSONB M C. A simple and fast atmospheric correction for spaceborne remote sensing of surface temperature[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(2—3):326—333.

维普资讯 http://www.cqvip.com

Atmospheric correction of using Landsat data to retrieve sea surface temperature in coastal waters

XING Qian-guo[1,2,3], CHEN Chu-qun[1], SHI Ping[1,2]

(1. *Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai*, 264003 *China*; 2. *LED, South China Sea Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510301, *China*; 3. *Guangdong Public Laboratory of Environmental Science and Technology, Guangzhou* 510650, *China*)

Abstract: A mono-window algorithm was introduced to retrieve Sea Surface Temperature (SST) using Landsat data in coastal waters. In this algorithm, the effective mean air temperature and the water vapor content of air column were estimated with the local meteorological parameters of air temperature and relative humidity, based on the facts in troposphere: 1, air temperature decrease linearly with the altitude, and 2, water vapor concentration lapses exponentially with the altitude. The sea-truth temperature data and MODIS Terra SST product were used to validate the SST retrieved from Landsat TM and ETM+ Thermal Infrared (TIR) data with the algorithm. The results show that the algorithm can improve the spatial temperature contrast which is often masked due to water vapor effects, and the temperature derived from the algorithm is closer to the sea-truth SST. When applying the algorithm, the initial parameters of air temperature and relative humidity can be easily collected from local meteorological stations, and there is no need to identify the model of air profile.

Key words: sea surface temperature; thermal infrared; remote sensing; air temperature; humidity