

基于岸基实测数据的 FY-3A 近红外通道海洋大气水汽反演

王祥^{1,2}, 赵冬至^{2*}, 苏岫², 杨建洪², 马玉娟^{2,3}

(1. 大连海事大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026;

2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023;

3. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266100)

摘要:利用全自动太阳光度计(CE-318)野外定点长时间序列现场观测数据,验证传统大气水汽反演算法,结果表明,反演结果精度较低,不适于该研究区域大气水汽含量反演.因而给出了近红外波段大气水汽含量探测的原理,对自主卫星 FY-3A 中分辨率成像光谱仪 MERSI(Medium Resolution Spectral Imager)反演大气水汽含量算法作了推导、分析.基于长时间序列现场观测数据集,建立了局地化的 FY-3A 海洋大气水汽反演算法,并用于研究区实际大气水汽含量反演.通过双通道比值法和三通道比值法反演结果与现场实测数据比较,得出以下结论:模型受下垫面反射率影响较大;三通道比值法较双通道比值法反演结果精度更高,双通道比值法误差为 16.1%,三通道比值法误差为 14.3%;实测数据验证和改进后算法精度更高.

关键词:近红外;大气水汽含量;中分辨率成像光谱仪(MERSI);通道比值法

中图分类号:P407.1 **文献标识码:**A

Retrieving precipitable water vapor based on FY-3A near-IR data

WANG Xiang^{1,2}, ZHAO Dong-Zhi^{2*}, SU Xiu², YANG Jian-Hong², MA Yu-Juan^{2,3}

(1. College of Environment Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China;

3. College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Traditional method for retrieving precipitable water vapor was evaluated with the data obtained from series of long time in-situ measurements of CE-318. The results show that the method has a low accuracy and is not suitable for applications over this region. In this paper, the theory of precipitable water vapor detection with NIR channels was introduced. Equations of precipitable water vapor remote sensing were derived and analyzed. Retrieving method for FY-3A/MERSI (Medium Resolution Spectral Imager) was proposed. Comparing with the results of CE-318 in-situ measurements in the studied area, it was concluded that precision of the method relied so much on reflectance of the underlying surface. The method of three-channel ratio had better performance than that of two-channel ratio by reducing the errors from 16.1% to 14.3%.

Key words: near infrared; precipitable water vapor; medium resolution spectral imager (MERSI); channel ratio method

PACS: 42.68.Wt

引言

大气水汽含量是影响定量遥感应用的主要因素之一.在大气研究及定量遥感应用当中,大气水汽的影响不可忽略.但因实时的大气剖面资料非常有限,

各种模拟数据的结果精度难以得到保证,因而对大气水汽含量时空分布的监测就显得尤为重要.20世纪70年代以来,国外大批研究者致力于近红外方法探测大气水汽^[1-6],即采用近红外水汽吸收带差分方法探测大气水汽含量. Frouin 等^[1]以机载的辐射计

收稿日期:2011-11-04,修回日期:2012-07-04

基金项目:海洋行业公益性专项(200905012,201005030)

Foundation items: Supported by the National Marine Public Welfare Research Project of China (200905012 and 201005030)

作者简介 (Biography): 王祥(1984-),男,山东潍坊人,博士研究生,主要从事海洋环境遥感研究. E-mail: wx841225@163.com.

通讯作者 (Corresponding author): E-mail: dzzhao@nmemc.gov.cn.

Received date: 2011-11-04, **revised date:** 2012-07-04

测量地面反射的太阳辐射,反演误差约为 20%。Gao 等^[3]采用三个通道遥感测量大气可降水,并以机载可见红外成像分光计(AVIRIS)资料进行验证。Kleiman 等^[7]将反射法推广应用于海洋,以 NASA-ER2 上飞行的 MODIS 机载模拟器数据验证,但该方法局限于耀斑的亮度(反射率必须大于 0.15)。国内,黄意玟等^[8]以神舟三号中分辨率成像光谱仪数据进行了大气柱水汽含量反演尝试;张弓等^[9]依据 Frouin 等提出的算法,以 FY-1C 极轨气象卫星扫描辐射计数据反演大气水汽总含量,独立样本真实性检验偏差约为 15%~20%,相关系数达到 90% 以上;胡秀清等^[10]以查找表方法反演 FY-3A 大气水汽含量,并与探空数据比对验证,显示卫星反演值有 20%~30% 系统性偏低;毛克彪等^[11]利用 MODIS 数据对汉江地区上空大气水汽反演也进行了相关的研究。这些前期研究为以后的近红外方法探测大气水汽奠定了基础。

近年来,我国自主卫星系统发展迅速,但由于大量实测验证数据的欠缺,使得定量遥感应用受到很大影响。风云三号(FY-3)气象卫星是我国自主第二代极轨气象卫星,它是在 FY-1 气象卫星技术基础上的发展和提高,在功能和技术上向前跨进了质变的一步。FY-3A 于 2008 年 5 月 7 日成功发射。星上搭载的中分辨率成像光谱仪(MERSI)主要用于海洋水色、气溶胶、水汽总量、云特性、植被、地面特征、表面温度、冰雪等遥感监测。

本研究拟采用 FY-3A 的 MERSI 卫星资料,基于全自动太阳光度计(CE-318)长时间序列定点现场观测数据,建立适用于 FY-3A 的高精度局地化海洋大气水汽反演算法,为风云三号卫星定量海洋遥感应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 FY-3A/MERSI 卫星数据

FY-3A 搭载的 MERSI 传感器包含 400~1250 nm 的 20 个光谱通道,其中 5 个近红外通道可用于大气水汽的探测。表 1 给出了 FY-3A/MERSI 与 EOS/MODIS 近红外通道的信息对比。865 nm 窗区吸收较小,是两个传感器的共同选择。MERSI 选用的 1030 nm 通道较之 MODIS 的 1240 nm 通道吸收更小,信噪比更高且更靠近水汽吸收带,这对于水汽的反演更为有利^[8]。Albert^[12]等研究发现水汽和 CO₂ 的吸收对 1240 nm 通道有较大影响,该通道不适于参与水汽反演。

以(N38°52', E121°31.3')为研究区域,共搜集 2009 年 3 月至 2009 年 10 月 FY-3A/MERSI HDF5 格式有效卫星数据 302 景。卫星影像数据由自带经纬度地理定位数据建立 GLT 文件进行几何校正,辐射定标参考国家卫星气象中心发布的 FY-3A 定标信息参数(<http://satellite.cma.gov.cn/PortalSite/default.aspx>),辐射定标精度为 7%。卫星数据经以上预处理后提取相应观测点周围 3×3 像元均值作为该点的数据值,剔除异常值,形成卫星资料数据集。

表 1 FY-3A/MERSI 与 EOS/MODIS 近红外通道信息
Table 1 The comparison of NIR channels between FY-3A/MERSI and EOS/MODIS

FY-3A/MERSI		EOS/MODIS	
中心波长/nm	宽度/nm	中心波长/nm	宽度/nm
905	20	905	30
940	20	936	10
980	20	940	50
865	20	865	40
1030	20	1240	20

1.2 现场实测数据

现场实测数据为全自动太阳光度计(CE-318)长时间序列定点现场观测数据。CE-318 测得的直射太阳辐射数据可用于反演计算大气透过率、消光光学厚度、气溶胶光学厚度、大气柱水汽总量和臭氧总量等。仪器架设于国家海洋环境监测中心,距离海边约 200 m。数据采集时间跨度为 2009 年 3 月至 2009 年 10 月,共 3293 条数据,包含 340~1640 nm 9 个波段对应时间点的观测数据,采样频率为 15 min/次。仪器绝对定标采用 Langley-Bouguer 方法,对太阳直射辐射测量进行定标。处理后提取其中的水汽数据部分,形成现场实测数据集。

将卫星资料数据集与现场实测数据集经预处理后进行时空匹配,各组数据匹配时间差值最大不超过 15 min,最终得到 70 条匹配数据。

1.3 研究方法

近红外方法探测大气水汽始于对太阳的观测。地面上观测到的太阳光谱中,存在水汽吸收带的波长部分,太阳辐射被水汽吸收,太阳光谱呈现凹凸变化的曲线。太阳光谱下凹的部分即为吸收谷,这些低谷与整个太阳光谱包络线间的高差应与吸收气体的含量有关,这就是差分吸收的概念。由此便可依据太阳辐射光谱观测值推算大气柱水汽含量。

2 算法建立

2.1 基本原理—近红外波段大气辐射传输

Frouin 等^[1]首先提出可以利用太阳反射光为辐射源,通过近红外区一个弱吸收区和一个窗区的通道组合测量大气中水汽含量.在近红外波段,卫星接收到的辐射可表示为^[13-14]:

$$L = L_s \rho \tau + L_p, \quad (1)$$

式中等号右侧第一项表示地表反射的太阳直射辐射, L_s 为大气层顶太阳入射辐射, τ 为大气透射率, ρ 为地表反射率; 等号右侧第二项表示大气程辐射, 主要源于气溶胶散射.

当大气清洁, 能见度较高时, 气溶胶含量少, 程辐射以单次散射为主. L_p 也包含有水汽信息, 此时可假定程辐射与地表反射太阳直接辐射成正比, 式(1)可改写成:

$$L = CL_s \rho \tau. \quad (2)$$

若只存在气溶胶消光和水汽吸收, 式(2)中大气透射率 τ 应该包含气溶胶消光 τ_a 和水汽吸收 τ_{ww} 两部分. 假定这两种过程各自独立, 式(2)变为:

$$L = CL_s \rho \tau_a \tau_{ww}. \quad (3)$$

距离该水汽吸收带最近的只有气溶胶消光而无任何气体吸收的大气窗区:

$$L_0 = C_0 L_{s0} \rho_0 \tau_{a0}. \quad (4)$$

由式(3)和式(4)得:

$$\ln(L/L_0) = \ln\left(\frac{CL_s \rho \tau_a}{C_0 L_{s0} \rho_0 \tau_{a0}}\right). \quad (5)$$

研究显示, τ_{ww} 与光路上水汽总量 m 有如下指数关系^[2-3]:

$$\tau_{ww} = e^{A\sqrt{m}}, A < 0. \quad (6)$$

可见, 当光谱通道确定以后, 式(5)右侧第一项不随 m 发生变化, 即为 B , 得到:

$$\ln(L/L_0) = B + A\sqrt{m}, A < 0. \quad (7)$$

Kaufman 与 Gao^[2]对若干探空廓线模拟发现, 光谱通道辐亮度之比与大气中柱水汽含量的平方根成负指数关系:

$$\tau_w = \rho_{0.94}^* / \rho_{0.865}^* = \exp(B + A\sqrt{m}), A < 0, \quad (8)$$

式中, ρ^* 为通道表观反射率. 可见, 系数 A 代表了水汽的吸收本领, 与温度、气压有关; 系数 B 与地表反射率和气溶胶光学特性有关^[2,4].

2.2 通道比值法

2.2.1 双通道比值法

如果地物反射率在水汽吸收波段和大气窗口波段之间变化不明显, 即地表反射率在两波段近似恒定不变, 则可用两波段比值来确定相应水汽吸收波

段的透射率 τ_w , 见式(9).

$$\tau_w = \rho_{0.94}^* / \rho_{0.865}^*. \quad (9)$$

2.2.2 三通道比值法

如果地表反射率随波长呈线性变化, 则可以增加一大气窗口波段, 利用三波段比值来确定水汽吸收波段的透射率. 而 Gao 和 Kaufman 提出, 0.85 ~ 1.25 μm 波长之间各种地物反射率与波长基本满足线性关系^[2]. 得到三通道比值法如式(10):

$$\tau_w = \rho_{0.94}^* / (c_1 \rho_{0.865}^* + c_2 \rho_{1.03}^*). \quad (10)$$

2.2.3 Kaufman 与 Gao 算法

Kaufman 与 Gao 基于近红外区太阳反射光差分吸收的理念, 提出了近红外波段大气水汽反演的算法, 简称 K&G 算法, 算法表达式同式(8), 并给出了不同下垫面类型情况下参数 A 、 B 的值, 见表 2.

表 2 K&G 算法参数信息

Table 2 Parameters of K&G Algorithm

下垫面类型	参数 A	参数 B
植被覆盖	-0.651	0.012
裸土	-0.651	-0.040
复合地表	-0.651	0.02

2.3 FY-3A 大气水汽反演算法模型

对式(8)两边取对数可得:

$$\ln(\tau_w) = B + A\sqrt{m}, \quad (11)$$

由此可见, $\ln(\tau_w)$ 是关于 $m^{1/2}$ 的线性函数, 斜率即为参数 A , 截距即为参数 B . 可以根据上述推导, 利用数据集中 50 条数据分别用于双通道比值法和三通道比值法模型的创建, 数学分析软件采用 origin8.5, 数据线性回归过程在此不作赘述.

2.3.1 FY-3A 双通道比值法模型

双通道比值法参数拟合如图 1 所示. 得到双通道比值法模型见式(12), 拟合相关系数达到 0.80437.

$$\tau_w = \exp(-0.36828 - 0.43449\sqrt{m}). \quad (12)$$

2.3.2 FY-3A 三通道比值法模型

三通道比值法参数拟合如图 2 所示. 得到三通道比值法模型见式(13), 拟合相关系数达到 0.81444.

$$\tau_w = \exp(-0.38795 - 0.41509\sqrt{m}). \quad (13)$$

由图 1、图 2 可见, 双通道比值法和三通道比值法拟合的线性度均高于 0.8, 线性关系明显, 结果可信度较高.

3 实际应用与精度分析

将 FY-3A 双通道比值法和三通道比值法以及

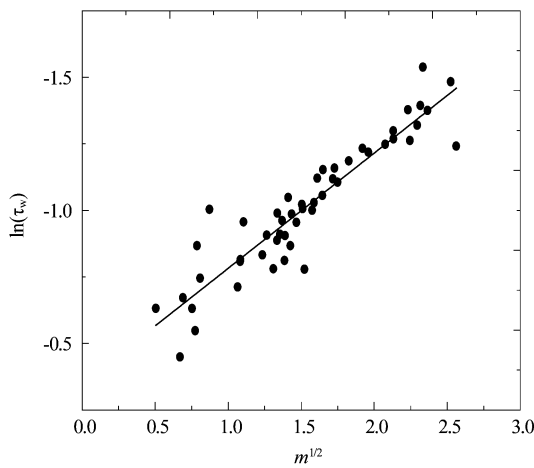


图 1 双通道比值法参数拟合
Fig. 1 Linear fitting of two-channel ratio method

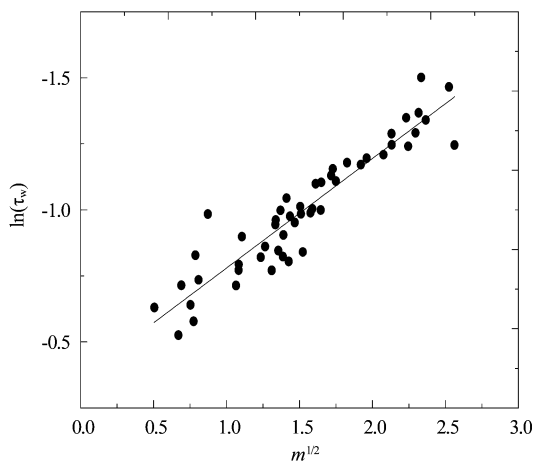


图 2 三通道比值法参数拟合
Fig. 2 Linear fitting of three-channel ratio method

传统算法(Kanfman 与 Gao 给出的复合地表类型参数模型,文中简称为 K&G 算法,详见文献[2])应用于研究区实际大气水汽含量反演研究.利用数据集剩余 20 条实测数据分别对本研究建立算法和传统算法作独立样本检验,结果见图 3.

由图 3(a)可见,反演结果在低水汽含量情况下收敛度较高.但也存在某些“异常值”,可能是由于卫星图像中云以及气溶胶的干扰所致;由图 3(b)可见,K&G 算法反演水汽数据在 1.8 ~ 5 g/cm² 之间,高估了大气水汽数据值,不适用于该区域的大气水汽含量反演研究.总之,算法改进后精度大幅提高,且三通道比值法结果稍优于双通道比值法.图 4 和图 5 分别给出了 20 个独立样本检验的两类算法结果值绝对误差以及相对误差分布情况.

由图 4 和图 5 可见,三通道比值法反演结果收

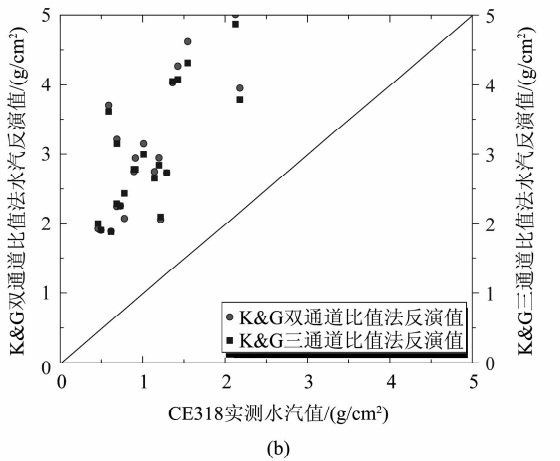
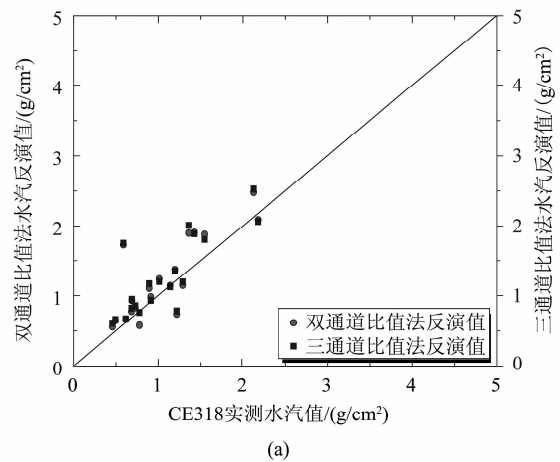


图 3 模型反演值与实测数据对比图
Fig. 3 The comparison of NIR retrieved water vapor from FY-3A/MERSI with CE-318 data

敛度好于双通道比值法,且算法改进后反演结果误差较之前模型参数反演结果有很大改善.原因在于:大气水汽含量时空变率很高,且通道比值法参数对下垫面依赖性很高,不同区域,不同时间甚至不同的物候期,下垫面反射率均会有较大变化,从而影响了单一参数反演结果的精度.三通道比值巧妙的利用一定波谱范围内地物反射率近似线性的关系,以两端大气窗口波段来估算中心吸收波段的反射率,减小了误差.

图 4(a)和图 5(a)结果对比显示:双通道比值法反演结果值波动较大,平均误差 16.1%;三通道比值法结果相对稳定,平均误差 14.3%,均优于胡秀清等^[15]以探空值检验卫星反演值 20% ~ 30% 的误差.说明三通道比值法中对下垫面反射率的计算较双通道比值法更接近真实情况,下垫面反射率与波长基本成线性关系.为了进一步证明,下面对由窗区通道地表反射率估算 940 nm 通道地表反射率的

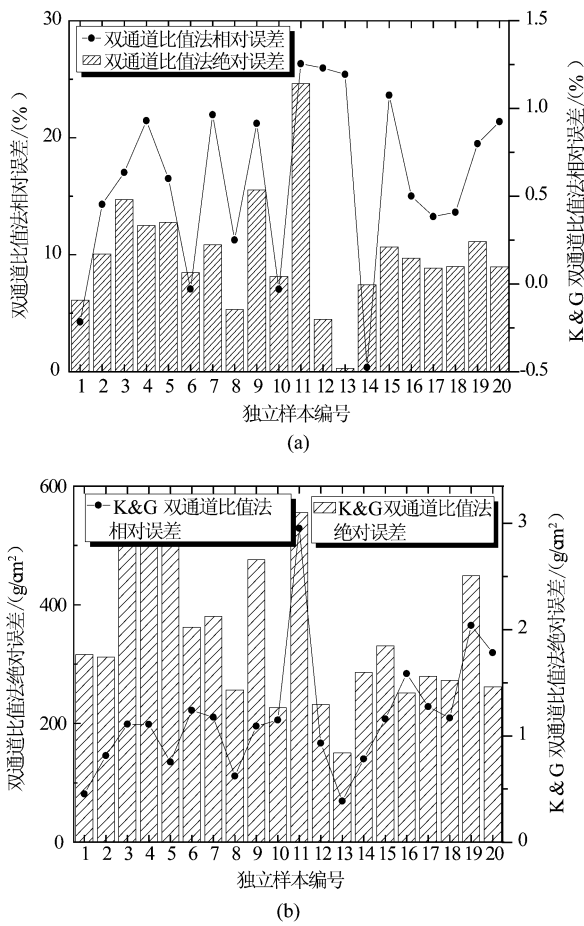


图4 双通道比值法误差分布图
Fig. 4 Error distribution of two-channel ratio method

两种方法,即双通道比值 940 nm 反射率与 865 nm 反射率相等,比值 = $\rho_{0.94}^*/\rho_{0.865}^*$;三通道比值 865 nm 和 1030 nm 的反射率按波长做线性插值得到 940 nm 的反射率,即比值 = $\rho_{0.94}^*/(c_1\rho_{0.865}^* + c_2\rho_{1.03}^*)$ 进行比较分析,结果如表 3 所示。

表 3 双通道比值与三通道比值结果对比
Table 3 The comparison of 2-channel ratio and 3-channel method

	最小值	最大值	均值	标准偏差
双通道比值	0.21495	0.6781	0.38047	0.10466
三通道比值	0.22287	0.68434	0.38421	0.10118

由表 3 可见,两种方法值域相当,三通道比值均值略高于双通道比值,标准偏差则是三通道比值稍低.这说明在 940 nm 附近把遥感目标的反射率视为随波长作线性变化,即用 940 nm 附近两窗区通道反射率线性差值来近似 940 nm 波段处反射率是可行的,而且能明显降低地表反射率的影响.避免了双通道比值以 865 nm 通道反射率替代 940 nm 通道反射

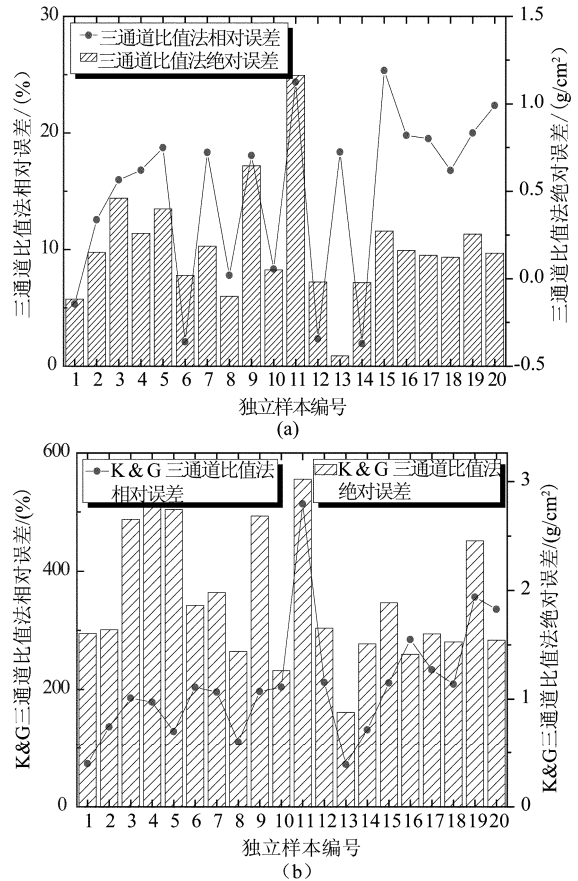


图5 三通道比值法误差分布图
Fig. 5 Error distribution of three-channel ratio method

率所引入的误差,这也是在其余输入参数相同条件下,三通道比值法反演结果优于双通道比值法的原因.这与 Kaufman & Gao^[2]的研究结果一致。

对式(7)两边取微分可得:

$$\Delta m = (2\sqrt{m}/A)\Delta r - (2\sqrt{m}/A(\sqrt{m}\Delta A + \Delta B)), \quad (14)$$

式(14)表明^[15-17]:卫星资料误差和反演系数的误差是主要的误差来源.而卫星资料引入的误差取决于吸收通道辐亮度和窗区通道辐亮度误差间的差值.实际上,误差的主要来源可能是:(1)定标误差.Kaufman 等认为,当仪器的定标精度为 1% 或更高时,相应的水汽反演误差可达到 2% ~ 4%,但对于真实仪器定标,精度较高时也只有 3% ~ 5%.(2)CE-318 探测值本身也有误差,所以用作检验的水汽值并不等于真值,与反演的水汽量之间会有偏差.(3)气溶胶及薄云的干扰在公式推导中假定含量极少,但实际应用中含量变幅很大,引起的误差也是不能忽略的.薄云覆盖的下垫面反射率偏离真实值,对计算结果也有影响.(4)混合像元引起的误差.大气水汽含量变率很大,CE-318 点观测数据与 MERSI

1km 空间分辨率的辐射均值匹配,不可避免的引起误差。

4 结论

基于 FY-3A MERSI 卫星数据与 CE-318 观测资料实现了利用卫星太阳反射光通道建立 FY-3A 大气水汽含量反演算法,将该算法用于研究区实际应用并利用独立样本检验了反演结果。得到以下结论:

(1)利用 MERSI 近红外通道建立的双通道比值法和三通道比值法均可用于大气水汽含量的反演,反演模型为 $\tau_w = \exp(B + A\sqrt{m})$, $A < 0$ 。

(2)通过结果对比显示,改进后算法较之前经典参数反演结果误差有较大改善,三通道比值法优于双通道比值法,将反演误差由 16.1% 提高到 14.3%。

目前,对卫星反演结果的检验数据不够充分,时间序列也不够完整,算法有待优化。且研究中发现,下垫面反射率对反演结果影响极大。我国幅员辽阔,地形复杂多样,南北物候期各具特征,因而地表反射率变化明显,若将不同地区,不同季节数据分别分析建立各局地化算法,大气水汽反演精度将大幅提升,这也是本研究下一步深入的方向。相信随着 FY-3A 卫星数据及 CE-318 同步观测数据的不断积累,算法稳定性及精度会稳步提高。

致谢

感谢国家卫星气象中心提供 FY-3A 卫星数据资料。

REFERENCES

- [1] Frouin R, Deschamps P Y, Lecomte P. Determination from space of atmospheric total water vapor amounts by differential absorption near 940nm: theory and airborne verification [J]. *J. Appl. Meteor*, 1990, **29**(6): 448 - 460.
- [2] Kaufman Y J, Gao B. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, **30**(5): 871 - 884.
- [3] Gao B C, Goetz A F H. Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**(D4): 3549 - 3564.
- [4] Carrère Veronique, Conel J E. Recovery of atmospheric water vapor total column abundance from imaging spectrometer data around 940 nm - sensitivity analysis and application to Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1993, **44**(2-3): 179 - 204.
- [5] Jedlovec, Gary J. Precipitable water estimation from high-resolution split window radiance measurements [J]. *J. Appl. Meteor*, 1990, **29**(9): 863 - 877.
- [6] Serrano L, Ustin S L, Roberts D A, et al. Deriving water content of chaparral vegetation from AVIRIS data [J]. *Remote Sens Environ*, 2000, **74**(3): 570 - 581.
- [7] Kleidman R, Kaufman Y J, Remer L A, et al. Remote sensing of total precipitable water vapor in the near-IR over Ocean Glint [J]. *J. Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(17): 2657 - 2660.
- [8] HUANG Yi-Bin, DONG Chao-Hua, FAN Tian-Xi. Using the information of spacecraft SHEN ZHOU-3 moderate resolution imaging spectrometer to retrieve atmospheric water vapor [J]. *Journal of Remote Sensing* (黄意玢,董超华,范天锡. 用神舟三号中分辨率成像光谱仪数据反演大气水汽. *遥感学报*), 2006, **10**(5): 742 - 748.
- [9] ZHANG Gong, XU Jian-Min, HUANG Yi-Bin. Remote sensing of total column precipitable water vapor with two sun reflectance channels of FY-1C satellite [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (张弓,许健民,黄意玢. 用 FY-1C 两个近红外太阳反射光通道的观测数据反演水汽总含量. *应用气象学报*), 2003, **14**(4): 385 - 394.
- [10] HU Xiu-Qing, HUANG Yi-Bin, LU Qi-Feng, et al. Retrieving precipitable water vapor based on the Near-infrared data of FY-3A satellite [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (胡秀清,黄意玢,陆其峰,等. 利用 FY-3A 近红外资料反演水汽总量. *应用气象学报*), 2011, **22**(1): 46 - 56.
- [11] MAO Ke-Biao, QIN Zhi-Hao, WANG Jian-Ming, et al. Lowtran retrieval of atmospheric water content and transmittance computation of MODIS band 31 and 32 [J]. *Remote Sensing for Land & Resources* (毛克彪,覃志豪,王建明,等. 针对 MODIS 数据的大气水汽含量反演及 31 和 32 波段透过率计算. *国土资源遥感*), 2005, (1): 26 - 29.
- [12] Albert P, Bennartz R, Preusker R, et al. Remote sensing of atmospheric water vapor using the moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2005, **22**: 309 - 314.
- [13] Hasen JE, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres [J]. *Space Sci. Rev.*, 1974, **16**(4): 527 - 610.
- [14] Fraser RS, Kaufman YJ. The relative importance of aerosol scattering and absorption in remote sensing [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, **GE-23**(5): 625 - 633.
- [15] LI Wan-Biao, LIU Ying-Hui, ZHU Yuan-Jing. Retrieval of atmospheric precipitable water with GMS-5 infrared measurements [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (李万彪,刘盈辉,朱元竞. GMS-5 红外资料反演大气可降水. *北京大学学报(自然科学版)*), 1998, **34**(5): 632 - 638.
- [16] Gao B C, Montes Marcos J, Li R R, et al. An atmospheric correction algorithm for remote sensing of bright coastal waters using MODIS land and ocean channels in the solar spectral region [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2007, **45**(6): 1835 - 1843.
- [17] SHI Chun-Xiang, XIE Zheng-Hui. Operational method of total precipitable water retrieved from satellite multi-channels infrared data [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (师春香,谢正辉. 卫星多通道红外信息反演大气可降水业务方法. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(4): 304 - 308.