

利用 MODIS 反演渤海地区的大气水汽含量*

孔梅^{1,2} 黄海军¹ 高兴国³ 毕海波¹

(¹中国科学院海洋研究所海洋地质与环境科学重点实验室, 青岛 266071)

(²中国科学院研究生院, 北京 100049)

(³国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061)

大气可降水量对于研究水循环、气溶胶属性、气溶胶-云的相互作用、能量守恒以及气候有重要意义,同时大气中的水汽含量也是影响遥感应用的主要因素之一。MODIS 是新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,具有 36 个光谱通道,分布在 0.4~14 μm 的电磁波谱范围内,MODIS 仪器的地面分辨率分别为 250m、500m 和 1000m,每隔一天或两天可以获得全球最新的数据。Gao 等(1998)、Kaufman 等(1990, 1992)经过大量研究表明,比值法可以反演大气可降水量,姜立鹏等(2006)、代强玲等(2008)通过两通道比值法和三通道比值法分别进行了水汽的反演,反演结果较好。本文作者参考以往学者的反演思想,探讨了 MODIS 近红外波段反演大气降水量的算法并进行了改进,同时通过与三维气象场的水汽信息进行比较,检验了水汽反演的精度。

一、大气水汽含量反演方法

1. 大气透过率的获取

太阳辐射传输到地表之后又被反射到大气,在这个过程中大气水汽要对其进行吸收。垂直方向上的总的大气可降水量,可通过比较在大气吸收通道和临近的非大气吸收通道处反射的太阳辐射之比获得。采用比值法可部分消除因地表反射率随波长变化而对水汽透射率造成的影响。近红外水汽反演的理论基础是近红外的辐射传输方程

$$L_{\text{sensor}} = L_{\text{sun}}(\lambda)\rho(\lambda)\tau(\lambda) + L_{\text{path}}(\lambda) \quad (1)$$

式中, λ 为 MODIS 对应通道的中心波长; L_{sensor} 为卫星传感器接收到的总辐射率; $L_{\text{sun}}(\lambda)$ 为大气顶层的人射太阳辐射率; $\rho(\lambda)$ 为地表的反射率; $\tau(\lambda)$ 为总大气透过率,即从大气层顶到地表,再从地表到传感器的透过率; $L_{\text{path}}(\lambda)$ 为大气传输路径上的辐射率。

在近红外光谱区,气溶胶光学厚度很小, $L_{\text{path}}(\lambda)$ 也非常小,与 L_{sensor} 相比,大气传输路径上的辐射率 $L_{\text{path}}(\lambda)$ 就可以忽略不计。因此,式(1)可以简化为

$$L_{\text{sensor}} = L_{\text{sun}}(\lambda)\rho(\lambda)\tau(\lambda) \quad (2)$$

* 通讯作者:孔梅(1985—),女,硕士生,研究方向:海洋遥感与地信;E-mail: km2003@163.com。
收稿日期:2008年10月。

由式(2)得

$$\tau(\lambda) = L_{\text{sensor}} / L_{\text{sun}}(\lambda) \rho(\lambda) \quad (3)$$

从式(3)可知, 大气水汽的含量主要是大气水汽透过率的函数。Gao 和 Yoram (1998) 经过大量的研究表明, 在 0.85~1.25 μm 的各种地物反射率基本上满足线性关系。且对于研究区——渤海, 下垫面几乎全为海水。海水的反射率在 1 μm 左右很小, 且基本上不随波长变化, 因此水汽的透射率就可以通过一个吸收通道与一个窗区通道的比值得到, 此即两通道比值法。在窗区通道 0.84~0.88 μm , 0.99~1.07 μm 和 1.22~2.16 μm 波段区间大气水汽透过率几乎为 1。表观反射率 $\rho^*(\lambda) = L_{\text{sensor}} / L_{\text{sun}}(\lambda)$, 因此两通道比值法计算公式为

$$\tau(0.940) = \rho^*(0.940) / \rho^*(0.865) \quad (4)$$

三通道比值法计算公式为

$$\tau(0.940) = \rho^*(0.940) / [C_1 \rho^*(1.240) + C_2 \rho^*(0.865)] \quad (5)$$

式中, $C_1=0.2$, $C_2=0.8$ 。

这两种方法的思想基本是一样的, 都是利用大气水汽吸收波段与大气窗口波段的比值与大气水汽含量的关系来求解水汽含量。与两通道比值法相比, 三通道比值法增加了一个大气窗口波段, 在一定程度上减少了地面反射率的影响。但是在 1.24 μm 处, 海水的反射率浮动相对较大, 且受到水汽和 CO_2 的重叠吸收影响, 会引入新的误差, 所以文中放弃使用 5 通道 (1.230~1.250 μm)。反演时窗区通道选中心波长位于 0.865 μm 的 2 通道, 水汽吸收通道利用中心波长为 0.905 μm 、0.936 μm 、0.940 μm 的 17、18、19 通道。

2. 改进的两通道算法

实际情况中, 水汽窗口通道 (2 通道) 的大气透过率并不等于 1, 因此需要对两通道比值法进行改进。通过采用 MODTRAN 4.0 模拟, 我们发现 2 通道处的大气透过率随着传感器视角的增大而减小, 且对于每一个传感器视角, MODIS 第二通道的大气透过率是恒定的。我们参考姜立鹏等 (2006) 的思想, 根据传感器视角将其分为 8 个区间, 其具体取值见表 1。

表 1 不同视角条件下 MODIS 第二通道的大气透过率

视角 θ ($^\circ$)	0~15	15~25	25~35	35~41	41~47	47~51	51~53	53~55
(0.865)	0.820 16	0.810 22	0.791 09	0.795 42	0.735 83	0.699 18	0.668 19	0.641 46

由于在传感器视角比较大时, 大气透过率随传感器视角的变化比较大, 所以区间的宽度相对较窄。整个区间的值用区间中部的大气透过率代表, 如 35 $^\circ$ ~41 $^\circ$ 的值用视角 38 $^\circ$ 处的值代替。

则两通道比值法改进为

$$\tau(0.940) = \tau_\theta \rho^*(0.940) / \rho^*(0.865) \quad (6)$$

式中, τ_θ 为 2 通道在视角 θ 处的大气透过率。

3. 大气可降水量的获取

大气可降水量与大气水汽透过率的关系可以通过 MODTRAN、LOWTRAN 和 6S 模型来模拟其表达式。Gao 等(1990)、Kaufinan 等(1992)通过大量的实验利用 LOWTRAN 模型模拟两通道比值法与大气可降水量的关系表达式

$$\tau(\lambda) = \exp(\alpha - \beta\sqrt{w}) \quad R^2=0.999 \quad (7)$$

解上式方程得大气可降水量表达式

$$w = \left\{ \frac{\alpha - \ln \tau(\lambda)}{\beta} \right\}^2 \quad (8)$$

对于复合性的地表, 式中 $\alpha=0.02$, $\beta=0.651$ 。

4. 加权平均法计算水汽含量

结合渤海地区的情况, 单一通道大气水汽值不能很好地呈现出该地区的大气水汽分布状况, 这主要是由于这 3 个通道在相同的气候下对水汽有不同的敏感性。因此不能将 17、18、19 任意单一通道大气水汽值作为实验结果, 有必要对其取加权平均, 即

$$w = f_{17}w_{17} + f_{18}w_{18} + f_{19}w_{19} \quad (9)$$

式中, w 为加权平均大气可降水量; w_{17} 、 w_{18} 、 w_{19} 分别为由 17、18、19 通道反演的大气可降水量; f_{17} 、 f_{18} 、 f_{19} 分别为 17、18、19 通道的权重函数, 权重函数是基于在 17、18、19 通道上大气水汽透过率 $\tau(i)$ 对总的大气可降水量 w 的灵敏度

$$\eta_i = |\Delta\tau(i)/\Delta w| \quad (10)$$

权重函数 f_i 定义为 η_i 的归一化值

$$f_i = \eta_i / (\eta_{17} + \eta_{18} + \eta_{19}) \quad (11)$$

在实际计算中, 权重函数可用大气透过率对大气可降水量求一阶导数得到, 即

$$\eta_i = \beta \exp(\alpha - \beta\sqrt{w_i}) / (2\sqrt{w_i}) \quad (12)$$

二、大气水汽反演实验与结果分析

1. 数据处理

渤海是我国最大的超浅型内海, 位于 $37^{\circ}07' \sim 41^{\circ}0'N$ 、 $117^{\circ}35' \sim 121^{\circ}10'E$ 。根据文中讨论的方法, 对渤海地区上空气中的大气水汽含量进行反演。使用的数据是 2008 年 10 月 1 日 MODIS1B 数据, 可以从网站 (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>) 下载得到。首先根据改进的两通道算法[式(6)], 计算出 17、18、19 通道的大气透过率; 然后根据大气透过率与大气水汽的关系[式(8)], 计算出各个通道的水汽含量; 最后加权计算[式(9)], 得到水汽含量的加权平均值。用 IDL6.0 编程实现。

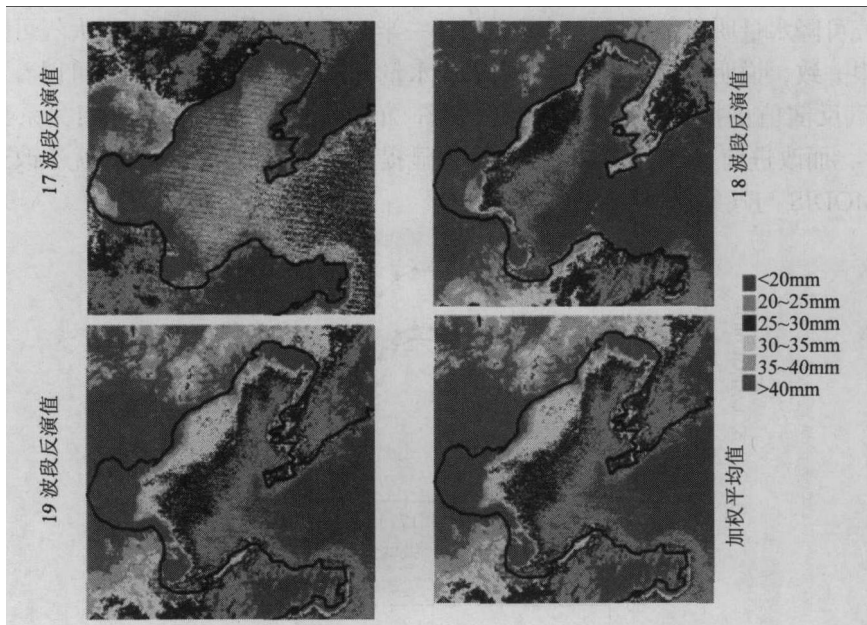


图 1 17、18、19 通道水汽值和加权平均水汽值

从图 1 中可以看出, 各个通道之间大气水汽含量值相差较大, 且结合渤海地区的气候情况, 我们认为单一通道大气水汽值均不能很好地呈现出该地区的大气水汽分布状况, 这主要是由于这 3 个通道在相同的气候下对水汽有不同的敏感性(18 通道对水汽最敏感, 19 通道次之, 17 通道最不明显)。因此不能将 17、18、19 任一单一通道大气水汽值作为实验结果, 有必要对其取加权平均。从图 1 中还可以看出, 加权平均水汽值不管是在低水汽含量区, 还是在高水汽含量区, 几乎每个像元值都不一样, 能较好地反映大气水汽含量的细微变化; 与单一通道大气水汽含量相比, 加权平均水汽值更能反映该地区的水汽分布。

2. 反演结果与气象预报信息比较

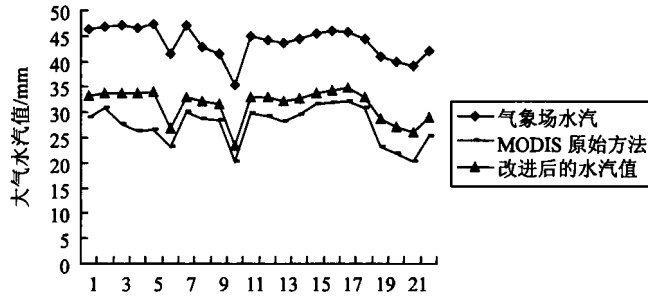
反演结果的检验是利用三维气象预报信息, 由国家海洋环境预报中心提供, 气象场的产生采用了目前世界上先进的中尺度气象模式 MM5。利用渤海湾的三维气象场数据计算不同方位和高度水汽延时, 得到映射函数值, 从而计算得到不同方位和高度大气水汽含量。该水汽数据的精度很高, 与地面实际降雨量有很强的相关性, 可作为气象预报信息。

MODIS 影像的时间是 2008 年 10 月 1 日上午 11:25, 由于气象场数据是解算每两个小时的大气值, 所以选取 12:00 的天顶方向水汽值检验 MODIS 的反演值。在渤海地区以 39°N、120°E 为中心, 均匀选取 22 个点。

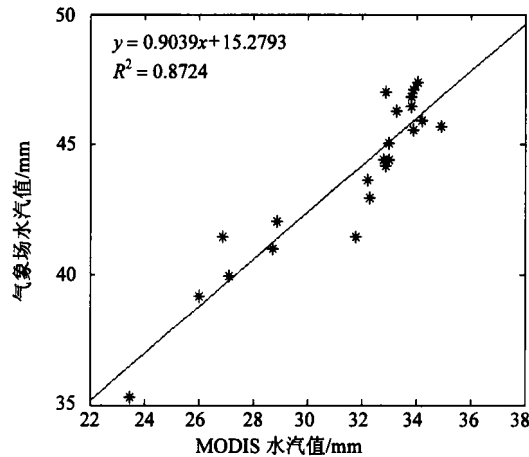
为了降低误差, 在气象点对应的像元周围取微小区域, 并对其像元值求平均, 该平均值代表以气象点为中心的微小地区的大气可降水量。

图 2 给出了渤海地区 MODIS 反演的大气可降水量与三维气象场数据之间的对比情况和散点图。从图 2 中可以看出, MODIS 反演值与气象场水汽值之间的差别很大, MODIS

像元大气可降水量明显偏低,有时几乎相差一半,但是两种遥感手段的大气可降水量变化趋势很一致,说明 MODIS 反演大气可降水量是可行的。从图 2 中还可以看出,改进后的水汽反演值更接近于水汽的真实值[图 2(a)],并且两者之间的相关系数达到了 87.24%,而改进前只有 78.6%,相关性明显提高,因此改进后的方法优于改进前。图 2(b)是 MODIS 与气象场值的散点图。



(a) MODIS 反演值与气象场水汽值比较图



(b) MODIS 与气象场值的散点图

图 2 MODIS 反演值与气象场数据比较图、散点图

三、结 论

本文作者探讨了 MODIS 近红外波段反演大气水汽含量算法思想-比值法,并结合研究区的海水反射率特性,放弃使用 5 通道(1.230~1.250 μm),减少了所涉及的光谱范围,从而减少了地表反射率变化太大引起的误差。文中没有像以往一样,将水汽窗口通道的大气透过率简单的假定为 1,而是根据传感器的视角,将其分成不同的区间进行模拟,得到 2 通道处的大气透过率,对两通道比值法进行了改进。通过与三维气象场数据进行对比,计算两者之间的关系式和相关系数,由此可以看出:利用 MODIS 影像反演大气水汽含量是可行的,并且改进后的水汽反演算法精度更高,相关性更好。但是 MODIS 近红外通道反演也有一定的局限性:当气溶胶光学厚度在可见光波段上大于 0.3 时,在近红外水汽反演中需要考虑气溶胶的影响,不能忽略路径辐射 L_{path} 的影响;此外,在大

气窗区通道, 大气透过率并不等于 1; 在有云区域还要考虑云的影响。这些问题将在进一步研究中考考虑。

参 考 文 献

- 代强玲, 刘良明, 文雄飞. 2008. 基于 MODIS 数据的大气水汽反演算法研究. 遥感技术与应用, 23 (3) :214-289
- 姜立鹏, 覃志豪, 谢雯. 2006. 针对 MODIS 近红外数据反演大气水汽含量研究. 国土资源遥感, (3): 56-66
- 刘玉洁, 杨忠东. 2001. 遥感信息处理原理与算法. 北京: 科学出版社. 70-110
- 毛克彪, 覃志豪. 2004. 用 MODIS 影像反演环渤海地区的大气水汽含量. 遥感信息, (4): 47-49
- 赵有兵, 顾利亚, 黄丁发等. 2008. 利用 MODIS 影像反演大气水汽含量的方法研究. 测绘科学, 33 (5): 67-80
- Gao B C, Yoram J K. 1998. Algorithm technical background document: the MODIS near-IR water vapor algorithm. [http://www.gsfc.nasa.gov/modis-atmosphere/-docs/atbd-mod03, pdf](http://www.gsfc.nasa.gov/modis-atmosphere/-docs/atbd-mod03.pdf)
- Gao B C, Geotz A F H. 1990. Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging Spectrometer data. Journal of Geophysical Research, 95 (D4): 3549-3564
- Kaufman Y J, Gao B C. 1992. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 30 (5): 871-884

Retrieving Atmospheric Water Vapor in Bohai Region from MODIS Data

KONG Mei^{1,2} HUANG Haijun¹ GAO Xingguo³ BI Haibo^{1,2}

(¹ Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071)

(² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(³ The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061)

ABSTRACT

To analyze the reflectance of seawater, MODIS channel centered at 1.24 μm is excluded, as it reduces the spectrum range and minishes the error in water vapor retrieving. In this paper, transmittance in the window channel is not assumed one as usual. An improved two-band ratio method is developed and tested for retrieving water vapor in Bohai Sea region. Compared with the 3D meteorological field data, the results show that the method is feasible and practical.