



## 论文

# 基于多源遥感数据陆面大气水汽反演的物理统计算法研究

王永前<sup>①②③\*</sup>, 施建成<sup>③</sup>, 王皓<sup>④</sup>, 冯文兰<sup>①</sup>, 王雁君<sup>①</sup>

① 成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225;

② 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147;

③ 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101;

④ 成都信息工程大学电子工程学院, 成都 610225

\* E-mail: wyqq@cuit.edu.cn

收稿日期: 2015-06-24; 接受日期: 2015-10-26; 网络版发表日期: 2015-12-21

国家自然科学基金项目(批准号: 41471305, 41405036, 41301653)、四川省杰出青年科技基金培育项目(编号: 2015JQ0037)和重庆市气象局开放基金项目(编号: KFJJ-201402)资助

**摘要** 大气水汽对全球以及区域气候变化有着极其重要的影响, 因而精确的获取水汽数据一直是非常重要的研究课题. 单一传感器的遥感水汽反演算法有一定的局限, 本文致力于发展一个基于多源遥感数据的水汽反演物理统计算法, 该算法还能有效解决有云情况下的水汽反演. 通过将晴空条件下近红外水汽反演结果与基于微波 23.8 GHz 的水汽敏感波段的组合指数进行回归, 再将将有云覆盖区域的微波指数代入到回归反演模型, 从而获得有云覆盖条件下的水汽结果, 实现有云条件下的水汽反演, 对基于光学波段的水汽反演结果进行补充. 不同的地表覆盖会对裸土表面的微波辐射有不同的影响作用, 本文的算法还利用地表覆盖数据有效消除了这一影响, 针对不同的地表覆盖, 分别进行回归模型的建立. 最后将该算法反演的结果与地基 GPS 的水汽监测数据进行对比, 有云条件下的均方根误差为 8 mm, 且利用本算法可以较好的对光学数据进行补充, 具有良好的空间一致性.

**关键词** 卫星遥感, 大气水汽, 可见光-近红外, 热红外, 微波

## 1 引言

水汽在很多的地质研究中有着非常重要的地位. 首先, 水汽及其变化是天气和气候的主要驱动力, 是预测降雨、中小尺度恶劣天气以及全球变化的一个非常重要的物理量(Raval和Ramanathan, 1989; Dessler

等, 2008), 影响着辐射平衡、能量输送、云的形成和降水等. 在数值天气预报模型中, 精确的水汽初始值非常关键(Smith等, 2000; Nakamura等, 2004), 对于水汽时空变化比较激烈的地区, 准确的获取水汽的三维分布对数值天气预报有重要的影响. 同时, 水汽也是全球气候系统中起关键作用的温室气体(高凤玲等,

中文引用格式: 王永前, 施建成, 王皓, 冯文兰, 王雁君. 2016. 基于多源遥感数据陆面大气水汽反演的物理统计算法研究. 中国科学: 地球科学, 46: 43-56, doi: 10.1360/N072015-00159

英文引用格式: Wang Y Q, Shi J C, Wang H, Feng W L, Wang Y J. 2015. Physical statistical algorithm for precipitable water vapor inversion on land surface based on multi-source remotely sensed data. Sci China Earth Sci, 58: 2340-2352, doi: 10.1007/s11430-015-5211-6

2013; Solomon等, 2007). 其次, 水汽也是影响遥感应用的主要因素之一, 在地表温度反演、遥感影像的大气校正中, 水汽的影响不可忽略(李小凡等, 2009; Eric等, 2002). 另外, 对流层的大气水汽会对在大气中传播的电磁波信号产生延迟, 因此, 利用相位信息进行地学研究的相关卫星, 包括全球定位系统(GPS)(Solheim等, 1999)、甚长基线干涉测量(VLBI)(Treuhaft和Lanyi, 1987)、星载高度计(Desportes等, 2007)、合成孔径干涉雷达(InSAR)(Onn和Zebker, 2006)等, 水汽是主要的误差源. 因此, 获取高时空分辨率的水汽数据一直都是有关研究的热点.

从技术手段上来分类, 大气水汽的探测方法可以分为探空气球、地基遥感、卫星遥感以及数值模拟等. 大气水汽的地基遥感反演是和卫星遥感的大气水汽反演相对而言, 指的是利用安置在地表的设备仪器进行大气水汽的探测. 利用地基遥感方法进行大气水汽探测的传感器, 主要有GPS接收机(Wolfe和Gutman, 2000)、太阳光度计(Firsov等, 2013)、地基微波辐射计(Turner等, 2007)以及激光雷达(Cooney, 1970). 地基法的水汽探测基于地表向上观测, 不受复杂地表辐射和反射信息的影响, 因此其水汽探测精度普遍较高. 但该方法只能进行点观测, 空间覆盖度和分辨率比较低, 且数量有限, 成本较高. 由于不同测量原理会产生特定的系统偏差, 因此, 不同仪器的观测结果会有差异. 而且, 不同仪器观测结果均需要进行辐射定标, 各自定标的准确度也是造成反演水汽总量不一致的重要原因. 在应用上, 基于点观测的地基法反演水汽产品也不能准确客观的反映水汽在水平尺度上的梯度变化, 而这些变化在云、降雨以及辐射平衡的研究中起着非常关键的作用.

卫星遥感把传统的“点”测量方法获取有限代表性的信息扩展为更加符合客观世界的“面”信息(区域信息), 从而可以实现高效快捷的获取大气水汽时空分布信息. 目前基于各种传感器遥感数据的水汽反演方法有很多种. 根据所利用遥感数据波段的不同, 可以分为热红外、可见光-近红外和微波遥感水汽反演3种. 其中, 利用水汽在0.94和1.14  $\mu\text{m}$ 波段的吸收作用反演大气水汽具有较高的精度, 在大气水汽的卫星遥感反演中有着广泛应用. MODIS提供了基于近红外波段的水汽产品(Gao和Kaufman, 2003), 该产品利用近红外大气水汽吸收比较强烈的波段和大气

窗口波段的比值进行大气水汽的反演. 通过比值的形成, 可以消去部分地表信息的影响, 从而将大气透过率推导过程中地表干扰因素的影响降到最低. 搭载在ENVISAT上的中分辨率成像分光计(MERIS)设置了0.94  $\mu\text{m}$ 附近的通道, 有研究利用其进行水汽反演(Bennartz和Fischer, 2001). 中国在1999年发射的FY-1卫星上的扫描辐射计也设置了0.94  $\mu\text{m}$ 水汽通道, 并用于水汽反演(张弓等, 2003). 2002年神州三号飞船上搭载的中分辨率成像光谱仪同样也设置了0.94  $\mu\text{m}$ 通道(黄意玢等, 2006). 2008年发射的FY-3A卫星上搭载的MERSI延续设置了水汽近红外吸收通道, 用于水汽反演(胡秀清等, 2011). 于2008年发射的环境与减灾小卫星HJ的传感器也设置有丰富的水汽通道, 王丽美(2009)利用HJ-1-A卫星上搭载的超光谱传感器(HIS)的近红外通道发展了晴空条件下陆地地表上空的大气水汽反演算法.

可见光-近红外波段反演的大气水汽受天气影响比较严重, 对边界层的水汽也不敏感(Mario等, 2012). 而且, 近红外数据只能白天成像, 不适用于夜间的水汽反演, 有云时还只能反演云层上的水汽含量(刘玉洁和杨忠东, 2001). 因此, 卫星遥感反演大气水汽在时间尺度上往往不能满足很多应用需求.

最早利用红外波段数据进行大气水汽反演, 主要是利用单通道的热红外水汽敏感波段的辐射信息. 随着遥感数据波段数的增加, 越来越多的研究人员采用分裂窗技术进行水汽的反演. 分裂窗算法最早用于地表参数遥感反演的主要假定是将温度差用普朗克函数线性近似表达和对大气水汽吸收作线性近似(徐希儒, 2005). 分裂窗算法经过改进, 可以用于大气水汽的反演, 通过分裂窗技术可以有效的减少地表温度的影响. NOAA系列卫星上的AVHRR(高级甚高分辨率辐射仪)(Eck和Holben, 1994)、美国静止气象卫星GOES(静止环境观测卫星)上的VAS(可见光红外自旋式大气探测仪)(Knabb和Fuelberg, 1997)、欧洲静止气象卫星MSG上的SEVIRI(旋转增强可见光红外成像仪)(Schroedter等, 2008)、AQUA和TERRA卫星上的MODIS(中分辨率成像光谱仪)等探测仪器均具有这样的分裂窗通道. 针对 AVHRR 观测资料, 已经提出了许多的水汽反演算法. 这些算法中包括由Dalu(1986)提出的基于AVHRR 4和5通道的简单分裂窗算法, 由Jedlovec(1990)提出的方差比率算法, 由

Kevin等人(2002)提出的通过计算 AVHRR4、5通道间回归斜率的方法以及由Ottle等人(1999)提出的分裂窗协方差算法等. MODIS和AVHRR在热红外通道的设置上具有很大的相似性, 马克玲(2006)利用这一点也发展了针对MODIS的分裂窗水汽反演算法. 中国风云静止气象卫星搭载的红外自旋转扫描辐射计(VISSR)和MODIS在红外窗区水汽吸收通道的设置也比较接近, 因此基于FY-2系列卫星也可以用分裂窗法进行水汽反演(徐娜等, 2012).

除了两个通道的劈窗算法外, 利用一组透过率有差异的水汽吸收通道来反演水汽廓线, 是另一种大气水汽的热红外反演方法(Rodgers, 1976; 宋正方等, 1996). MODIS热红外波段的水汽反演也是利用迭代回归的方法得到大气湿度廓线, 然后将廓线积分得到水汽含量. 不过在MODIS热红外波段的水汽业务化产品中, 分裂窗方法也被用到(Menzel等, 2002; Seemann等, 2003). 由于廓线反演的复杂性, 基于物理算法反而精度不会很高, 因此近年来神经网络方法越来越多的被用于高光谱水汽廓线反演(刘旸和官莉, 2011). 该方法无需做任何关于数据分布的假定, 且神经网络具有很强非线性问题的处理能力, 发展前景非常好. 然而, 红外数据虽白天和晚上都可成像, 但热红外波段受地表热辐射的影响, 因此这类算法对底层大气水汽不太敏感.

虽然利用红外数据反演大气水汽的遥感技术取得了广泛的应用, 但是众所周知, 红外辐射无法穿透云层, 因此卫星红外遥感大气水汽只适用于晴空条件, 这是该方法的一个主要缺陷. 微波具有一定的穿透能力这一特点, 使得其在全天候大气水汽探测方面具有很大的发展潜力. 在微波波段中(1~300 GHz), 水汽在22.235和183.31 GHz处具有转动吸收谱线, 因此, 利用微波进行大气水汽的反演, 也多围绕着这两个波段展开.

和海洋表面相比, 复杂的地表发射率会增加反演的难度, 且较大的地表发射率会对大气信息有屏蔽, 因此陆地上空微波辐射计大气水汽反演一直处于探索阶段. Aires等(2001)对SSM/I数据利用神经网络的方法在陆地上同时反演大气水汽、云中液态水、地表温度和地表发射率, 最后在晴空和有云条件下反演大气水汽的精度分别为3.8和4.9 cm. 同样基于神经网络利用微波辐射计AMSR-E进行陆地上空水

汽反演的还有Stefania的研究(Stefania等, 2011). 在该研究中, 选取了ECMWF(欧洲中期天气预报中心)的水汽数据对神经网络进行训练. 反演结果显示, 在晴空条件下, RMS为0.3 cm左右; 在有云条件下, 则变为0.38 cm左右. AMSU-B的通道183 GHz位于水汽吸收线上, 利用AMSU的波段特性, AMSU数据被广泛应用于反演陆地上空的大气水汽. Liu等(2005)发展了利用AMSU数据反演大气温度、大气水汽和云中液态水廓线的算法. Merritt(2007)发展了利用AMSR-E的18.7和23.7 GHz亮温极化差比值反演大气水汽的参数化模型, 该模型依靠的主要事实是18.7和23.8 GHz的地表发射率极化差之间的关系是线性不变的, 借此可以消去地表的辐射信息. Wang等(2012)也利用了AMSR-E的18.7和23.7 GHz亮温极化差比值反演水汽, 其所利用的参数化反演方法借助AIEM地表辐射模型准确的找出了两个波段地表发射率之间的线性关系, 结果更具有物理意义.

陆地上空星载微波辐射计的大气水汽反演算法目前还处于探索研究阶段, 还没有能够业务化的算法, 这主要是因为目前的水汽反演结果精度比较低, 其厘米级的精度和光学的毫米级精度相比要差很多. 出现这样结果的原因, 主要有两方面: 一方面是微波波段的地表发射率比较高, 地表的辐射信息容易屏蔽大气的辐射信息, 导致大气信息难以从卫星信号中剥离出来; 另一方面是目前星载微波辐射计的空间分辨率太低, 几十公里的空间分辨率严重的限制了星载微波辐射计数据更广泛的应用. 不过, 也有越来越多的研究致力于星载微波辐射计空间分辨率的提高(王永前等, 2011).

从以上的分析可以看出, 不管用哪种方法获取大气水汽都存在着优缺点. 因此, 在目前传感器多元化、数据累积时间长、单一算法精度的提高遇到瓶颈的情况下, 本文的研究关注如何综合利用各种数据源和技术手段, 获取高精度高时空分辨率的大气水汽数据.

## 2 数据源和数据处理

本文所使用的数据为搭载在AQUA卫星上的AMSR-E(高级微波扫描辐射计)提供的亮度温度数据和MODIS提供的瞬时大气水汽产品MYD05, MCD12土地覆盖产品, 以及MYD35云掩膜产品. AQUA是包

含在EOS(美国地球观测系统)观测平台上的其中一颗多功能观测卫星,它是太阳同步观测下午星.因为MODIS和AMSR-E同时搭载于AQUA卫星上,因此由这两种仪器获得的数据在时间和空间上具有一致性,避免了使用过程中可能出现的数据匹配误差.AMSR-E虽然在2011年因为天线的问题停止了服务,但是2012年5月份日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)发射的卫星搭载的微波辐射计(AMSR2)开始工作(Du等, 2015),AMSR2也设置有AMSR-E的水汽反演波段,因此,本文利用AMSR-E数据从长远的角度也非常有意义.

AMSR-E是一种被动式微波遥感仪.NASA提供了和AMSR-E数据相关的各种产品,本文利用L2A级亮温数据进行水汽反演.L2A产品包括各个波段的全球轨道空间重采样亮温产品以及辅助数据.该亮温产品存储了低分辨率轨道和高分辨率轨道数据.低分辨率亮温数据需重采样以符合观测的星下点视场像元大小.AMSR-E L2A全球数据每天有14或者15轨道(升/降轨道).由于不同频率的数据分辨率不同,因此在本文中所有的轨道产品数据使用算术平均方法投影到EASE-GRID(空间分辨率约为25 km×25 km)(Brodzik和Knowles, 2002).

MODIS大气水汽产品MYD05包含近红外水汽产品和红外水汽产品两种数据,还包括全球晴空条件下陆面上大气水汽含量、云层上的水汽含量以及洋面上太阳耀斑区的大气水汽含量(Charles和Yoram, 2004).大气水汽的反演是利用地表或云在MODIS近红外太阳反射辐射通道的测量值进行反演.原始资料来源于中心波长位于0.865, 0.905, 0.936, 0.940和1.24  $\mu\text{m}$ 的探测通道数据.选择水汽吸收通道(0.905, 0.936和0.94  $\mu\text{m}$ )与大气窗通道(0.865和1.24  $\mu\text{m}$ )的比值法作为反演方法.比值法的采用可以部分地消除由于地表反射率随波长变化而对大气中水汽透射率产生的影响.大气总水汽量利用辐射传输方程计算值与观测值间建立相应查照表的方法进行反演,反演误差一般为5%~10%,在暗的下垫面和有浮尘的环境背景中反演误差会增大(Michael等, 1992).

验证数据选择的是在北美地区设置的SuomiNet实验数据(Randolph等, 2000).SuomiNet实验在北美设置了一系列的站点,在每个站点都利用GPS信号进行大气水汽的反演,由于实测大气水汽数据的缺乏,利用GPS的反演结果对本文的算法进行验证,无疑是一

个很好的选择.

### 3 研究方法

#### 3.1 理论基础

目前能够获取的数据包括星载微波辐射计数据(SSM/I, AMSR, AMSR-E, TMI, AMSU, Winsat),极轨光学遥感影像(AVHRR, MODIS, VISR, TOVS, AIRS),还有静止气象卫星搭载的光学传感器(FY2-C, D, E星),这些传感器都设置有水汽敏感波段.如前文所述,目前针对光学遥感数据已经有相应的业务化水汽反演算法.以MODIS为例,Chen等(2008)将MODIS水汽反演结果和GPS水汽结果在美国进行了对比,结果显示,近红外水汽的均方根误差为3.3 mm. Gao等(2003)的研究结果表明,MODIS近红外波段的水汽结果的相对精度为5%~10%. Chang等(2013)对比了南加利福尼亚的MODIS近红外水汽产品数据和GPS水汽数据,均方根误差为2.06 mm. Liu等(2013)比较了在香港的MODIS近红外水汽产品和太阳光度计的水汽反演结果,相关系数为0.822,均方根误差为2.14 mm. Bennouna等(2013)比较了MODIS近红外水汽和GPS水汽在Iberian Peninsula的结果,均方根误差为3 mm. 上述所有关于MODIS近红外数据的比较验证结果都是在晴空的天气条件下,因此MODIS近红外的水汽数据在晴空条件下的精度能够满足相关地学应用,算法比较成熟.但是,全球大部分时间云层覆盖都处于40%~60%.有些区域,尤其是靠近赤道的热带地区,在很长的一段时间,可能延续几个月,均被云层覆盖.图1给出了基于AMSR-E过境覆盖2007年8月1日全球云雨和晴空天气情况的分类图.图中,红色区域为晴空,白色为云覆盖区域,黑色区域为降雨区域.表1给出了统计结果.从表1可以看到,无论是升轨还是降轨,全球陆地上空被云雨覆盖的区域都超过了一半.

但是近红外数据在有云时只能反演云层上部的水汽含量.因此,利用上述算法反演大气水汽虽然已得到了广泛的应用,但是都受天气影响.微波具有一定的穿透能力,这使得其在全天候大气水汽探测方面具有很大的发展潜力.水汽在微波波段22.235和183.31 GHz处具有转动吸收谱线,因此,利用微波进行大气水汽的反演也多围绕着两个波段展开.AMSR-E

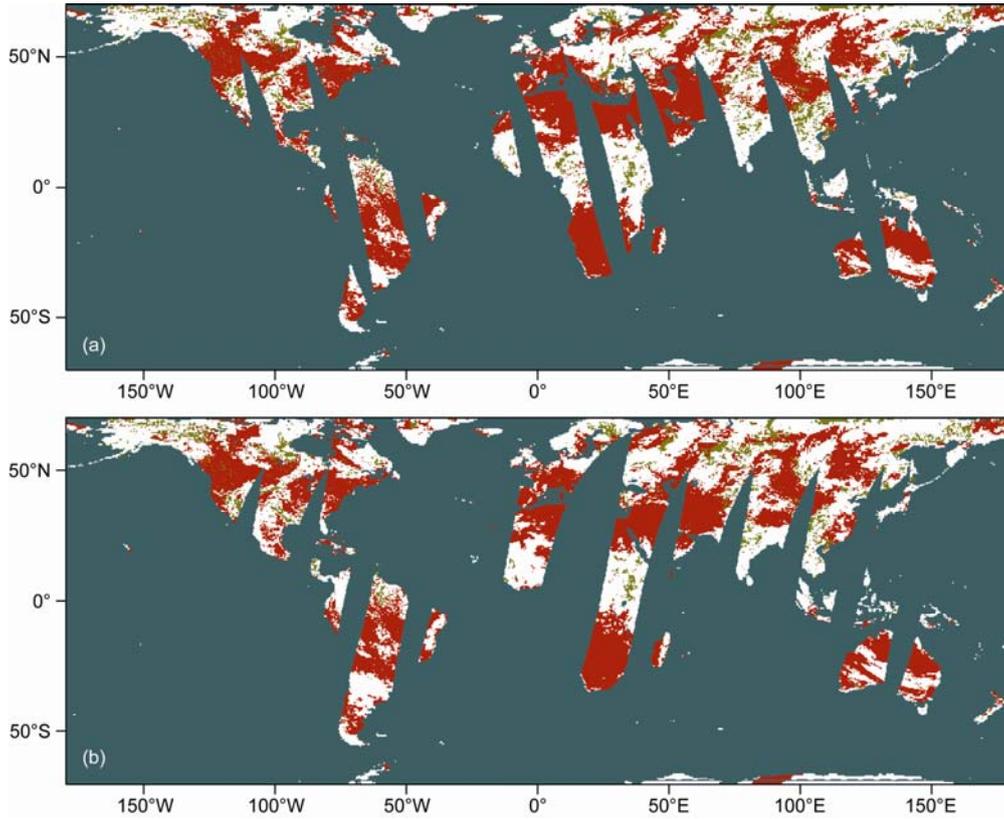


图1 2007年8月1日全球晴空、云以及雨分类图  
红色为晴空, 白色为云, 黑色为雨. (a) 升轨, (b) 降轨

表1 2007年8月1日全球晴空、云雨覆盖情况分类统计

	晴空(%)	云(%)	雨(%)
升轨	47.3480	46.0283	6.6237
降轨	48.2553	46.7805	4.9642

设置有23.8 GHz, 位于水汽22.235 GHz吸收线附近, 因此, 因其对水汽的敏感性可以被用于水汽的反演.

对于裸露地表, 已有研究表明, AMSR-E相邻波段的地表发射率呈高度线性关系(Chen 等, 2003; Shi 等, 2005, 2008). 利用这一线性关系, 可以将两个波段的极化差比值写为

$$\frac{T_{Bv}(f_1) - T_{Bh}(f_1)}{T_{Bv}(f_2) - T_{Bh}(f_2)} = b(f_1, f_2) \cdot \frac{\Gamma(f_1) \cdot T_s - \Gamma(f_1) \cdot T_a(f_1) \cdot (1 - \Gamma(f_1))}{\Gamma(f_2) \cdot T_s - \Gamma(f_2) \cdot T_a(f_2) \cdot (1 - \Gamma(f_2))}, \quad (1)$$

式中,  $b(f_1, f_2)$ 为AMSR-E相邻波段的地表发射率线性关系的斜率,  $T_{Bp}(f)$ 是频率为 $f$ 、极化为 $p$ 的亮温,  $T_s$ 为地

表温度,  $\Gamma(f, \theta)$ 为大气透过率,  $T_a(f, \theta)$ 为大气有效温度. 从式中可以看出, 微波辐射计相邻波段的极化差比值的式子可以有效的消除裸露地表的辐射信息, 保留大气信息.

裸露地表情况下, 影响地物目标辐射的地表参数包括地表粗糙度、土壤介电常数等. 地表粗糙度和土壤介电常数相互耦合在一起, 对地表辐射的微波信号的强度、极化产生影响. 微波辐射计进行大气水汽反演, 利用的信息为大气对地表辐射信息的去极化效应. 对于植被覆盖地表, 植被的存在也会对地表辐射信息的极化起削弱作用. 为了更准确地获得植被覆盖地表的地表发射率的关系, 我们利用MODIS提供的大气廓线产品数据和地表温度数据反演了植被覆盖下的微波波段的地表发射率(王永前等, 2013), 通过对23.8和18.7 GHz的地表发射率的极化差进行回归发现, 它们之间也存在着良好的线性关系(王永前等, 2015). 这样的线性关系使得对于植被覆盖区

域, 式(1)中微波辐射计相邻波段的亮温极化差比值仍然能够消除地表的辐射信息, 且保留大气信息.

综上所述, 不管是裸露地表, 还是植被覆盖地表, AMSR-E在18.7和23.8 GHz两个波段的亮温极化差比值除了包含地表温度信息以外, 主要对大气敏感. 因此, 从理论上可以说明, 利用AMSR-E的18.7和23.8 GHz两个波段的亮温极化差比值可以进行陆地上空的大气水汽反演.

### 3.2 算法推导

从物理原理上证明了18.7和23.8 GHz两个波段的亮温极化差比值可以用于水汽反演之后, 我们拟发展一个基于统计的反演算法, 算法的流程图如图2所示. 考虑到MODIS和AMSR-E同时搭载于AQUA卫星上, 因此二者在时空匹配上不存在问题. 晴空条件下, 基于MODIS近红外波段反演的大气水汽产品具有较高的精度, 因此将晴空条件下MODIS近红外水汽结果和AMSR-E的18.7和23.8 GHz两个波段的亮温极化差比值做回归分析, 得到水汽和极化差比值的关 系, 然后将该回归关系式用于有云条件下的基于AMSR-E的水汽反演, 从而得到全天候条件下的大气水汽产品数据.

在植被覆盖区域, 除了大气的辐射影响以外, 传感器接收到的辐射信息既包括植被层贡献, 也包括土壤表面的贡献. 由于植被层的存在, 引起土壤辐射量的衰减, 并引起由土壤辐射与植被自身辐射两者

的漫散射. 辐射的极化信息来自于地表土壤的辐射, 而在微波辐射计的一个像元内(本文为25 km×25 km), 植被的微波辐射信号是像元内所有植被覆盖种类对微波辐射信号综合作用的结果. 植被的粗糙度同样也会对植被的微波辐射信息产生影响, 但是不同种类的植被覆盖, 通过植被散射体的尺寸、形状和位置等不同特征对微波信号产生的平均影响. 可以认为, 植被对微波信号的影响没有显著的极化效应, 这个结论已被广泛的应用于植被被动微波遥感的研究领域中. 因此, 植被会对来自于地表土壤的极化辐射信号起去极化的作用. 植被在每年八月份生长得相对最为茂盛, 这个时期植被对于下层裸露地表辐射极化信息的去极化作用也最为强烈, 相应的大气的去极化作用就会被削弱. 因此, 从理论上推测, 在植被生长最茂盛的时候利用星载微波辐射计反演大气水汽是最困难的, 因为植被的去极化作用屏蔽了大气的去极化作用.

考虑到不同植被的去极化效应不一样, 我们根据MODIS的IGBP地表分类数据, 将地表分成16类. 在MODIS MYD35云掩膜产品的基础上, 回归了晴空条件下MODIS近红外水汽和AMSR-E的18.7和23.8 GHz亮温极化差比值的关 系, 结果如表2所示.

表2给出了由经验统计算法得到的大气水汽反演线性回归模型. 经过分类后的水汽数据与亮温极化差比值之间具有非常明显的线性关系, 并且地表越接近于裸地覆盖, 相关性越高, 在植被覆盖比较茂密的森林地区, 回归结果的相关系数比较低. 这也验证了前文的推论, 即植被的去极化作用会屏蔽大气水汽的去极化作用, 从而影响水汽反演的精度. 在城市覆盖地区和耕地地区, 出现了夏季的相关性比冬天高的情况, 因为城市区域的地表辐射特性受植被影响比较小. 对于耕地, 可能是受到作物收割的影响导致地表辐射信息出现变化. 总体来说, 冬季的相关性高于夏季. 冬季植被较夏季要稀疏, 因此裸土辐射的微波极化信号受植被的影响相对较少, 极化信息能够更好地保留大气信息, 从而相关性也好于夏季植被茂密的时期.

为了研究18.7和23.8 GHz的亮温极化差比值对大气参数的敏感性, 利用辐射传输模型模拟了AMSR-E参数框架下的亮温. 地表输入参数是AIEM模拟的地表发射率数据库, 大气廓线参数来自NOAA提供的

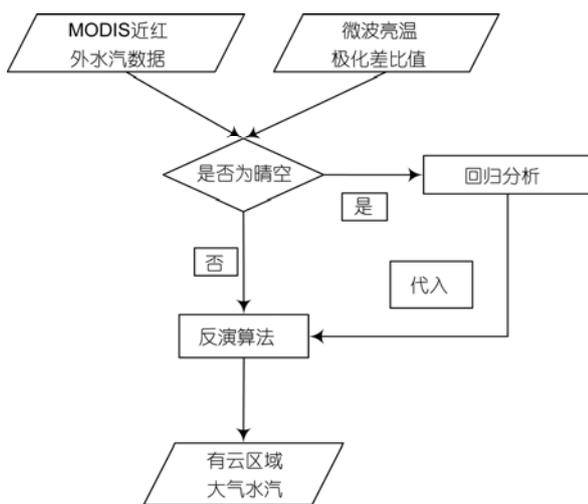


图2 算法流程图

表2 2007年8月和12月大气水汽反演线性回归模型<sup>a)</sup>

类型	8月(夏)		12月(冬)	
	线性回归方程	$R^2$	线性回归方程	$R^2$
1常绿针叶林	$y=-0.0467x+0.8835$	0.5358	$y=-0.0942x+0.9933$	0.5929
2常绿阔叶林	$y=-0.052x+0.9241$	0.5366	$y=-0.0478x+0.9338$	0.5446
3落叶针叶林	$y=-0.064x+0.9643$	0.5053	$y=-0.2789x+0.8013$	0.5437
4落叶阔叶林	$y=-0.0564x+0.9237$	0.5679	$y=-0.0549x+0.9261$	0.5041
5混交林	$y=-0.065x+0.9385$	0.5402	$y=-0.0853x+0.9866$	0.5873
6封闭灌丛带	$y=-0.097x+0.9327$	0.6738	$y=-0.1012x+0.9316$	0.7379
7开放灌丛带	$y=-0.0857x+0.9441$	0.6996	$y=-0.0914x+0.9156$	0.8037
8多树草原	$y=-0.0645x+0.9217$	0.7492	$y=-0.072x+0.9483$	0.7682
9稀树草原	$y=-0.0637x+0.8912$	0.6982	$y=-0.048x+0.7874$	0.7806
10草地	$y=-0.0689x+0.8542$	0.7302	$y=-0.0998x+0.942$	0.7842
11永久性湿地	$y=-0.0529x+0.8386$	0.7941	$y=-0.09x+0.9749$	0.9188
12耕地	$y=-0.0607x+0.867$	0.6703	$y=-0.0904x+0.9441$	0.6063
13城市	$y=-0.0695x+0.907$	0.7638	$y=-0.0738x+0.9344$	0.7109
14自然植被	$y=-0.0629x+0.9028$	0.7386	$y=-0.0602x+0.9118$	0.7461
15裸地或低植被覆盖	$y=-0.0655x+0.8706$	0.7808	$y=-0.0798x+0.9239$	0.8020

a)  $y$ 为水汽值,  $x$ 为亮温极化差比值(式(1))

无线电探空数据. 根据式(1)以及大气辐射传输方程, 可以得出18.7 GHz和23.8 GHz的亮温极化差比值和大气水汽之间应该呈指数变化关系. 但是由于微波辐射对大气水汽的响应并不明显, 而且式(1)的比值关系对指数关系有一定的削弱作用, 因此可以判断它们之间近似呈线性关系而非指数关系(王永前等, 2015), 随着水汽含量的增加, 表2给出的线性关系也会偏向于指数关系, 但是在本文中暂没有考虑这种关系引起的影响.

### 3.3 算法的验证及应用

基于前文回归的反演模型, 本文利用AMSR-E进行了水汽反演. 目前水汽反演的精度评价是研究中的难点之一. 出现这样问题的原因主要在于遥感影像和验证数据的时空匹配问题. 时间上, 不可能做到卫星过境时间和GPS观测时间完全匹配; 空间上, 基于地表的点观测数据也很难代表一个像元所对应的若干公里范围内的大气水汽. 在本文的研究中, 时间上, GPS水汽数据采用由SuomiNet实验提供的半小时分辨率的水汽观测数据, 选取和过境卫星时间最接近时刻的GPS水汽数据参与比较; 空间上, 以SuomiNet实验的站点坐标为中心, 选取坐标与之最接近的卫

星过境像元与其比较.

图3~6分别给出了夏季和冬季MODIS近红外、热红外, 以及AMSR-E的水汽反演结果在晴空和有云条件下和地基GPS水汽探测结果的比较散点图. 表3给出了夏季各种水汽反演结果和GPS水汽反演结果的统计特征, 包括了相关系数、标准差和偏差值. 冬季的统计结果和夏季类似, 所以表3只给出了夏季的结果. 从图表中可以看出, 对于MODIS的近红外和热红外水汽反演数据, 在晴空条件下精度比AMSR-E要高, 三组数据的均方根误差分别为5.116, 6.034和7.916 mm. 这样的结果也验证了前文综述中其他的研究结果, MODIS近红外的水汽反演结果在晴空条件下比较高. 晴空条件下, 和MODIS的光学波段相比, AMSR-E的微波波段反演结果稍差.

有云的条件下, 不管是夏季还是冬季, 基于MODIS的水汽反演结果都要小于GPS的反演结果. 表3给出的结果显示, 对于近红外和热红外, 平均偏差分别为-10.714和-6.269 mm. 这是因为在有云的时候, 近红外和热红外波段只能探测云层之上的水汽含量, 而GPS能够探测整层大气的水汽含量, 所以会出现MODIS水汽反演偏小的现象. 和近红外相比, 热红外波长较长, 对云相态更敏感, 所以近红外的水

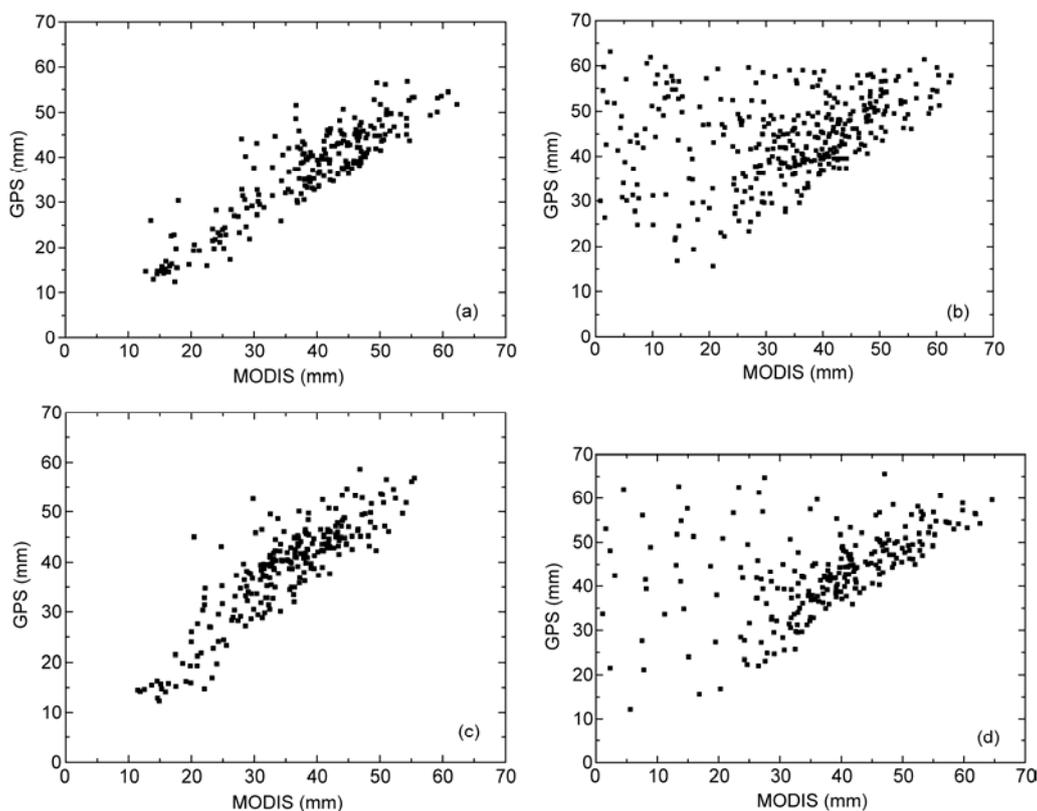


图3 夏季 MODIS 近红外波段((a), (b))和热红外波段((c), (d))的水汽反演结果  
(a), (c) 无云条件下; (b), (d) 有云条件下

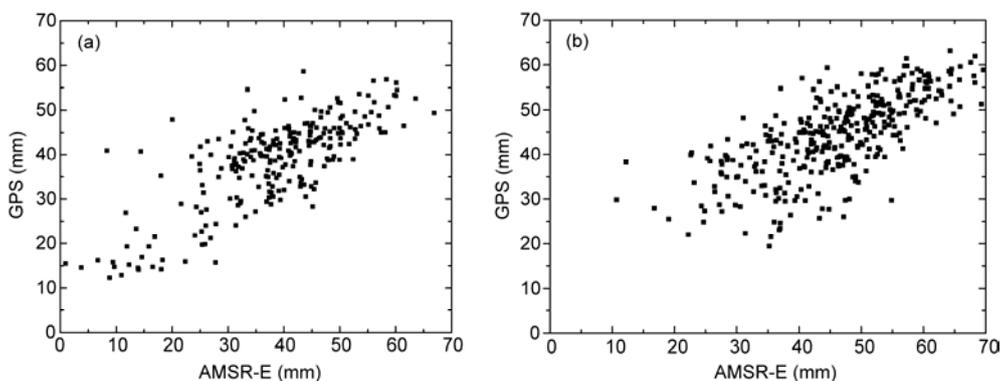


图4 夏季微波辐射计 AMSR-E 的水汽反演结果  
(a) 无云条件下; (b) 有云条件下

汽结果小得最为明显. 因此, 在使用MODIS水汽产品的时候, 如果不分天气状况, 则会出现问题, 因为在有云的情况下, MODIS的水汽反演结果并不是实际水汽的反映. 有云的情况下, 不管是近红外和热红外, 标准差都比晴空条件下高出很多, 完全不能反映

真实的水汽值. AMSR-E的水汽反演结果和MODIS相比, 在有云条件下优势突出, 均方根误差明显小于MODIS的反演结果, 而且和GPS水汽反演结果相比没有出现偏小的情况, 能够比较准确的反映真实的水汽状况, 不受云的干扰. 此外, 比较AMSR-E在晴

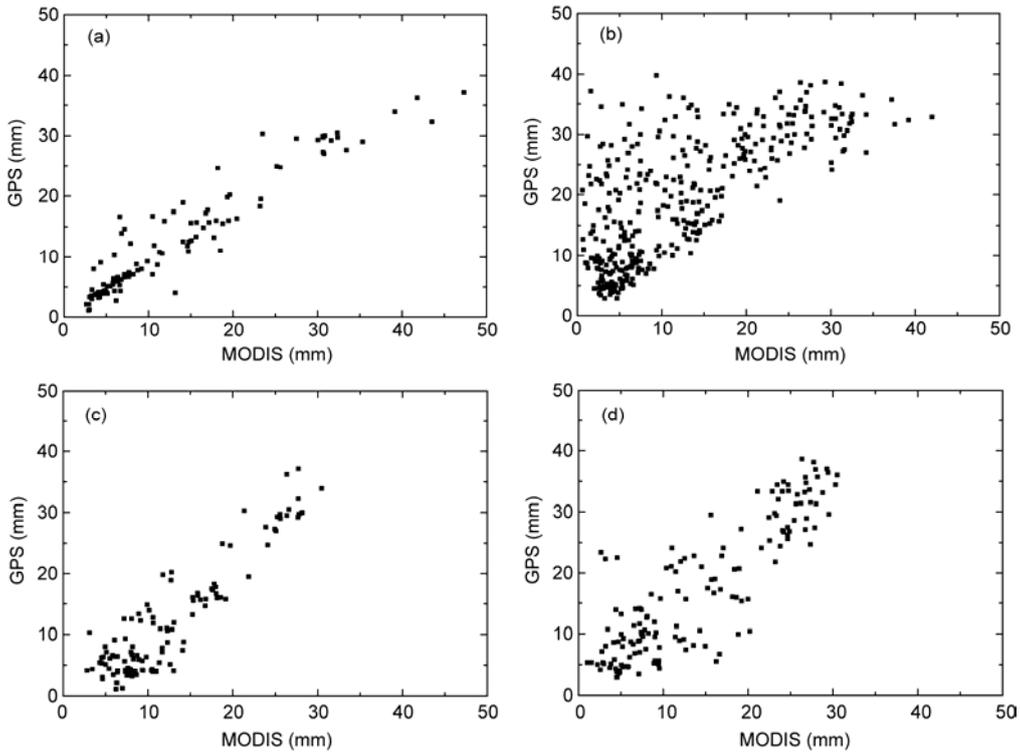


图5 冬季 MODIS 近红外波段((a), (b)) 和热红外波段((c), (d))的水汽反演结果  
(a), (c) 无云条件下; (b), (d) 有云条件下

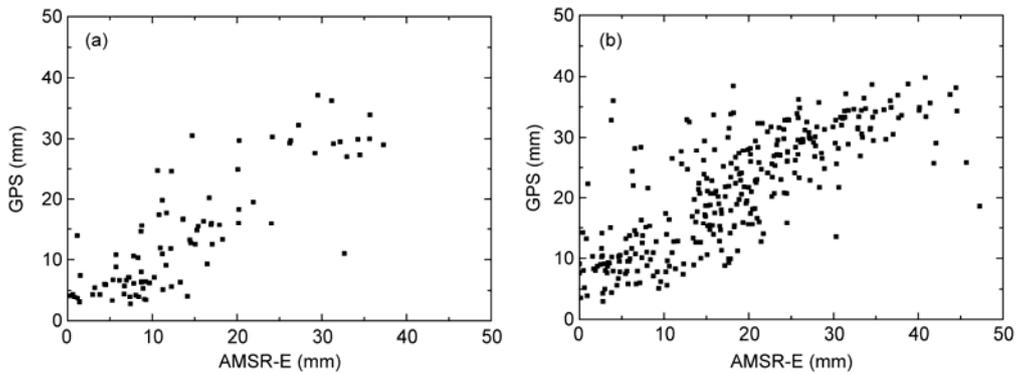


图6 冬季微波辐射计 AMSR-E 的水汽反演结果  
(a) 无云条件下; (b) 有云条件下

表3 各种水汽反演结果和 GPS 水汽反演结果的相关系数、标准差和偏差值

	MODIS近红外 (晴空)	MODIS近红外 (有云)	MODIS热红外 (晴空)	MODIS热红外 (有云)	AMSR-E (晴空)	AMSR-E (有云)
$r$	0.902	0.307	0.874	0.688	0.762	0.705
$\sigma$ (mm)	5.116	17.971	6.034	13.911	7.916	8.085
Bias (mm)	1.563	-10.714	-3.601	-6.269	-0.443	1.738

空条件下和有云条件下的反演结果, 标准差分别为 7.916 和 8.085 mm, 与基于光学波段的水汽反演结果相比, 微波的水汽反演结果具有更好的稳定性。

将夏季和冬季的水汽结果进行对比, 发现夏季大气的水汽含量明显大于冬季的水汽含量。MODIS 的水汽反演结果的精度在夏季和冬季并没有太大的区别。基于 AMSR-E 的反演结果, 冬季的精度要高于夏季的精度。分析原因, 正如前文所述, 夏季地表茂密的植被会对裸土辐射的微波辐射信息有着去极化作用, 所以大气的去极化作用会被植被屏蔽。冬季植被比较稀疏, 虽然冰雪地表会让遥感物理过程更复杂, 但是植被对信号的去极化作用也会减弱, 所以冬季 AMSR-E 的水汽反演结果要优于夏季。

为了考查基于 AMSR-E 的水汽反演结果能否对基于 MODIS 的水汽反演结果进行有效的填充, 本文选择了一块区域进行试验, 结果如图 7 所示。图 7 分别给出了基于 MODIS 热红外、近红外、微波辐射计 AMSR-E, 以及 AMSR-E 填补 MODIS 近红外的水汽结果。从图中可以看出, 由于受天气影响, 不管是热红外还是近红外, 都不能很好的进行区域完整的水汽反演, 有很多空白区域没有水汽反演结果。而利用 AMSR-E 反演的结果对基于 MODIS 的反演结果进行填充, 可以获得研究区域完整的水汽反演结果, 而且边界的接缝可以很好的形成缓冲过渡, 不会有突兀。

图 8 和 9 给出了利用本文算法的全球水汽反演结果图。为了比较方便, 首先给出了夏季和冬季的 MODIS 近红外和热红外水汽反演结果图, 然后利用

MODIS 云产品筛选出有云的区域, 将有云区域的水汽用 AMSR-E 反演的结果进行填充, 最后形成新的全球水汽分布图。从图中可以看出, 原始的 MODIS 水汽数据在很多地方缺失严重, 云雨天气是造成数据缺失的主要原因。AMSR-E 的水汽反演结果能够对 MODIS 水汽数据进行很好地补充, 并且对 MODIS 水汽反演结果偏小的区域进行了校正, 填充以后的水汽结果边界平滑, 填充效果非常好。

#### 4 总结和展望

快速发展的遥感技术提供了高时空分辨率的地球状态观测数据支持, 使得对大气参数进行全球性长时间序列的定量分析成为可能。目前已经有多种利用遥感数据获取大气水汽的技术手段, 但是各种方法各有优缺点, 所以目前仍然没有融合了各种方法优点的高精度高时空分辨率的水汽产品。因此, 水汽反演算法的发展, 应该聚焦于如何充分利用各种卫星数据, 结合微波和光学传感器, 充分利用各种波段数据的特点, 改进当前反演算法并开发新的定量反演算法来获取长期、系统的大气水汽数据, 为气象、气候和大尺度水文研究提供时空分布参数。

考虑到目前水汽产品存在的问题, 本文尝试着使用多源遥感数据进行水汽产品的生成研究。因为基于光学波段遥感数据的水汽反演算法在晴空条件下比较成熟, 所以本文主要解决的问题是如何结合微波和光学数据, 对有云覆盖区域进行水汽的反演

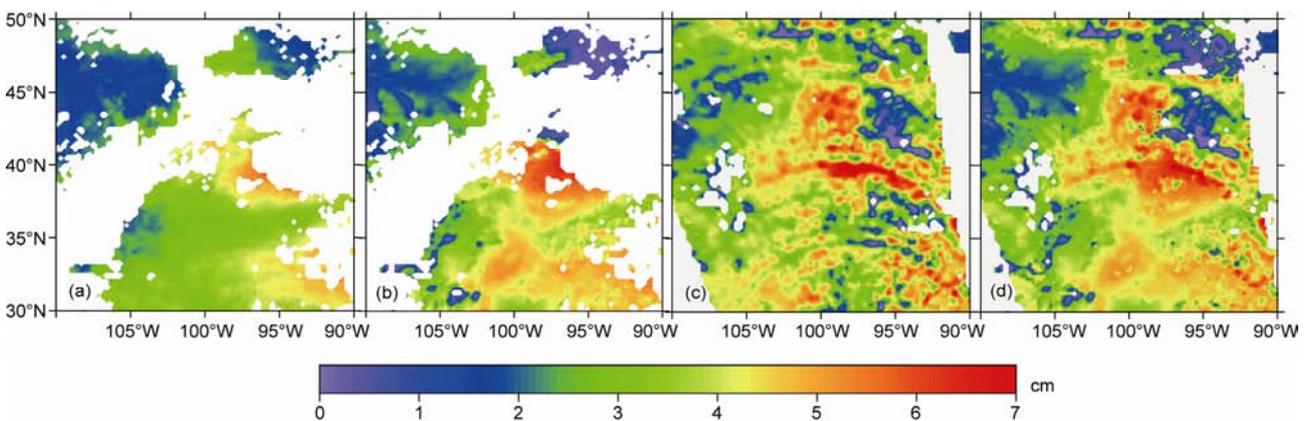


图 7 几种水汽产品的结果对比

(a)~(d)分别是 MODIS 热红外、近红外, 微波辐射计 AMSR-E, 以及 AMSR-E 填补 MODIS 近红外的水汽结果

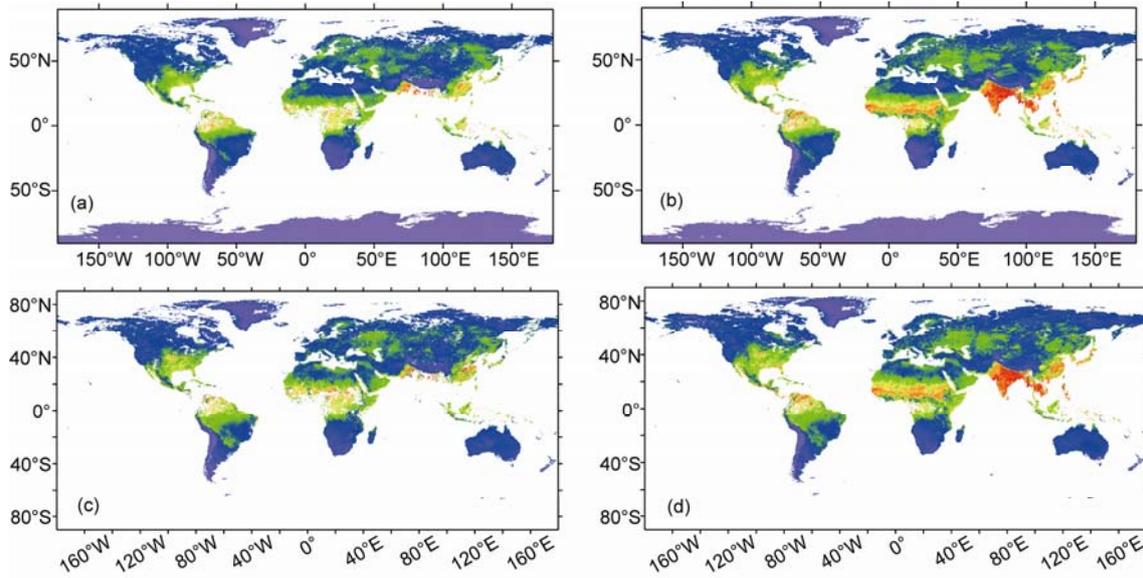


图8 夏季 MODIS 热红外和近红外水汽反演结果和 AMSR-E 填补结果

(a)和(b)分别为热红外水汽反演结果和 AMSR-E 填补结果, (c)和(d)分别为近红外水汽反演结果和 AMSR-E 填补结果

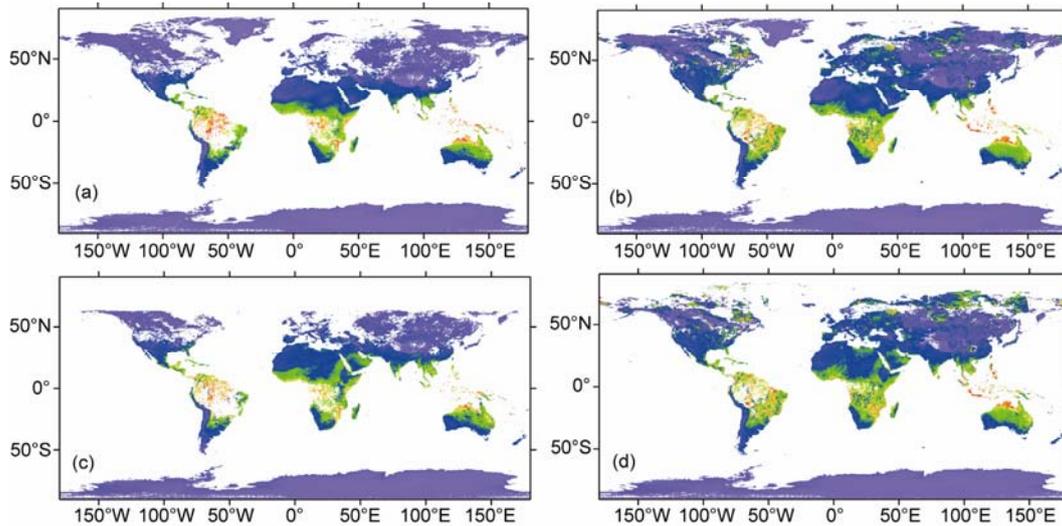


图9 冬季 MODIS 热红外和近红外水汽反演结果和 AMSR-E 填补结果

(a)和(b)分别为热红外水汽反演结果和 AMSR-E 填补结果, (c)和(d)分别为近红外水汽反演结果和 AMSR-E 填补结果

和填充. 基于地表的物理辐射模型, 我们建立了对水汽敏感的微波指数, 通过对微波指数和晴空条件下的水汽进行回归得到了基于物理的统计回归水汽反演模型, 再将云覆盖区域的微波指数代入到反演模型, 从而获得有云覆盖条件下的水汽结果. 验证显示, 基于微波的水汽反演结果在晴空和有云条件下都有一定的稳定性, 且在有云的条件下反演结果真

实可靠, 能够对光学水汽反演结果进行有效的补充. 考虑到不同的地表覆盖会对裸土表面的微波辐射有不同的影响作用, 本研究引入了地表覆盖数据, 在一定程度上消除了这一影响, 但是地表类型复杂, 而且不同数据的空间分辨率有着很大的差异, 重采样过程中, 破坏了算法假定的理想化条件, 遥感反演大气水汽含量的精度还有提升的空间. 基于本文的研究

结果, 后续还可以从以下几个方面继续深化研究:

(1) 基于不同波段遥感数据的水汽定量反演研究. 目前针对各种传感器遥感数据的水汽反演算法成熟度不一样. 基于MODIS近红外和热红外的算法比较成熟; 基于其他传感器的水汽反演算法还处于科学研究阶段, 或者并没有相应的水汽算法被开发. 因此有必要对设置有水汽敏感波段的所有传感器都发展出相应的水汽反演算法, 重点是针对星载微波辐射计、静止气象卫星传感器. 虽然本文取得了一些初步成果, 但是还有空间开发并改进现有的算法, 使之成熟并达到能够业务化的程度.

(2) 基于不同遥感数据反演的水汽产品的交叉订正. 通过不同数据反演的水汽产品必须要进行交叉订正, 从而能保证精度. 对于水汽产品的交叉订正, 可以从两个角度进行研究: 首先是对用于水汽反演的原始亮度/亮温数据的交叉对比订正. 这些传感器虽然波段设置相同或者相似, 但是仍然有很多参数设置不同, 因此需要交叉对比订正; 其次是对反演的水汽结果进行交叉订正, 这一点既可以从不同水汽产品各自的优缺点出发, 进行优势互补, 也可以利用地基的高精度水汽观测结果进行订正.

(3) 基于遥感反演的水汽产品的时空分辨率提高研究. 基于遥感反演的水汽产品的时空分辨率还不能满足相关的应用需求, 尤其是微波辐射计的空间分辨率为几十公里量级. 空间分辨率提高, 也可以从两个角度出发: 首先对用于水汽反演的亮温进行分辨率提高, 这一点基于微波辐射计象元脚印的重叠可以实现; 其次是对水汽产品进行分辨率提高, 这一点基于更高分辨率水汽数据得到的水汽空间分布变化可以实现. 极轨卫星一般一天过境两次, 时间分辨率也不满足要求. 基于多源数据的水汽产品时间分辨率提高可以借助于不同的卫星过境时间的互补, 还可以借助于静止气象卫星的高时间分辨率进行内插实现.

## 参考文献

高风玲, 华泽钊, 崔国民, 陶乐仁. 2013. 水汽浓度变化对温室效应影响的定量分析. 环境科学与技术, 36: 182-186  
黄意玟, 董超华, 范天赐. 2006. 用神州三号中分辨率成像光谱仪数据反演大气水汽. 遥感学报, 10: 742-748  
胡秀清, 黄意玟, 陆其峰. 2011. 利用FY-3A近红外资料反演水汽

总量. 应用气象学报, 22: 46-56  
李小凡, 李颖, 曾琪明. 2009. 应用与ASAR同步的MERIS对重复轨道InSAR进行大气校正. 北京大学学报(自然科学版), 45: 1012-1018  
刘玉洁, 杨忠东. 2001. MODIS遥感信息处理原理与算法. 北京: 科学出版社  
刘旸, 官莉. 2011. 神经网络法反演晴空大气湿度廓线的研究. 气象, 37: 318-324  
马克玲. 2006. 卫星遥感反演大气水汽含量的研究. 长春: 东北师范大学  
宋正方, 魏合理, 吴晓庆. 1996. 大气水汽的红外遥感. 环境遥感, 11: 130-137  
王永前, 施建成, 刘志红, 冯文兰. 2015. 利用微波辐射计AMSR-E的京津冀地区大气水汽反演. 武汉大学学报(信息科学版), 40: 17-24  
王永前, 施建成, 刘志红, 彭映杰, 刘文娟. 2013. 基于AMSR-E的微波波段地表发射率反演——以青藏高原为例. 中国科学: 地球科学, 43: 271-279  
王永前, 施建成, 蒋灵梅, 杜今阳, 田帮森. 2011. AMSR-E低频亮温数据空间分辨率提高以及不同波段亮温数据组合应用时分分辨率匹配的算法. 中国科学: 地球科学, 41: 253-264  
王丽美. 2009. 大气水汽含量的遥感反演方法研究. 阜新: 辽宁工程技术大学  
徐娜, 胡秀清, 陈林, 张玉香. 2012. 利用MODIS对FY-2E/VISSR红外窗区和水汽通道的交叉绝对辐射定标. 红外与毫米波学报, 32: 319-324  
徐希儒. 2005. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社  
张弓, 许健民, 黄意玟. 2003. 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, 14: 385-394  
Aires F, Prigent C, Rossow W B. 2001. A new neural network approach including first guess for retrieval of atmospheric water vapor, cloud liquid water path, surface temperature, and emissivities over land from satellite microwave observations. J Geophys Res, 106: 14887-14907  
Bennartz R, Fischer J. 2001. Retrieval of columnar water vapor over land from backscattered solar radiation using the medium resolution imaging spectrometer. Remote Sens Environ, 78: 274-283  
Bennouna Y S, Torres B, Cachorro V E. 2013. The annual cycle of total precipitable water vapor derived from different remote sensing techniques: An application to several sites of the Iberian Peninsula. In: AIP Conference Proceedings. Berlin. 1531  
Brodzik M J, Knowles K W. 2002. EASE-Grid: A versatile set of equal-area projections and grids. Discrete Global Grids, 5: 110-125  
Chang L, Jin S G. 2013. MODIS infrared water vapor calibration model and assessment. Kaifeng: 21st International Conference on Geoinformatics (Geoinformatics). 1-5  
Charles I, Yoram K. 2004. Modis water vapor description, Product Description. User's Guide  
Chen K, Wu T D, Tsang T, Li Q, Shi J C, Fung A K. 2003. Emission of

- rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 41: 90–101
- Chen S H, Zhao Z, Haase J, Chen A, Vandenberghe F. 2008. A study of the characteristics and assimilation of retrieved MODIS total precipitable water data in severe weather simulations. *Mon Weather Rev*, 136: 3608–3628
- Cooney J A. 1970. Remote measurements of atmospheric water vapor profiles using the Raman component of laser back-scatter. *J Appl Meteorol*, 9: 182–184
- Dalu G. 1986. Satellite remote sensing of atmospheric water vapor. *Int J Remote Sens*, 7: 1089–1097
- Desportes C, Obligis E, Eymard L. 2007. On the wet tropospheric correction for altimetry in coastal regions. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 45: 2139–2149
- Dessler A E, Zhang Z, Yang P. 2008. Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations, 2003–2008. *Geophys Res Lett*, 35: L20704
- Du J Y, Kimball J S, Lucas A J. 2015. Satellite microwave retrieval of total precipitable water vapor and surface air temperature over land from AMSR2. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 53: 2520–2531
- Eck T F, Holben B N. 1994. AVHRR split window temperature differences and total precipitable water over land surfaces. *Int J Remote Sens*, 15: 567–582
- Eric F V, Nazmi Z E, Christopher O J. 2002. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results. *Remote Sens Environ*, 83: 97–111
- Firsov K M, Chesnokova T Y, Bobrov E V, Klitochenko I I. 2013. Total water vapor content retrieval from sun photometer data. *Atmos Oceanic Optics*, 26: 281–284
- Gao B C, Kaufman Y J. 2003. Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *J Geophys Res*, 108: 4389–4401
- Jedlovec G J. 1990. Precipitable water estimation from high-resolution split window radiance measurement. *J Appl Meteorol*, 29: 863–877
- Kevin P, Samuel N, David S, Anita W. 2002. Thermal remote sensing of near-surface water vapor. *Remote Sens Environ*, 79: 253–265
- Knabb R D, Fuelberg H E. 1997. A comparison of the first-guess dependence of precipitable water estimates from three techniques using GOES data. *J Appl Meteorol*, 36: 417–427
- Liu Q, Weng F. 2005. One-dimensional variational retrieval algorithm of temperature, water vapor, and cloud water profiles from advanced microwave sounding unit (AMSU). *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 43: 1087–1095
- Liu Z Z, Wong M S, Nicol J, Chan P W. 2013. A multi-sensor study of water vapor from radiosonde, MODIS and AERONET: A case study of Hongkong. *Int J Climatol*, 33: 109–120
- Mario M, Nazzareno P, Frank S. 2012. Spectral downscaling of integrated water vapor fields from satellite infrared observations. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 50: 415–428
- Menzel W P, Seemann S W, Li J. 2002. MODIS Atmospheric Profile Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document. MODIS ATBD, version 6
- Merritt N D. 2007. A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean. *Geophys Res Lett*, 34: L02815
- Michael K, Yoram K, Paul M, Tanre D. 1992. Remote Sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 30: 2–27
- Nakamura H, Koizumi K, Mannoji N. 2004. Data assimilation of GPS precipitable water vapor into the JMA meso-scale numerical weather prediction model and its impact on rainfall forecast. *J Meteorol Soc Jpn*, 82: 441–452
- Onn F, Zebker H. 2006. Correction for interferometric synthetic aperture radar atmospheric phase artifacts using time series of zenith wet delay observations from a GPS network. *J Geophys Res*, 111: B09102
- Ottle C, Francois C. 1999. Further insights into the use of the Split-Window covariance technique for precipitable water retrieval. *Remote Sens Environ*, 69: 84–86
- Randolph H W, David W F, Seth A S, David N A. 2000. SuomiNet: A real-time national GPS network for atmospheric research and education. *Bull Amer Meteorol Soc*, 81: 677–694
- Raval A, Ramanathan V. 1989. Observational determination of the greenhouse effect. *Nature*, 342: 758–761
- Rodgers C D. 1976. Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation. *Rev Geophys Space Phys*, 14: 609–624
- Schroedter H M, Drewns A, Heise S. 2008. Total water vapor column retrieval from MSG-SEVIRI split window measurements exploiting the daily cycle of land surface temperatures. *Remote Sens Environ*, 112: 249–258
- Seemann S W, Li J, Menzel W P, Gumley L E. 2003. Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS infrared radiances. *J Appl Meteorol*, 42: 1072–1091
- Shi J C, Jackson T, Tao J, Du J Y, Bindlish R, Lu L, Chen K S. 2008. Microwave vegetation indices for short vegetation covers from satellite passive microwave sensor AMSR-E. *Remote Sens Environ*, 112: 4285–4300
- Shi J C, Jiang L M, Zhang L X, Chen K S, Wigneron J P, Chanzy A. 2005. A parameterized multifrequency polarization surface emission model. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 43: 2831–2841
- Smith T L, Benjamin S G, Schwartz B E, Gutman S I. 2000. Using GPS-IPW in a 4-D data assimilation system. *Earth Planets Space*, 52: 921–926
- Solheim F S, Vivekanandan J, Ware R H, Rocken C. 1999. Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates. *J Geophys Res*, 104: 9663–9670

- Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L. 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. New York: Cambridge University Press. 591–662
- Stefania B, Vinia M, Patrizia B, Ciotti P, Pierdicca N. 2011. Satellite based retrieval of precipitable water vapor over land by using a neural network approach. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 49: 3236–3248
- Treuhart R N, Lanyi G E. 1987. The effect of dynamic wet troposphere on radio interferometric measurements. *Radio Sci*, 22: 251–265
- Turner D D, Clough S A, Liljegren J C, Clothiaux E E, Cady-Pereira K E, Gaustad K L. 2007. Retrieving liquid water path and precipitable water vapor from the Atmospheric Radiation Measurement (ARM) microwave radiometers. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 45: 3680–3690
- Wang Y Q, Shi J C, Liu Z H. 2012. Estimating of atmospheric parameters on land using AMSR-E, part I: Inferring precipitable water vapor. Shanghai: Second International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA). 125–129
- Wolfe D E, Gutman S I. 2000. Developing an operational, surface based, GPS, water vapor observing system for NOAA: Network design and results. *J Atmos and Ocean Tech*, 17: 426–440