

利用微波辐射计 AMSR-E 的京津冀地区大气水汽反演

王永前^{1, 2, 3} 施建成³ 刘志红¹ 冯文兰¹

1 成都信息工程学院资源环境学院,四川 成都,610225

2 重庆市气象科学研究所,重庆,401147

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

摘要:发展了微波遥感水汽反演算法,对于裸露地表,通过极化差比值形式消除地表信息对大气水汽反演的干扰;针对非裸露地表,首先反演了地表发射率并对不同波段地表发射率之间的关系进行分析,进而建立了非裸露地表上空大气水汽的反演算法。本文算法的反演结果与 GPS 探测结果的对比显示均方根误差为 7.4 mm,与 MODIS 大气水汽产品空间分布特征的对比也显示了两者的区域一致性。最后对京津冀平原地区和山地地区的水汽进行了时间序列的分析。

关键词:京津冀地区;AMSR-E;大气水汽;亮温极化差比

中图分类号:P237.3; P237.9 **文献标志码:**A

大气水汽在地气系统的能量和水分循环中扮演着重要角色。大气中水汽场的分布及其变化与各种天气系统的更替变化息息相关,因此,准确探测大气中水汽的分布非常必要。相对于一些地基探测手段^[1],卫星遥感探测水汽具有空间分辨率高、空间探测范围广以及时间分辨率高等优势。利用遥感数据反演大气水汽,根据遥感数据源的不同,可以分成紫外^[2]、热红外^[3]、可见光近红外^[4]、微波^[5-7]等反演方法。红外数据白天和夜间都可成像,但不适合有云的情况。可见光近红外反演水汽具有更高的精度,也是 MODIS 标准大气水汽产品算法的基础^[8]。但是近红外数据在有云时只能反演云层上部的水汽含量。综上所述,利用上述算法反演大气水汽虽然得到了广泛的应用,但是都受天气条件制约,使用条件有限。

利用微波数据反演陆地上空大气水汽的算法目前还处于探索阶段。Aires 等^[5]采用神经网络的方法利用 SSM/I 数据反演了陆地上空大气水汽。Liu 等发展了利用 AMSU 数据反演大气水汽的算法^[6]。Deeter 利用 AMSR-E 的 18.7 GHz 和 23.7 GHz 亮温极化差比值发展了大气水汽的参数化反演算法^[7],但该算法物理基础相对欠缺,

更多的是基于经验分析。

20 世纪 80 年代以来,我国北方地区干旱状况日益严重,尤其是京津冀地区,水资源的短缺已经严重制约了经济的快速发展^[9]。京津冀地区大气中水汽含量的多少,是人工增雨能否实施的重要基础,对其深入研究可为有效利用大气水资源提供科学依据。目前针对京津冀地区的水汽分布和时空变化的研究基本没有利用到微波遥感资料。基于此,本文拟利用星载微波辐射计数据,发展基于物理的参数化反演大气水汽的方法,对京津冀地区的水汽进行反演和分析。

1 研究区域和数据收集处理

京津冀地区地处华北、黄河下游以北,东临渤海,西为太行山地,北为燕山山地。燕山以北属张北高原,其余为河北平原,面积为 18.77 万 km²。受东亚季风环流以及中高纬与中低纬天气系统活动的影响,该区降雨的年际、年内变幅均很大。

本文采用搭载在 AQUA 卫星上的高级微波扫描辐射计 (AMSR-E) 和中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 进行数据收集和处理。AMSR-E 是被

收稿日期:2013-09-05

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41471305, 41301653, 41405036);重庆市气象局开放式研究基金资助项目(Kfj-201402);四川省杰出青年基金资助项目(2015JQ0037)。

第一作者:王永前,博士,副教授,主要从事被动微波遥感地表参数和大气参数反演研究。E-mail: wyqq@cuit.edu.cn

动式微波遥感仪。AMSR-E 的频率为 6.9 GHz, 10.7 GHz, 18.7 GHz, 23.8 GHz, 36.5 GHz 和 89 GHz, 每个频率均有 V、H 两个通道。MODIS 有 36 个光谱通道。NASA 提供了和 AMSR-E 数据相关的各种产品, 其中, L2A 为包括各个波段的全球轨道空间重采样亮温产品。本文采用的是 AMSR-E 的 L2A 双极化升降轨的低分辨率轨道亮温数据。

在辐射传输模型的计算中, 大气贡献的计算采用的输入数据是 MODIS 提供的 MYD07_L2 产品, 该产品提供大气温度、湿度和压力的廓线数据; 地表温度数据采用的也是 MODIS 提供的 MYD11_L2 产品。因为 MODIS 和 AMSR-E 同时搭载于 AQUA 卫星上, 因此这两种仪器获取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。本文中所有的数据均采用算术平均方法投影到 EASE-GRID 中 (空间分辨率约为 25 km×25 km)。

2 算法推导

2.1 理论推导

本文算法基于 AMSR-E 卫星参数的框架进行推导。在 AMSR-E 的频率覆盖范围内, 在频率 f 和入射角 θ 的情况下, 裸露地表上空的卫星观测亮温 $T_{Bp}(f, \theta)$ 的辐射传输方程可以简化为:

$$T_{Bp}(f, \theta) = [\Gamma(f, \theta) \cdot T_s - \Gamma(f, \theta) \cdot T_a(f, \theta) \cdot (1 - \Gamma(f, \theta))] \cdot e_p(f) + T_a(f, \theta) \cdot (1 - \Gamma(f, \theta)) + \Gamma(f, \theta) \cdot T_a(f, \theta) \cdot (1 - \Gamma(f, \theta)) \quad (1)$$

式中, $e_p(f)$ 为地表发射率; T_s 是地表温度; 下标 p 表示极化方式; $\Gamma(f, \theta)$ 为大气透过率; $T_a(f, \theta)$ 为大气有效温度。从式(1)可以看出, 卫星观测亮温可以看成是地表发射率的线性函数。这一线性关系的截距只与大气相关, 而斜率与大气和地表温度有关。因此, 某一频率的亮温极化差可以表示为:

$$T_{Bv} - T_{Bh} = [\Gamma(f, \theta) \cdot T_s - \Gamma(f, \theta) \cdot T_a(f, \theta) \cdot (1 - \Gamma(f, \theta))] \cdot [e_v(f) - e_h(f)] \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 某一频率的亮温极化差和地表温度、地表发射率差以及大气有关。为了得到大气信息, 必须使地表信息最小化或者被消掉。在很多地学研究中, 地表发射率的反演均需借助辅助数据(大气无线电探测廓线数据、红外探测地表温度数据等)。本文采用裸露地表发射率模型 AIEM^[10], 在 AMSR-E 频率覆盖范围内生成地表发射率模拟数据库。

通过分析地表发射率模拟数据库可以发现, AMSR-E 相邻频率的地表发射率之间呈高度的线性关系, 可以用线性方程拟合。该线性关系既不受土壤水分, 也不受地表粗糙度的影响。同时, 该线性关系受极化的影响也比较小。

因此, AMSR-E 相邻两个波段的裸露地表发射率可以表示为:

$$\varepsilon_p(f_2) = a(f_1, f_2) + b(f_1, f_2) \cdot \varepsilon_p(f_1) \quad (3)$$

通过回归 AIEM 模拟数据库可以得到系数 $a(f_1, f_2)$ 和 $b(f_1, f_2)$ 。在本研究中:

$$\varepsilon_p(23.8 \text{ GHz}) = 0.050 + 0.959 \cdot \varepsilon_p(18.7 \text{ GHz}) \quad (4)$$

式(4)中, 垂直极化和水平极化的拟合相对均方根误差分别为 0.34% 和 0.45%。通过式(4), 可以得到 23.8 GHz 和 18.7 GHz 裸露地表发射率极化差之间的线性关系如下:

$$\Delta\varepsilon(23.8 \text{ GHz}) = 0.959 \cdot \Delta\varepsilon(18.7 \text{ GHz}) \quad (5)$$

式中, $\Delta\varepsilon$ 表示某一频率地表发射率极化差。式(5)表明两个相邻频率的地表发射率极化差 $\Delta\varepsilon$ 呈正比关系, 不受地表特性影响。因此针对裸露地表的卫星大气遥感中, 利用这种特性, 为消除地表辐射影响提供了可能性。式(2)中的地表信息可以利用 AMSR-E 相邻两个频段的极化差比值消除:

$$\frac{T_{Bv}(f_1) - T_{Bh}(f_1)}{T_{Bv}(f_2) - T_{Bh}(f_2)} = b(f_1, f_2) \cdot \frac{\Gamma(f_1) \cdot T_s - \Gamma(f_1) \cdot T_a(f_1) \cdot (1 - \Gamma(f_1))}{\Gamma(f_2) \cdot T_s - \Gamma(f_2) \cdot T_a(f_2) \cdot (1 - \Gamma(f_2))} \quad (6)$$

式(6)中, 消除了地表辐射的影响以后, 公式左边的极化差比值只受地表温度、大气透过率和大气有效温度的影响。因此, 如果选取大气敏感波段的数据, 利用两个波段的极化差亮温的比值不受地表发射率的影响这一特性, 便可以进行大气参数的反演。

AMSR-E 的 6 个波段中, 只有 23.8 GHz 位于大气水汽吸收带附近, 因此可以用 18.7、23.8 GHz 两个波段的亮温极化差比值进行大气水汽的反演。

式(6)中, 影响两个波段的亮温极化差比值的因素包括两个: 一个是大气因素(大气透过率和大气有效温度), 另外一个为地表温度。因此要进行大气水汽的反演, 必须获得地表温度值。考虑到利用红外数据反演的地表温度受天气影响较为严重, 不适用于本文算法。AMSR-E 的 36.5 GHz 的垂直极化亮温最适合用来反演地表温度, 因为

该波段可以在对大气敏感和土壤水分敏感之间达到一个平衡。具体的反演算法利用 Jackson 提出的公式^[11]:

$$T_s = 1.11T_{B,36.5V} - 15.2 \quad (7)$$

为了研究 18.7 GHz 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,大气廓线参数来自中国气象局在京津冀地区的无线电探空数据。根据式(1)、(6),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(6)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。

另外,18.7 GHz 和 23.8 GHz 的亮温极化差比值和大气水汽的关系还受到地表温度的影响。通过对模拟数据库的分析发现,地表温度会对 18.7 GHz 和 23.8 GHz 的亮温极化差比值和大气水汽之间线性关系的截距产生影响,因此我们可以将 18.7 GHz 和 23.8 GHz 的亮温极化差比值和大气水汽的关系参数化为:

$$PDR_WV = a \cdot WVP + b \cdot T_s + c \quad (8)$$

式(8)为裸露地表上空大气水汽的反演。式中, PDR_WV 为 18.7 GHz 和 23.8 GHz 的亮温极化差比值; WVP 为大气水汽; a、b、c 分别为参数化的回归系数。然而,裸露地表上空大气水汽算法适用的范围太小。对研究区而言,即使在冬季,呈裸露的地表也比较少,而且会受到冰雪的影响。利用 MODIS 的 IGBP 地表覆盖分类数据(MCD12C1),图 1 给出了京津冀地区土地覆盖类型。从图 1 中可以看出,京津冀地区的主要地表覆盖类型为农作物、草原以及林地和京津的城市区等。因此,发展非裸露地表的大气水汽反演算法才能最终真正解决问题。

根据前述分析,裸露地表情况下,不论是云中液态水,还是大气水汽的反演,利用的信息都是大气对地表辐射信息的去极化效应。但是植被的存在也会对地表辐射信息的极化起削弱作用,因此,非裸露地表上空大气水汽的反演要比裸露地表情况下更为复杂。为了发展非裸露地表上空大气水汽的反演算法,首先对非裸露地表的发射率进行分析。

2.2 地表发射率反演

如果用式(1)计算地表发射率,变量较多,相对复杂。式中的大气有效温度 $T_a(\nu, \theta)$ 、吸收系

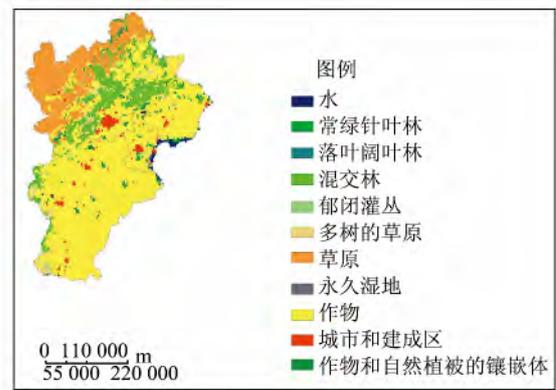


图 1 京津冀地区土地覆盖类型图

Fig. 1 Surface Covered Type of Beijing-Tianjin-Hebei Region

数 $\Gamma(\nu, \theta)$ 都要单独利用辐射传输方程进行计算。为了简化计算过程,通过推导,可计算地表发射率:

$$e_p(\nu, \theta) = \frac{T_{bp}(\nu, \theta) - T_{bp0}(\nu, \theta)}{T_{bp1}(\nu, \theta) - T_{bp0}(\nu, \theta)} \quad (9)$$

式中, $T_{bp}(\nu, \theta)$ 是某一时空条件下卫星的观测亮温; T_{bp0} 和 T_{bp1} 是同一时空条件下地表发射率分别为 0 和 1 时卫星应该观测到的亮温。 T_{bp0} 和 T_{bp1} 可通过辐射传输方程进行模拟计算。在辐射传输计算过程中,需要得知和卫星观测亮温 $T_{bp}(\nu, \theta)$ 同一时空条件下的地表温度和大气廓线数据,这些数据由 MODIS 产品提供。

通过上述算法,基于 AMSR-E 的 18.7 GHz 和 23.8 GHz 波段数据计算了京津冀地区 2007 年 8 月份的地表发射率,其中图 2 给出了 18.7 GHz 垂直极化和水平极化的平均地表发射率。图 2 中,结果和理论模拟结果基本相符,垂直极化的发射率大于水平极化的发射率,其他通道的发射率也显示了同样的结果。

本文通过分析京津冀地区的非裸露地表覆盖类型的变化来判断地表发射率反演的准确性,同时,这也从另外一个角度检验了地表发射率是否能够反映地表覆盖类型的性质。从图 1 的地表覆盖类型图可以看出,京津冀平原区的地物主要为农作物,地表发射率较低,但是地表发射率极化差却较高;冀北和冀西山地区主要地表覆盖为草原和林地,地表发射率较高,但是地表发射率极化差却较低;京津城市区发射率和发射率极化差都比较高。农作物覆盖区地表发射率较低是因为和草原森林相比,农作物之间的孔隙较大,而耕地的表面细碎土壤对电磁波的信号会有散射作用。造成冀北和冀西山地区相对较低的地表发射率极化差的

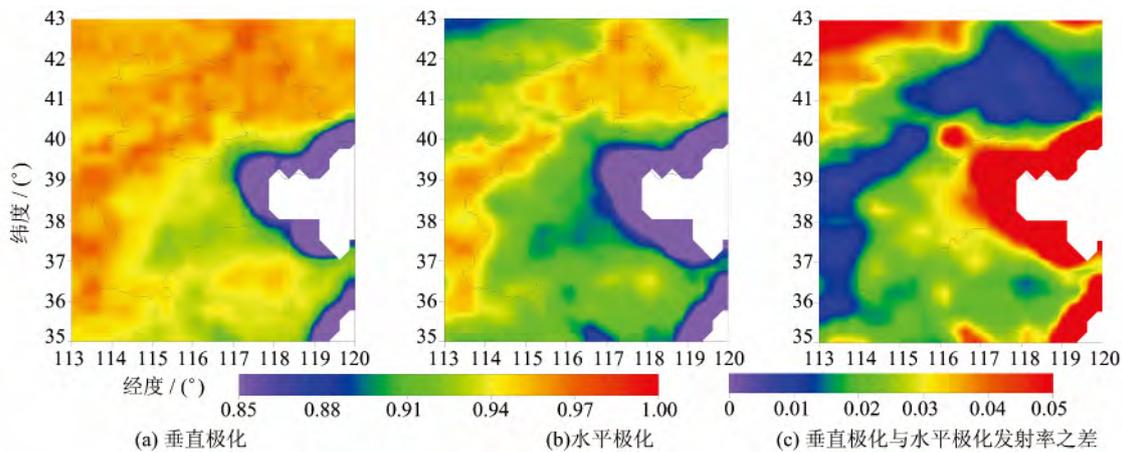


图2 京津冀地区 18.7 GHz 垂直极化地表发射率反演结果以及垂直极化和水平极化的发射率之差

Fig. 2 Surface Emissivity of 18.7 GHz for Beijing-Tianjin-Hebei Region Polarization of V, H and the Drfference Between V and H

原因是植被的去极化作用。草原和森林对地表的覆盖密度较大。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,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,而这些不同种类的植被覆盖包含了植被散射体的不同尺寸、形状和位置。可以认为,在这些不同特征对微波信号的平均影响下,植被对微波信号的影响没有显著的极化效应,这个结论被广泛地应用于植被被动微波遥感的研究领域中。因此,植被对来自于地表土壤的极化辐射信号会起到去极化的作用,这造成了上述区域较低的地表发射率极化差。

2.3 水汽算法推导

根据对模拟数据库的分析,发现 18.7 GHz 和 23.8 GHz 地表发射率极化差呈很好的线性关系。根据这一结果,前文中讨论了裸露地表上空大气水汽的反演。为了发展非裸露地表上空大气水汽的反演算法,首先对非裸露地表的发射率进行分析。本文计算了 2007 年 8 月份的 18.7 GHz 和 23.8 GHz 的地表发射率。然后根据 MODIS 提供的地表覆盖类型数据,将地表划分成 13 种典型的非裸露地表覆盖类型,然后对这 13 种非裸露地表的发射率的特性分别进行分析。

通过结果分析发现,在非裸露的地表,18.7 GHz 和 23.8 GHz 的发射率极化差之间仍具有稳

定的线性关系,本文计算了 13 种非裸露地表覆盖情况下两者线性关系的斜率、截距、回归式以及原始数据的相关系数。最后将 18.7 GHz 和 23.8 GHz 的地表发射率极化差的关系参数化为:

$$\Delta\epsilon(23.8 \text{ GHz}) = 0.6548 \cdot \Delta\epsilon(18.7 \text{ GHz}) \quad (10)$$

此时,式(5)中的常数参数要从裸土状态时的 0.959,调整为非裸露地表时的 0.655。因此,只要对参数 b 作相应的调整,式(6)中 18.7 GHz 和 23.8 GHz 的亮温极化差比值可以尽可能地消去地表辐射信息的影响,从而反映大气的信息。由于没有相应的物理模型对非裸露地表的辐射信息进行模拟,因此本文中采用经验统计的方法对非裸露地表上空的大气水汽进行反演。

对于京津冀地区,八月份植被相对最为茂盛,所以对于植被下层裸露地表辐射的极化信息,八月份植被的去极化也最为强烈,相应的大气的去极化作用就会被削弱。因此,从理论上预测,植被最茂盛的时候,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。但是通过式(10)可以发现,即使是八月份,茂盛植被地表的相邻波段发射率之间仍然存在线性关系,仍然可以利用该线性关系消除地表发射的影响,从而反演大气水汽。其他月份的植被不如八月份茂盛,植被的去极化作用会减弱,利用 18.7 GHz 和 23.8 GHz 地表发射率的线性关系,可以更好地消除地表发射的影响,进而更精确的反演大气水汽。

2003 年 11 月,中国气象局在河北省石家庄、秦皇岛、张家口等三站建立了第一个地基准实时

遥感 GPS 试验站网,可自动获得 1 h 的 GPS 实时水汽资料。2006 年 7 月,针对北京奥运气象服务需求,又对上述三个站的 GPS 水汽资料进行加密,从 1 h 1 次提高到 0.5 h 1 次。我们收集了相关的地基 GPS 水汽观测数据,以 2005 年的观测数据和与时空相匹配的 AMSR-E 过境亮温数据对式(8)的系数进行重新回归,得到非裸露地表下的大气水汽反演公式。

3 结果分析和讨论

本文计算了 2005~2008 年京津冀地区 4 a 的大气水汽,并且利用河北省地基 GPS 业务系统的 2006 年水汽观测数据进行验证。图 3 给出了 GPS 和 AMSR-E 水汽反演结果的散点图。为尽可能地及时空匹配误差降低到最低,本文首先选取 GPS 站点所在位置的 AMSR-E 过境数据,再根据 AMSR-E 卫星过境时间选取最相近时段的 GPS 数据。从图 3 中可以看出,AMSR-E 的大气水汽反演结果和 GPS 的观测结果符合良好,均方根误差为 7.4 mm。

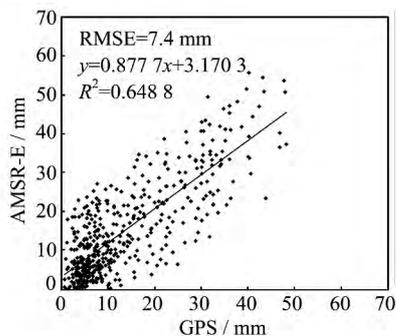


图 3 AMSR-E 反演的水汽结果和地基 GPS 反演结果的对比

Fig. 3 Comparison Between AMSR-E PWV Retrievals and GPS-based PWV Retrievals

NASA 提供了 MODIS 基于近红外和热红外波段反演的大气水汽产品。因此,本文也将 AMSR-E 反演的水汽结果与 MODIS 大气水汽产品数据进行了对比。结果显示,AMSR-E 的反演结果和 MODIS 的反演结果具有较高的一致性,但是 AMSR-E 的反演结果要大于 MODIS 的反演结果。究其原因,主要是 MODIS 数据反演大气水汽受天气影响较重,当有云雨时只能反演云层上端的大气水汽,而 AMSR-E 因为微波的穿透能力,使得其即使在有云条件下也能反演整个大气廓线层的水汽。比较的数据都是基于月平均的结果,因此 MODIS 的反演结果要小于 AMSR-E 的反演结果,

这也证明了 AMSR-E 能更准确地反演大气水汽。

图 4 和图 5 分别给出了基于 AMSR-E 升轨数据和 MODIS 近红外数据反演的 2007 年 12 个月京津冀地区大气水汽空间分布图可以看出,AMSR-E 和 MODIS 的反演结果在空间上也很相符,并且 AMSR-E 反演的结果大于 MODIS 的反演结果。AMSR-E 的反演结果在京津城市地区有异常,原因在于本文发展的算法主要考虑了植被的去极化效应对大气水汽反演的影响。但是京津城市区由于地表的复杂,18.7 GHz 和 23.8 GHz 地表发射率极化差比值的的关系并不能用简单的线性关系进行描述,因此使得该算法下城市区域的大气水汽反演结果出现了异常。

图 6 给出了 2005~2008 年京津冀地区平原和山地基于不同遥感数据源大气水汽时间序列变化图。从图中可以看出,京津冀地区的大气水汽季节性变化明显。从 4~7 月大气水汽逐渐增加,到 8 月略有下降,9 月和 10 月明显下降,10 月和 12 月小幅下降。2007 年 MODIS 和 AMSR-E 结果出现不一致,2007 年 MODIS 反演水汽的峰值出现在 8 月,而 AMSR-E 反演结果的峰值仍然是 7 月。根据气象数据可以知道,京津冀地区的大气水汽峰值一般都是在 7 月。由于 2007 年京津冀地区 7 月份的降雨量高于其他年份,因此 MODIS 反演的结果可能受到了天气因素的影响而导致其反演的水汽结果偏小。京津冀地区大气水汽不同季节的年变化特征在图中显示不明显,这可能和年份较少有关系。冬季月份,京津冀地区受西北气流控制,水汽主要来自大西洋和北冰洋,大气水汽含量基本上随纬度的升高而减少;夏季月份,京津冀地区大气中水汽来自三支气流,西北、西南及东南气流,西南及东南气流水汽充沛,大气水汽的分布从东南向西北减少。这是图 6 中京津冀平原区的水汽含量要高于冀北山地区的水汽含量的原因,此结果和图 4、图 5 显示的结果是一致的,因此,利用遥感手段反演京津冀地区的水汽,不管是基于光学波段的数据,还是基于微波波段的数据,都能够真实可靠地反映实际的水汽时空分布状况。

4 结 语

本文基于星载微波辐射计遥感数据,选择两通道极化差比值的方式进行大气水汽反演,可以有效地消除地表信息对大气水汽反演的干扰。对于反演结果的验证,分别用 GPS 大气水汽和

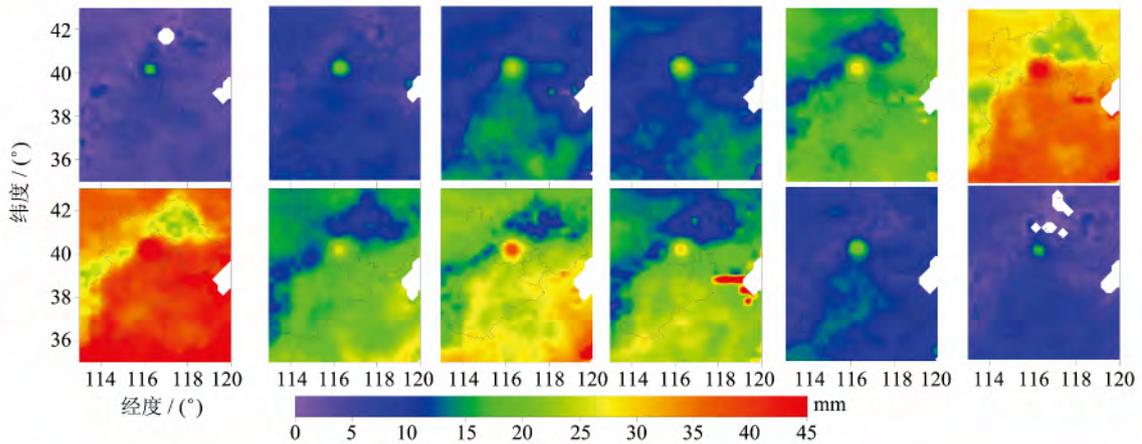


图4 基于 AMSR-E 升轨数据反演的京津冀地区 2007 年全年月平均大气水汽数据

Fig. 4 Monthly Average PWV Data for Beijing-Tianjin-Hebei Region Retrieved by AMSR-E Ascend Data

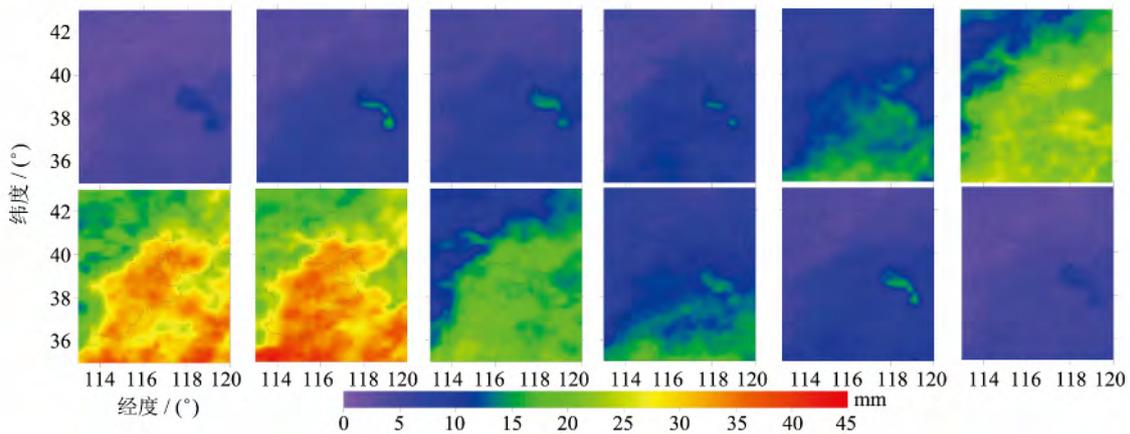


图5 基于 MODIS 近红外波段数据反演的京津冀地区 2007 年全年月平均大气水汽数据

Fig. 5 Monthly Average PWV Data for Beijing-Tianjin-Hebei Region Retrieved by MODIS near Infrared Data

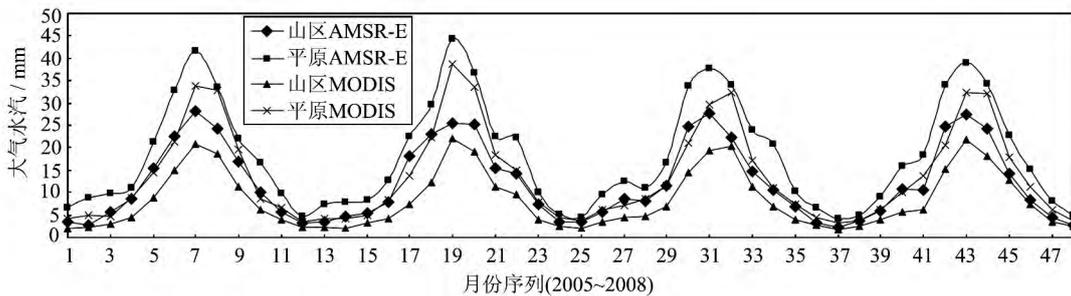


图6 2005~2008 年京津冀地区平原和山地基于不同遥感数据源大气水汽时间序列变化图

Fig. 6 Time Series of the PWV Data for Plain and Mountain of Beijing-Tianjin-Hebei Region Retrieved by Different Remote Sensing Data from 2005 to 2008

MODIS 大气水汽的反演结果和本文反演的结果进行了对比。本文反演的大气水汽含量与 GPS 的反演结果的均方根误差为 7.4 mm 左右。与 MODIS 大气水汽产品数据的区域对比结果显示, 本文算法的反演结果和 MODIS 的结果具有较好的空间一致性, 并且能够较好地克服 MODIS 反演算法存在的一些问题。最后对利用 AMSR-E

反演的 2005~2008 年京津冀地区的大气水汽进行了时空分析, 获得了可信的结果。到目前为止, 有近 30 a 的全球尺度上卫星微波辐射计数据能够被利用, 因此利用本算法的大气水汽含量遥感反演业务化将具有重要的应用前景。

虽然本算法较全面地考虑了裸露地表和非裸露地表, 但是非裸露地表上空大气水汽的反演仍

然是完全建立在经验统计的基础上,缺乏有力的物理意义。如何综合利用非裸露地表和裸露地表的辐射模型,将反演模型建立在对物理模型分析的基础上,从而能够使得反演结果更加合理可靠,还需要进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] Wang Yong, Liu Lintao, Xu Houze, et al. Retrieving Change of Precipitable Water Vapor in Chinese Mainland by GPS Technique[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(2): 152-155(王勇, 柳林涛, 许厚泽, 等. 利用 GPS 技术反演中国大陆水汽变化[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2007, 32(2): 152-155)
- [2] Noel S, Buchwitz M. Atmospheric Water Vapor Amounts Retrieved from GOME Satellite Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(13): 1 841-1 844
- [3] Zhao Qiang, Yang Shizhi, Qiao Yanli, et al. Study of Simultaneous Non-linear Retrieval of Atmospheric Parameters and Surface Skin Temperature from MODIS Infrared Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(4): 400-403(赵强, 杨世植, 乔延利, 等. 利用 MODIS 红外资料反演大气参数以及表层温度的研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2009, 34(4): 400-403)
- [4] Gao B C. Comparison of Column Water Vapor Measurements Using Downward-looking Near-infrared and Infrared Imaging Systems and Upward-looking Microwave Radiometers[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31(10): 1 193-1 201
- [5] Aires F, Prigent C, Rossow W B, et al. 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]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D14): 14 887-14 907
- [6] Liu Q, Weng F. One-dimensional Variational Retrieval Algorithm of Temperature, Water Vapor, and Cloud Water Profiles from Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(5): 1 087-1 095
- [7] Deeter M N. A New Satellite Method for Retrieving Precipitable Water Vapor over Land and Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L02815
- [8] Gao B C, Goetz A F, Westwater E R. Possible Near-IR Channels for Remote Sensing Precipitable Water Vapor from Geostationary Satellite Platforms [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(12): 1 791-1 801
- [9] Wang H X, Zhang L, Dawes W R. Improving Water Use Efficiency of Irrigated Crops in the North China Plain-measurements and Modelling[J]. *Agriculture Water Mangment*, 2001, 48: 151-167
- [10] Chen K, Wu T, Tsang T, et al. Emission of Rough Surfaces Calculated by the Integral Equation Method with Comparison to Three-dimensional Moment Method Simulations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41: 90-101
- [11] Jackson T J, Cosh M H, Bindlish R. A Five-year Validation of AMSR-E Soil Moisture Products[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, USA, 2008

Passive Microwave Remote Sensing of Precipitable Water Vapor over Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on AMSR-E

WANG Yongqian^{1, 2, 3} SHI Jiancheng³ LIU Zhihong¹ FENG Wenlan¹

1 College of Environmental and Resource Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China

2 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Institute of Meteorology Science, Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 401147, China

Abstract: Compared with visible/infrared sensors, satellite data-based passive microwave radiometers could provide a more feasible method for retrieving precipitable water vapor (PWV). This paper presents a scheme that retrieves PWV over Beijing-Tianjin-Hebei region using satellite radiometer measurements from advanced microwave scanning radiometer (AMSR-E). For bare surfaces, the polarization difference ratio (PDR_{WV}) obtained from 23.8 and 18.7 GHz was found to be sensitive to PWV.

For the surface covered by vegetation, surface emissivity was retrieved by AMSR-E with the help of the MODIS atmospheric profile product. Through analyzing the statistical relationship of emissivity polarization difference, an algorithm for retrieving PWV was built. Compared with the GPS results, the root mean square error of our algorithm is 7.4 mm. Regional consistency was found between the results from MODIS and our algorithm.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei Region; precipitable water vapor; AMSR-E; polarization difference

First author: WANG Yongqian, PhD, associate professor, specializes in the theories and methods of retrieving surface and atmosphere parameters by remote sensing. E-mail: wyqq@cuit.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41471305, 41301653, 41405036; the Open Research Fund Program of Chongqing Meteorological Bureau, No. Kfj-201402; the Project of Preeminent Youth Fund of Sichuan Province, No. 2015JQ0037.

.....
(上接第 473 页)

The Triple-Collocation-based Fusion of In-situ and Satellite Remote Sensing Data for Snow Depth Retrieval

XU Jianhui¹ SHU Hong¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Because of the insufficient accuracy and spatial resolution of snow depth products retrieved by passive microwave remote sensing, a new multi-sources data fusion approach is developed for retrieving snow depth. The data from different sources contains visible, passive microwave satellite and in-situ data. The daily in-situ, AMSR-E and SSM/I retrieved snow depth products are used in this study. First, combining in-situ snow depth, the snow depth of Northern Xinjiang is estimated through geostatistical analysis. Then the error variances of each product are calculated using a triple collocation (TC) method. Finally, the new snow depth products are obtained by merging in-situ, AMSR-E and SSM/I snow depth data in a least squares criterion where the optimal weights of each product are determined with the TC-based error variances. The merged snow depth is validated against in-situ snow depth and exhibits a higher correlation with in-situ observations than that with original AMSR-E and SSM/I snow depth. The results with higher accuracy demonstrate the effectiveness of our approach.

Key words: snow depth; AMSR-E; SSM/I; Triple-Collocation; least square method; remote sensing retrieval; data fusion

First author: XU Jianhui, PhD candidate, specializes in spatio-temporal data analysis and data assimilation. E-mail: xujianhui306@163.com

Corresponding author: SHU Hong, PhD, professor. E-mail: shu_hong@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41171313, 41331175; the Open Research Fund of the Key Laboratory of Geo-informatics of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. 201329; the Hubei Provincial Natural Science Foundation of China, No. 2014CFB725.