

基于海岛站探空资料的 WindSat 海洋大气 可降水量产品检验

尹延通^{1,2}, 关吉平^{1,3*}, 刘高飞¹, 宋清涛⁴

(1.国防科技大学 气象海洋学院,江苏 南京 211101; 2.中国西昌卫星发射中心,四川 西昌 615000;

3.陆军工程大学 电磁环境效应与电光工程国家级重点实验室,江苏 南京 210007;

4.国家卫星海洋应用中心,北京 100081)

摘要:利用时空匹配的 15 个海岛站的探空资料对 WindSat 2007—2015 年的海洋大气可降水量产品(total precipitable water, TPW)进行了检验,并分析了造成两者差异的原因。结果表明:WindSat 反演的海洋大气可降水量产品与探空比对的一致性较好,两者平均偏差为-0.43 mm,均方根误差为 3.14 mm,标准偏差为 3.11 mm,相关系数达到了 0.98;WindSat 在中高纬度地区反演效果较好,均方根误差在各个站点均小于 3 mm;在低纬度地区 WindSat 反演精度较差,均方根误差大于 5 mm。低风速对 WindSat 可降水反演精度影响较大;海面温度和云中液态水含量与大气可降水量产品之间无明显相关关系;WindSat 反演精度随纬度降低下降明显;利用白天探空释放所得到的水汽数据存在干性偏差。

关键词:大气可降水量;WindSat;探空资料;卫星产品检验;微波辐射计

中图分类号:P426;TP751

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2018)01-0019-15

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2018.01.002

水汽作为全球能量收支和水循环研究中的重要物理量,其分布特征对于理解和预测全球气候变化具有重要意义^[1],许多文献分析了不同区域内水汽变化的规律,以及其与全球气候变化的关系^[2-3]。海洋上空水汽的测量主要依靠星载遥感方法,多位学者利用国内卫星资料进行了大气可降水量产品(total precipitable water, TPW)的反演及验证,如张弓等^[4]以 FY-1C 搭载的辐射计数据反演所得大气可降水量真实性检验偏差约为 15%~20%,胡秀清等^[5]将 FY-3A 反演的大气水汽含量与探空资料进行比对,结果表明卫星反演值存在 20%~30%的系统性偏差;李芸和王振占^[6]基于 TRMM 卫星水汽产品,建立了适用于“神州 4 号”飞船搭载的 RAD 微波辐射计的水汽反演算法,并利用 TRMM 水汽数据对反演的产品进行了真实性检验,得出两者之间均方根误差为 2.71 mm;范士杰^[7]基于黄渤海沿岸的 GPS 测站测量的大气可降水量数据,对 HY-2 卫星微波辐射计反演的水汽产品进行检验,指出两者之间的标准偏差为 2 mm。基于此,国内学者在利用海洋上空水汽数据进行气象科学研究时,多采用国外卫星反演的水汽产品。

卫星资料的真实性检验是卫星资料应用的前提和保证,卫星反演水汽资料的准确性问题受到了国外大批学者的关注。Wentz^[8]利用浮标和探空资料对 1987—1990 年 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)-F08 反演的海洋水汽产品进行了检验;Sohn 和 Smith^[9]将探空资料与 7 种 DMSP SSM/I 反演模式产品的 42 个月平均值进行了比对,研究不同反演算法的差异性;Mears 等^[10]利用地基 GPS 资料对 RSS(Remote Sensing System)网站公布的多颗卫星大气可降水量产品进行了比对分析,并给出了多个微波辐射计的误差指标。

收稿日期:2017-01-06

资助项目:国家自然科学基金项目——中国近海海洋锋面中小尺度海气相互作用及其机理研究(41076012), GPS 掩星探测技术与 Abel 反演相关问题研究(41475021)和大气对小尺度海表温度结构的相应(41276019)

作者简介:尹延通(1991-),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事卫星遥感产品评估及应用方面研究. E-mail: 1044147875@qq.com

* **通讯作者:**关吉平(1978-),男,山西阳高人,副教授,博士,主要从事卫星资料同化、质量评估方面研究. E-mail: 191686624@qq.com

(王 燕 编辑)

世界上首颗搭载全极化微波辐射计的 WindSat 卫星已经运行接近 15 a, 其遥感数据可用来反演海面风速、海面温度、水汽总量、云中液态水总量、降水率、海冰密集度和冰期等气象海洋参数, 其反演产品在我国气象海洋科学研究方面应用广泛^[11], 而目前有关 WindSat 大气可降水量产品精度检验的相关工作还很少见到报道。因此本文基于 15 个海岛探空资料对 WindSat 反演的 2007—2015 年海洋大气可降水量产品进行检验, 并对造成误差的原因进行分析, 相应结果对于更好地使用该产品具有一定的指导意义和应用价值。

1 数据及方法

1.1 探空资料

本文所使用的探空资料取自美国怀俄明州大学网站(<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>), 该网站同时公布了利用探空资料计算的大气可降水量值。经检验, 该网站发布的大气可降水量值与利用该网站发布的探空资料垂直积分所得结果一致, 因此本文直接使用该网站公布的大气可降水量进行对比检验。

1.2 卫星数据

本文使用的 WindSat 大气可降水量产品来自美国遥感系统 RSS(Remote Sensing System)网站(<http://www.remss.com>)公布的第七版数据, 该数据空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 其反演算法是在 AMSR-E 反演算法的基础上针对 WindSat 通道及设备改进得到的, 即多元线性回归算法, 该算法以辐射传输模型(RTM)为物理基础, 利用 WindSat 22 个通道进行海面地球物理参数的反演^[12]。

1.3 海岛探空站选取与比对数据匹配方法

首先在全球范围内选取距离陆地 25 km 以上的海岛探空站点, 选取卫星过顶时间与探空释放时间(世界时 00:00 及 12:00)相差不超过 2 h 的卫星观测值, 完成 2 种数据的时间匹配。由于 WindSat 采用海洋反演算法, 其水汽反演产品无法直接给出海岛上空的水汽值, 为了实现 2 种数据的空间匹配, 本文参考 Mears 等^[10]的方法, 利用网格数据线性拟合的方法确定探空站点处相应的大气可降水量值。

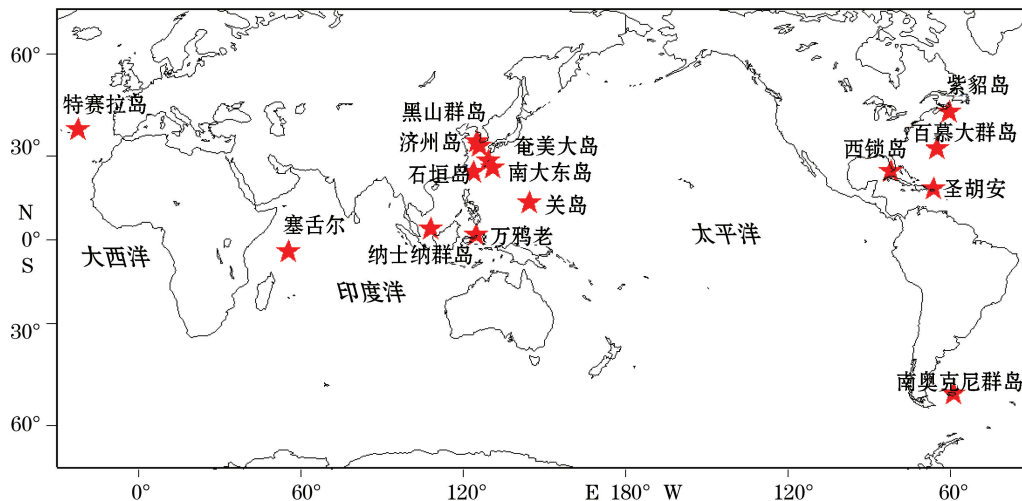


图 1 所选探空站点的空间分布

Fig.1 Location of selected radiosonde stations

按照以上筛选方法得到 12 个满足时空匹配的海岛探空站点。由于 WindSat 轨道的原因,满足 2 h 时间匹配的探空站点均分布在靠近大陆的海面,为了探讨该产品可能存在的陆地污染误差,作者对位于全球开放海面的探空站点进行收集整理,以 3 h 为时间窗口对样本进行筛选,得到了 PGAC, FSSS 和 Lages 三个站点以便与接近陆地的站点进行对比。最终选取了 15 个探空站点,其空间分布如图 1 所示。各站点的名称、地理位置、海拔高度、时间窗口及探空设备等详细信息见表 1。其中探空设备型号信息来自美国国家航空航天局 NASA 网站(<http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/wather-balloon/integrated-global-radiosonde-archive>)。

表 1 探空站名称、地理位置、时间窗口及设备信息

Table 1 Name, geographic location, time constraint, and the instrument of the radiosonde stations

站点名称	站点代号	WMO 编号	纬度	经度	海拔高度/m	时间窗口/h	探空设备
紫貂岛	WSA	71600	43°55'48"N	119°59'24"W	4	2	VAISALA RS80
西锁岛	KEY	72201	24°22'12"N	98°09'00"W	6	2	SIPPICAN B2
百慕大群岛	TXKF	78016	32°22'12"N	115°19'12"W	37	2	SIPPICAN Unspecified
圣胡安	TJSJ	78526	18°25'48"N	114°00'48"W	3	2	SIPPICAN B2
南奥克尼群岛	EGYP	88889	51°48'36"S	121°33'00"W	73	2	VAISALA RS13/15
黑山群岛	Heuksado	47169	34°40'48"N	125°27'00"E	69	2	KOREA JINYANG
济州岛	Cheju	47185	33°16'48"N	126°09'36"E	73	2	KOREA JINYANG
南大东岛	ROMD	47945	25°49'48"N	131°13'48"E	20	2	VAISALA RS92
石垣岛	ROIG	47918	24°19'48"N	124°09'36"E	7	2	MEISEI RS-01GM
奄美大岛	Naze	47909	28°22'48"N	129°33'00"E	295	2	MEISEI RSII-91
纳土纳群岛	Wion	96147	3°57'00"N	108°22'48"E	2	2	MEISEI UNSPECIFIED
万鸦老	WAMM	97014	1°31'48"S	124°54'36"E	80	2	SIPPICAN B2
关岛	PGAC	91212	13°28'48"N	144°48'00"E	75	3	SIPPICAN B2
塞舌尔	FSSS	63985	4°39'36"S	55°31'48"E	4	3	VAISALA RS92
特赛拉岛	Lages	08508	38°43'48"N	27°03'36"W	113	3	VAISALA RS92

注:“WMO”为世界气象组织

1.4 样本选取及海拔订正

Buehler 等^[13]指出,随着海拔高度的增加,大气中水汽密度呈近似指数函数下降,低海拔处的水汽含量对整层水汽的测量精度影响较大。由于利用探空资料计算的大气可降水量反映的是站点所处海拔高度以上的水汽含量,而卫星反演值代表的是海平面以上的水汽含量,因此两者之间存在测量高度差异。为便于对比,本文采用 Bock 等^[14]提出的海拔订正因子对卫星反演的大气可降水量产品进行了海拔高度订正。

海拔订正前后各个站点平均偏差的变化情况如图 2 所示,其中偏差为卫星反演值减去探空测量值(文中下同)。从图 2 可见,对于海拔高度小于 10 m 的站点,平均偏差在海拔订正前后无明显变化,随着海拔高度的增加,平均偏差在订正前后变化明显,且平均偏差在海拔订正后趋向于零,显示该方法具有较好的订正效果,因此本文将采用此种方法对卫星数据进行订正,并采用订正后的数据与探空数据进行比对检验。

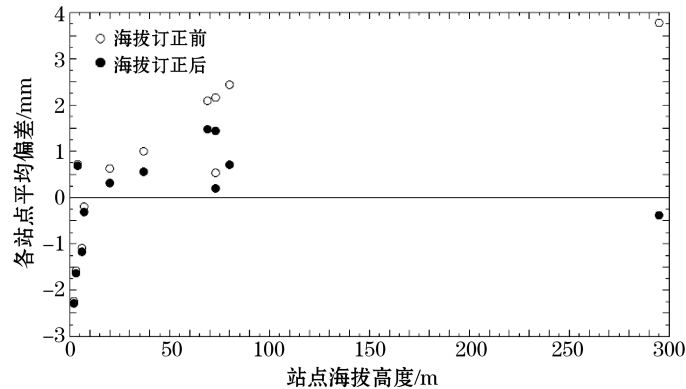


图2 海拔订正前后各站点平均偏差变化情况

Fig.2 Mean biases as a function of station elevation before and after the adjustment for station elevation

2 结果与分析

2.1 误差总体分析

WindSat 可降水产品与探空数据比对误差随时间变化情况如图 3 所示。图 3a 为平均偏差和标准偏差逐月变化情况,图 3b 为平均偏差和标准偏差逐年变化情况。由图 3a 可见, WindSat 在每年 1—3 月负偏差较大,在 6—8 月份正偏差较大;标准偏差大多分布于 $[2.5, 3.5]$ mm,且年周期变化不明显。由图 3b 可见, WindSat 年平均偏差和年标准偏差时间一致性较好,显示 WindSat 反演大气可降水产品的精度未随时间发生明显变化。

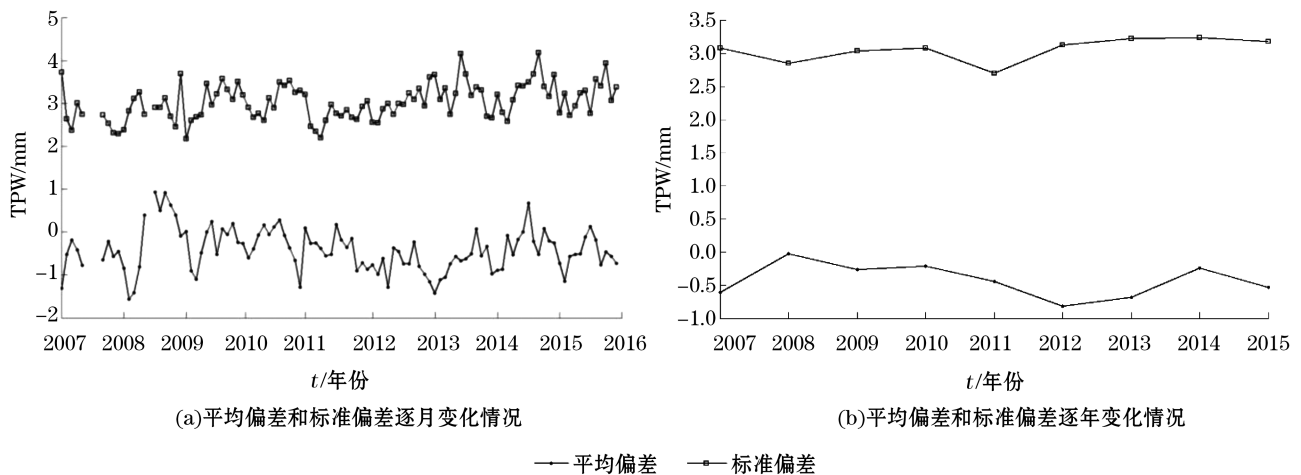


图3 WindSat TPW 与探空数据之间误差随时间变化情况

Fig.3 Time series analysis for the difference between WindSat and radiosonde

王雨等^[13]对第三代再分析资料中全球大气柱水汽含量气候态分布的研究表明,全球大气可降水量具有较为明显的纬度分布特点,因此本文将以 4 个不同纬度地区的测站为例对 WindSat 的反演误差展开分析,4 个测站按纬度由高到低依次为 EGY, WSA, Cheju 和 Wion。4 个测站 2007—2015 年 WindSat 反演值、探空测量值和两者之间偏差随时间的变化情况如图 4 所示。

图 4a 为 EGY 测站(南奥克尼群岛站点) WindSat 反演值和探空测量值及偏差随时间变化情况。

EGYP 经纬度为(121°33′00″W,51°48′36″S),海拔高度为 73 m,位于南美洲巴塔哥尼亚南部海岸以东约 500 km,探空设备为 VAISALA RS13/15,共有 1 692 个样本满足时空匹配。从图 4a 可见,该站点卫星反演大气可降水量的量值区间为 $[0, 25]$ mm,卫星反演值和探空测量值季节变化周期明显,偏差的量值在 9 a 间无明显变化,且偏差正负变化的幅度在所选站点中最小,显示卫星反演值与探空测量值在该站点一致性最好。

图 4b 为 WSA 测站(美国紫貂岛站点)WindSat 反演值和探空测量值及偏差随时间变化情况。WSA 经纬度为(119°59′24″W,43°55′48″N),海拔高度为 4.0 m,位于美国东海岸,探空设备为 VAISALA RS80,共有 2 099 个样本满足时空匹配。从图 4b 可见,该站点卫星反演大气可降水量的量值区间为 $[0, 55]$ mm,相较于 EGYPT 站点(图 4a),该站点大气可降水量季节性变化更加明显,偏差的变化幅度也有所增加,同时该站点夏季偏差略大。

图 4c 为 Cheju 测站(韩国济州岛站点)WindSat 反演值和探空测量值及偏差随时间变化情况。Cheju 经纬度为(126°09′36″E,33°16′48″N),海拔高度为 73.0 m,探空设备为 JINYANG,共有 1 012 个样本满足时空匹配。从图 4c 可见,该站点大气可降水量的量值区间为 $[5, 65]$ mm,样本分布相对 EGYPT 和 WSA 站较为稀疏,偏差多分布在“0”轴以上,尤其在每年夏季正向偏差更为明显。

图 4d 为 Wion 测站(印度尼西亚纳土纳群岛站)WindSat 反演值和探空测量值及偏差随时间变化情况。Wion 经纬度为(108°22′48″E,3°57′00″N),海拔高度为 2.0 m,探空设备为 MEISEI,共有 2 246 个样本满足时空匹配。从图 4d 可见,该站点卫星反演大气可降水量的量值总体较大,量值区间为 $[40, 75]$ mm,且无明显季节性变化,这是由于该站点位于赤道附近,水汽较为充沛造成的;卫星反演值(红色散点)几乎都分布在 65 mm(图中紫色直线)以下,偏差变化的幅度在所选站点中最大,偏差的绝对值最大可接近 20 mm,且该站点的偏差在 2011 年夏季后多分布在“0”轴以下,由此可见,WindSat 在该站点反演值存在明显系统性误差。

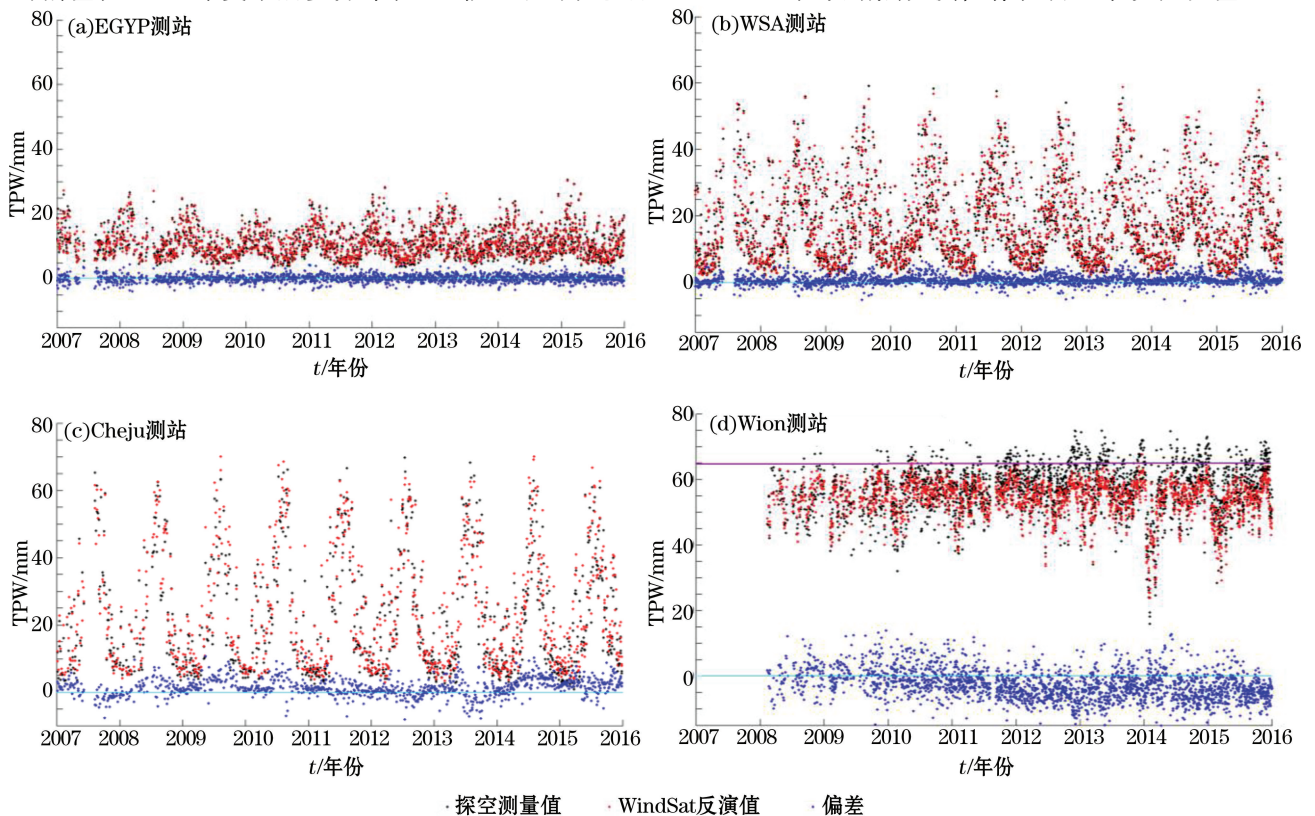


图 4 EGYPT, WSA, Cheju 和 Wion 测站 WindSat 反演值、探空测量值和偏差随时间变化情况

Fig.4 Example time series of WindSat retrievals, diosonde measurements and their difference at EGYPT, WSA, Cheju and Wion stations

对文中其他站点的测量值和误差随时间的变化情况进行类似分析可以得出相同的结论:对于高纬度地区而言,卫星反演大气可降水量量值较小,不超过 20 mm,偏差沿零轴正负均匀分布且偏差的绝对值均小于 5 mm;对于中纬度地区而言,卫星反演大气可降水量季节性变化明显,夏季偏差略大于冬季偏差;对于低纬度地区而言,卫星反演大气可降水量的量值在全年均大于 40 mm,季节性变化不明显,偏差较为分散且变化幅度较大。

图 5a~图 5d 分别为 EGYPT, WSA, Cheju, Wion 站点卫星反演值与探空测量值的比对结果。由图 5a~图 5c 可见,中高纬度地区探空测量值与卫星反演值比对一致性较好,散点对称分布在 $y=x$ 线两侧附近,线性相关系数大于 0.97;从图 5d 可见,低纬度地区两者散布情况略差,线性相关系数为 0.81,且散点较多分布在 $y=x$ 线以下,显示卫星反演值在低纬度地区低于探空测量值。

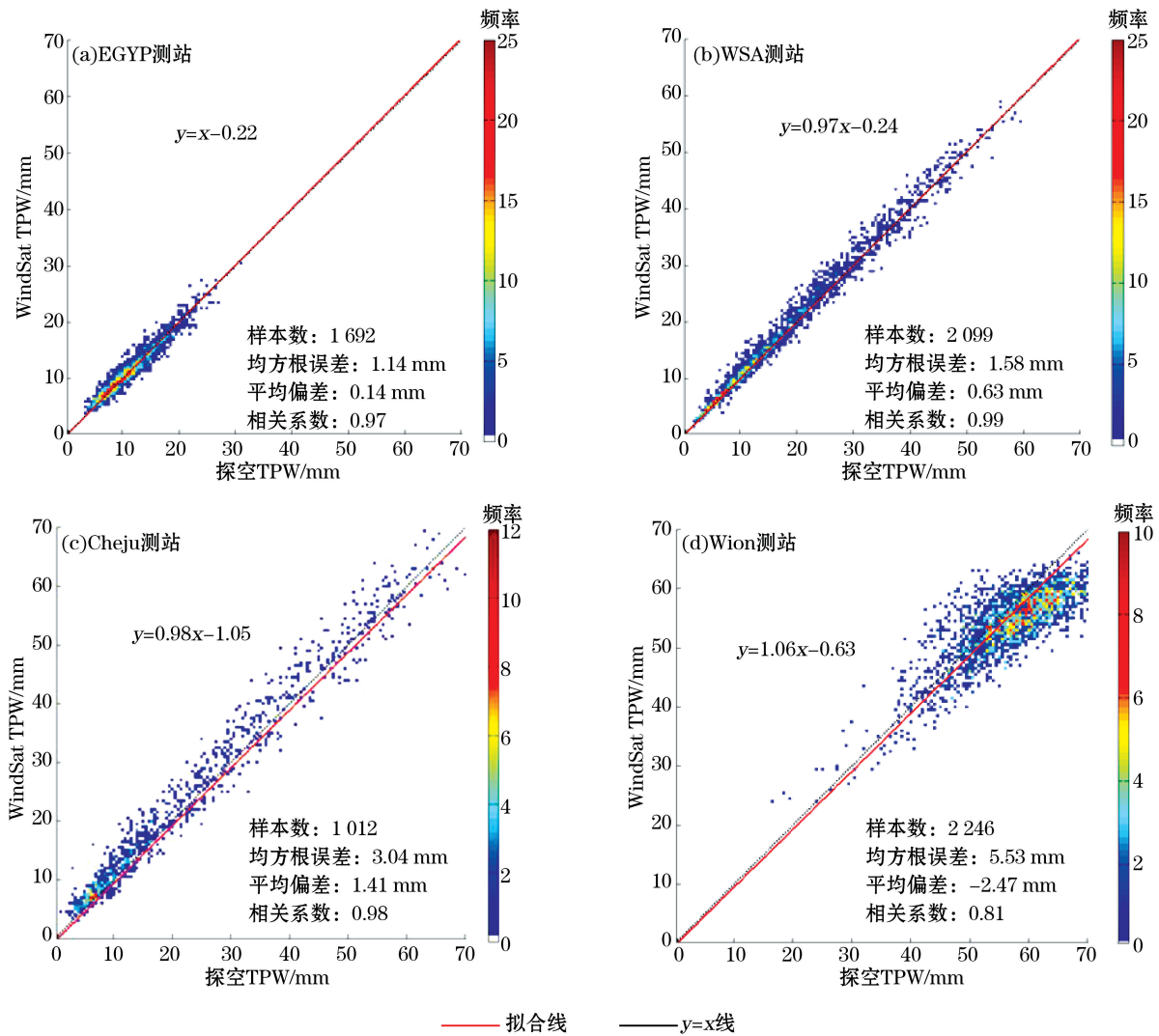


图 5 EGYPT, WSA, Cheju 和 Wion 测站 WindSat 反演值与探空测量值比对结果

Fig.5 The comparison between WindSat retrievals and radiosonde measurements at EGYPT, WSA, Cheju and Wion stations

考虑到个别粗大误差对于整体统计结果的影响,本文利用数理统计方法中的 3σ 原则^[16],对距离样本平均值三倍标准差范围以外的粗大误差进行了剔除,在本文满足时空匹配的 18 779 个样本中共剔除了 225 个粗大误差(占比 1.2%),剔除前后 WindSat 与探空资料的标准偏差由 3.47 mm 减少至 3.11 mm,剔除粗大误差后 WindSat 可降水产品与探空资料比对的总体结果如图 6 所示。从图 6 可见:在 $[0, 15]$ mm 分布于 $y =$

x 以上的散点较多,说明 WindSat 反演大气可降水量在低值区间略大;(15, 60] mm 区间散点对称分布于 $y=x$ 上下,说明 WindSat 在该区间平均偏差较小,反演精度较好;(60, 75] mm 区间散点大多分布于 $y=x$ 以下,说明 WindSat 反演值在高值区间偏小。

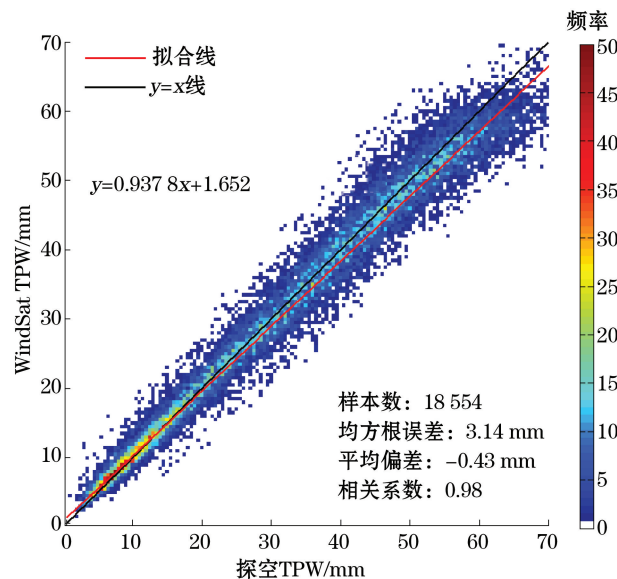


图 6 WindSat 反演值与探空测量值比对总体结果

Fig.6 The comparison between WindSat and radiosonde measurements

各个站点的测量平均值、平均偏差、均方根误差以及标准偏差的统计结果见表 2。分析可知,2 种水汽资料总体上一致性较好,在所选的 15 个站点中,10 个站点的平均偏差小于 1 mm,11 个站点的标准偏差小于 3 mm;在测量平均值和纬度值均相近的情况下,靠近大陆的站点与开放海面的探空站点相比,误差情况比较接近(如 Cheju 站点和 Lages 站点的均方根误差分别为 3.04 和 3.11),这是由于 RSS 在反演 WindSat 可降水产品时对数据进行了质量控制,剔除了受到陆地辐射污染的数据,这在一定程度上减弱了陆面污染对检验结果的影响。

表 2 各探空站点误差统计结果

Table 2 Statistics of the WindSat retrievals for each station

探空站点	平均偏差/mm	均方根误差/mm	标准偏差/mm	测量平均值/mm	样本数
WSA	0.63	1.58	1.44	18	2 099
KEY	-1.19	2.99	2.74	37	3 203
TXKF	0.50	2.14	2.08	30	2 067
TJSJ	-1.58	3.33	2.93	42	2 385
EGYP	0.14	1.14	1.13	11	1 692
Heuksado	1.27	2.82	2.52	20	1 125
Cheju	1.41	3.04	2.69	23	1 012
ROMD	0.27	2.13	2.12	38	197
ROIG	-0.25	2.32	2.31	42	931
Naze	-0.41	2.41	2.38	31	382
Wion	-2.74	5.33	4.57	57	2 246
WAMM	0.71	4.48	4.43	51	326
PGAC	0.13	2.92	2.93	47	159
FSSS	0.58	4.35	4.31	47	646
Lages	-0.29	3.11	3.01	22	97

2.2 误差特性分析

由于 WindSat 与探空之间的误差呈现站点分布的特点,即误差可能与各站点所处地理环境及气象要素有关,因此本节将对各站点的水汽测量值(假设探空测量值为大气可降水的相对真值)、海面风速、海面温度、云中液态水、纬度分布和昼夜光照条件与误差的相关性进行分析,并讨论以上各因素对可降水反演精度的影响。

2.2.1 误差与测量值的相关性分析

按照年份对各站点样本进行统计时,发现 12 个站点的年平均偏差、年标准偏差和年均方根误差并未随年份发生明显变化,而 Cheju, Wion 和 WAMM 三个站点的平均偏差、标准偏差和均方根误差在不同年份存在明显差异,本节对 3 个站点误差的年变化进行分析,对引起误差发生变化的原因进行讨论。

Cheju, Wion 和 WAMM 测站平均偏差、均方根误差、标准偏差及测量值年变化情况见图 7。图 7a~图 7c 中折线分别代表 3 个站点每年的平均偏差、标准偏差和均方根误差变化情况,从图 7a 可见,Cheju 站点在 2009 年平均偏差和标准偏差明显大于其他年份,而对距离 Cheju 站点最近,且采用相同的 J/Yang 探空设备的 Heuksado 站点进行相关分析时,未发现误差出现相似的变化情况,表明此种现象可能是由于 Cheju 站点 2009 年的探空资料发生质量问题引起的。Wion 和 WAMM 站点均方根误差和标准偏差年变化不明显,而平均偏差在 2011 年前后变化明显;图 7d 为 Wion 和 WAMM 站点每年探空测量的平均值变化情况,图中虚线代表 55 mm 水平线,结合两站点年平均偏差变化情况(图 7b 和图 7c 中带实心点的折线)可以发现,2 个站点的年平均偏差与探空测量的平均值变化趋势相反,且以 55 mm 为界限,在探空测量平均值大于 55 mm 的年份,平均偏差往往为负值且平均偏差的绝对值较大。

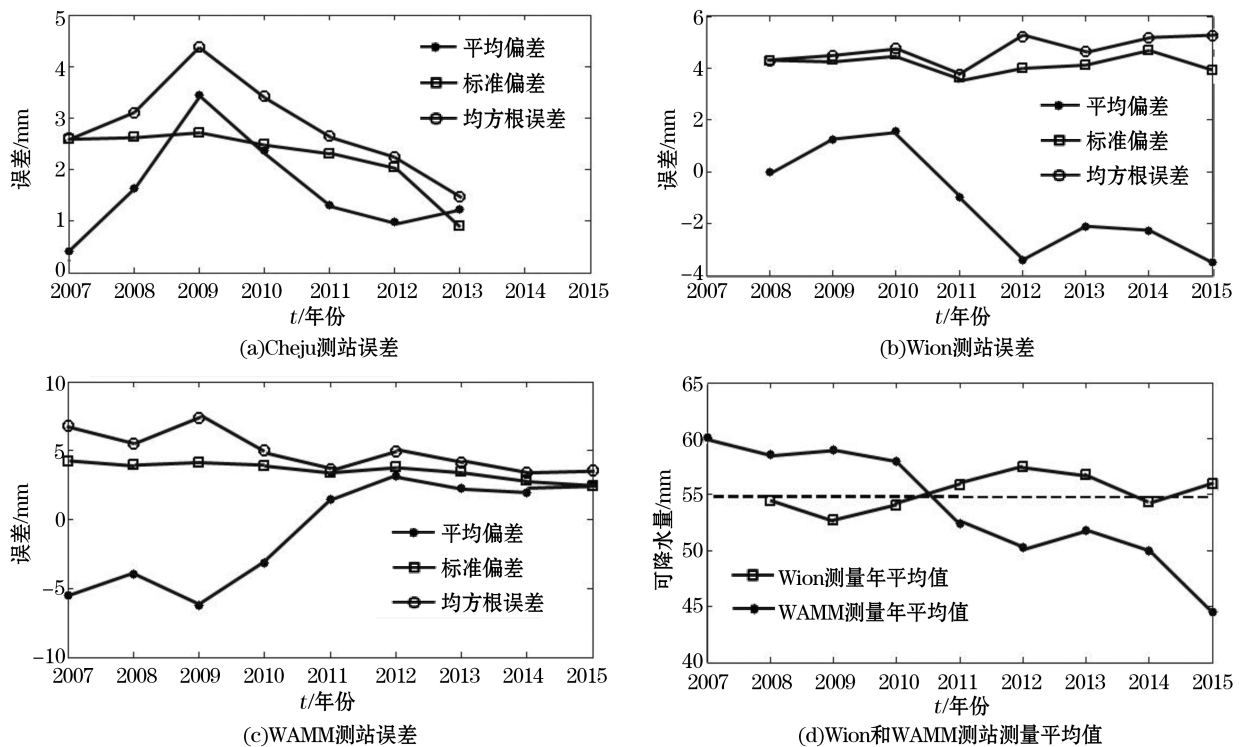


图 7 Cheju, Wion 和 WAMM 测站误差年变化情况及 Wion 和 WAMM 测站测量平均值年变化情况

Fig.7 Variation of annual mean error of Cheju, Wion, WAMM stations, as well as variation of annual mean value of Wion and WAMM stations

Wion 和 WAMM 站点年平均偏差与探空测量平均值之间的关系如图 8 所示,分析图 8 可得不同年份的平均偏差随着测量平均值的增大朝着负向下降明显,经计算,两者之间的线性相关系数可达 0.86,即在测量平均值大于 52 mm 的年份中,年平均偏差值与测量平均值之间存在较为明显的线性相关性。

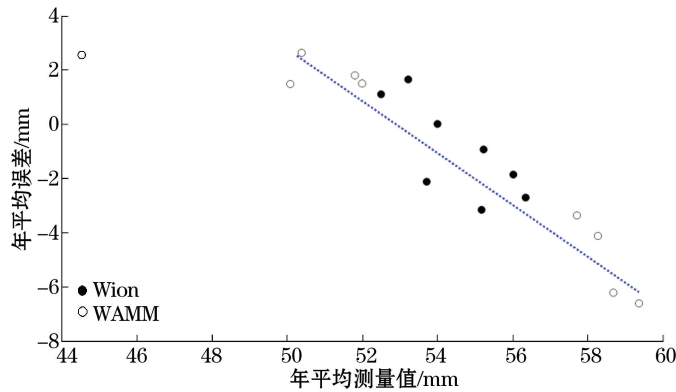


图 8 Wion 和 WAMM 站点年平均偏差与年平均测量值散点图

Fig.8 Scatter plots of annual mean bias and mean value of each year at Wion and WAMM stations

通过进一步计算 WindSat 反演值的偏差与探空测量值的线性相关系数可以发现,Wion 和 WAMM 站点的偏差与该站点 WindSat 大气可降水量反演值的线性相关系数为 -0.51 ,说明位于赤道附近的 2 个站点卫星反演偏差与其测量值存在一定的相关性。为了反映 WindSat 全量程范围内误差的变化情况,统计了平均偏差和标准偏差与探空测量值之间的函数分布情况,如图 9 所示。从图中可见,当测量值小于 50 mm 时,卫星与探空测量值一致性较好,平均偏差靠近“0”轴;当测量值大于 50 mm 时,平均偏差朝着负向变化趋势非常明显;结合图 4d,图 8 和图 9 分析可得,在测量值高值区间 WindSat 反演值具有明显的负偏差。

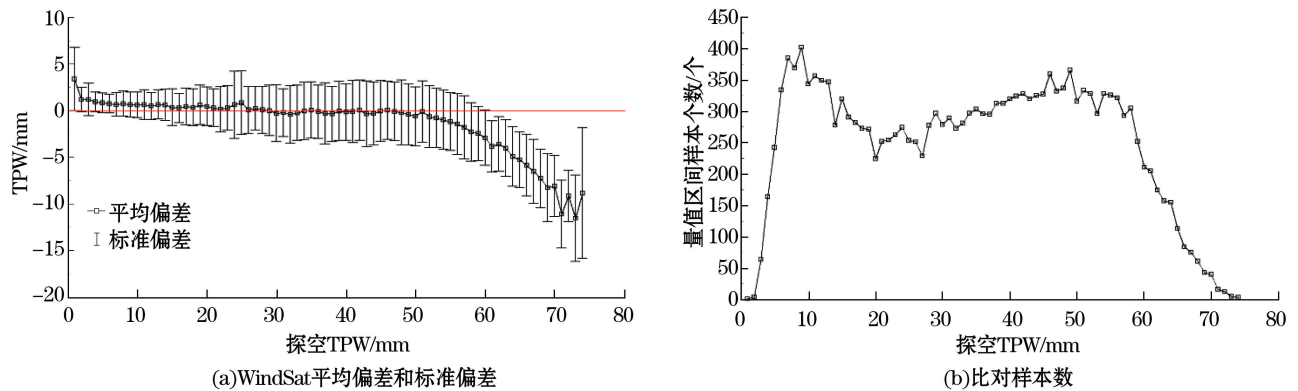


图 9 WindSat 平均偏差、标准偏差和样本数随探空测量值变化情况

Fig.9 Mean bias, standard deviation and sample number as a function of radiosonde TPW

计算误差概率分布密度随探空测量值的变化情况如图 10 所示,可见,不同区间内的误差均近似服从正态分布,当探空测量值处于(70, 75) mm 时,80%偏差落在 $(-18, -5)$ mm 区间,期望值为 -9 mm;当探空测量值处于(60, 75) mm 区间时,80%偏差落在 $(-12, 8)$ mm 区间,期望值为 -6 mm;随着探空测量值取值区间下限变小,期望值越接近“0”,当探空测量值取值区间为(40, 75) mm 时,期望值几乎为“0”,由此可见,当 TPW 处于高值区间时,WindSat 反演值偏小,存在较为明显的系统偏差。Mears 等^[10]利用地基 GPS 数据对 SSM/I,SSM/I/S 和 AMSR-E 可降水产品进行比对时,也指出多个星载微波辐射计在 60 mm 以上测量区间内反演精度有所下降。

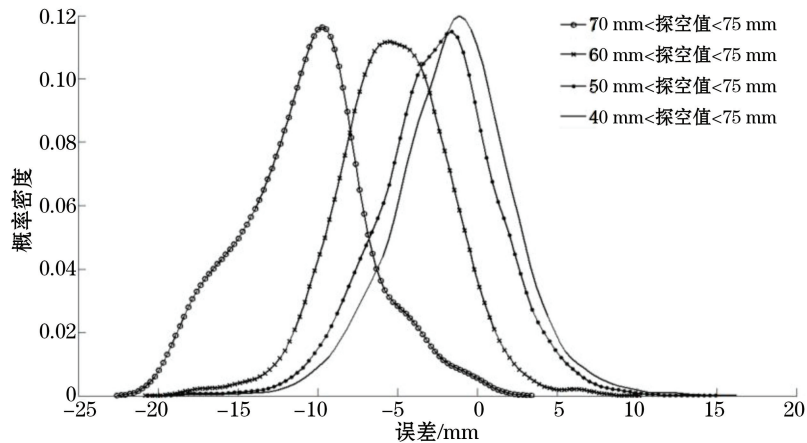


图 10 偏差分布随探空测量值变化情况

Fig.10 Variation of the distributions of the difference between WindSat and radiosonde measurements

2.2.2 误差与海面风速、海面温度及云中液态水的相关性分析

利用 RSS 公布的 WindSat 海面风速、海面温度和云中液态水产品对误差进行相关性分析, 获得其平均偏差和标准偏差随风速(图 11a)、温度(图 11b)、云中液态水(图 11c)的变化情况。

由图 11a 可见, 风速为 $[1.5, 8.5]$ m/s 时, WindSat 平均偏差随风速呈近似线性下降的趋势, 标准偏差随风速变化不明显。多位学者对这一现象产生的原因进行了探究, Sohn 和 Smith^[9]指出统一化的海洋微波反演算法(UMORA)在对水汽进行反演时, 过高估计了风速的影响, 导致反演的水汽值随风速增加而减小; Wang 等^[17]指出此种现象是由于高频通道(例如 22 和 37 GHz)对低风速不敏感, 在统一化的海洋微波反演算法(UMORA)引入较大的不确定性引起的。

由图 11b 可知, 对于标准偏差而言, 当海面温度小于 290 K 时, 基本保持在 $[1, 2.5]$ mm, 当海面温度大于 290 K 时, 明显增大所致。最大可达 4 mm; 对于平均偏差而言, 当海面温度大于 302 K 时呈现负值, 这可能是由海面温度较高的区域通常对应低纬度地区, 而低纬度地区水汽充沛、可降水量量值较大所致。结合误差随测量值变化情况(图 9)分析可知, 平均偏差和标准偏差随海温的变化是由于 WindSat 在不同量值区域内反演精度不同引起的, 海面温度并不直接影响可降水的反演精度。

图 11c 显示, 随着云中液态水量值增加, 平均偏差和标准偏差变化不明显, 分别在 -0.5 和 3 mm 上下小幅度浮动, 表明云中液态水对大气可降水反演精度影响不明显。

2.2.3 误差与纬度的相关性分析

各站点标准偏差和测量平均值与纬度的散点分布如图 12 所示, 可见, 各个站点的标准偏差、测量平均值与站点所在的纬度具有明显的相关性。此种现象一方面是由于低纬度区域水汽含量较为充足, 而 WindSat 在高值区间反演精度下降明显; 另一方面是由于低纬度地区天气情况变化迅速, 水汽变化速度较快, 增大了 2 种资料时空不匹配造成的随机误差。对样本按照站点所在纬度进行归类, 可定量给出各个纬度区域的误差统计结果(表 3)。由表 3 可见, WindSat 在中高纬度区域反演精度较好, 平均偏差小于 1 mm, 均方根误差及标准偏差小于 3 mm; WindSat 在低纬度地区反演大气可降水量精度较差, 均方根误差及标准偏差可达 5 mm, 且存在明显的系统偏差。

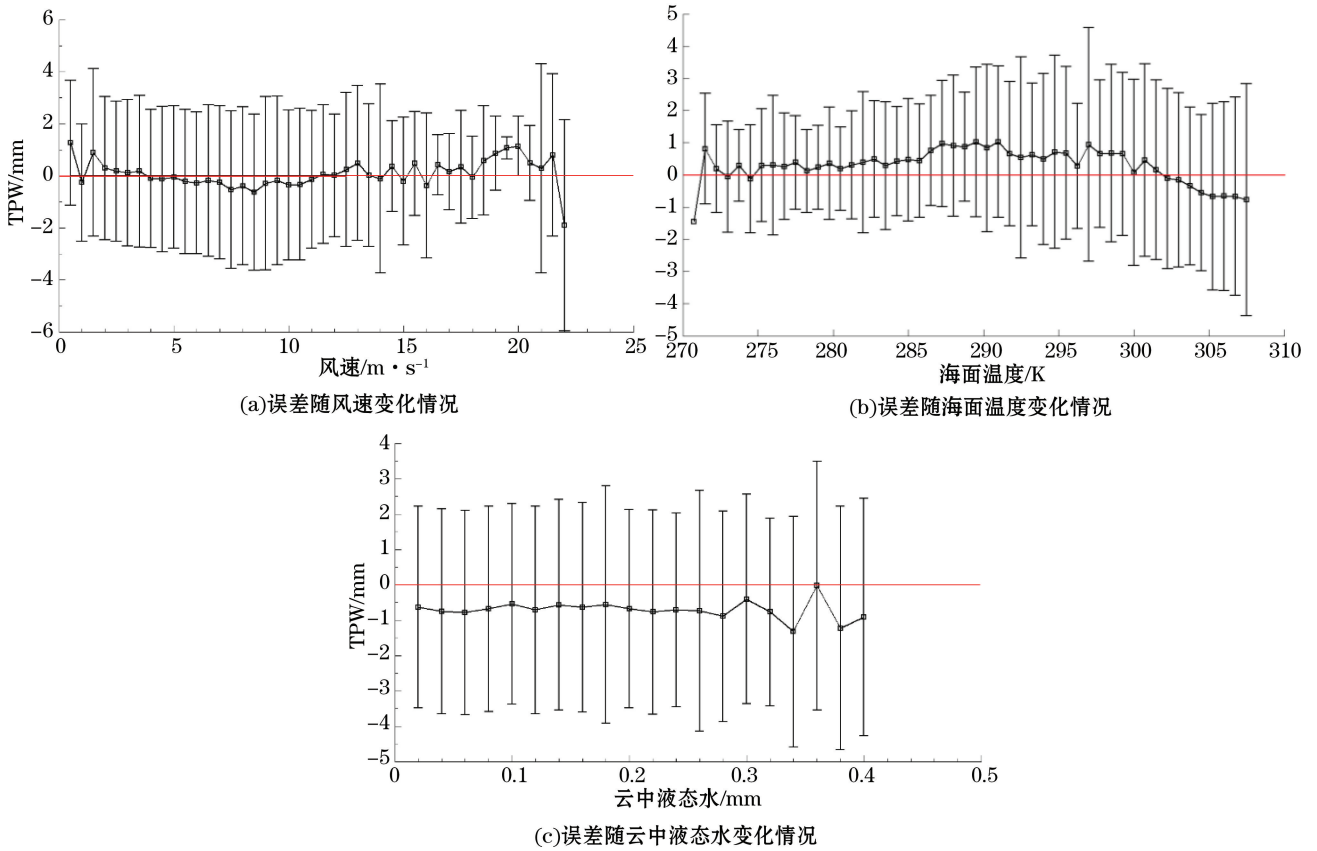
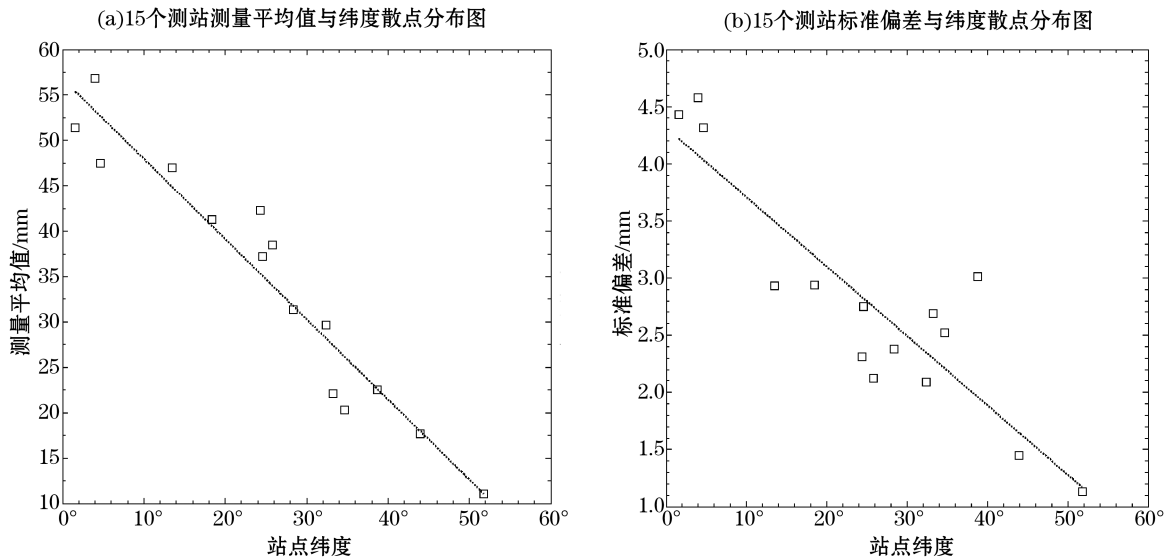


图 11 误差随海面风速、海面温度以及云中液态水变化情况

Fig.11 Mean bias and standard deviation as a function of wind speed, SST and total cloud water



注:图中横坐标纬度代表各站点纬度的绝对值

图 12 各站点测量值和标准偏差随纬度变化情况

Fig.12 Mean bias and standard deviation as a function of latitude for each stations

表 3 误差的纬度分布情况

Table 3 Mean bias, standard deviation and RMS in different latitudes

纬度	平均偏差/mm	标准偏差/mm	均方根误差/mm	测量平均值/mm	样本数
(0°, 20°]	-1.87	4.62	5.06	53.81	5 762
(20°, 30°]	-0.48	2.79	2.83	35.62	4 713
(30°, 40°]	0.91	2.60	2.80	26.00	4 301
(40°, ~50°]	0.43	1.58	1.64	16.53	3 791

注:纬度代表各个站点的纬度绝对值

2.2.4 偏差与昼夜光照条件的相关性分析

昼夜两次探空释放均满足与卫星过顶时间匹配的站点共有 6 个,对其误差在昼夜 2 种光照条件下的分布情况进行分析可以得到,5 个站点白天的误差分布偏向正向(图 13a,图 13c 和图 13d),另外 1 个站点的误差昼夜变化不明显(图 13b)。图 14 为 WindSat 与探空之间总体误差的昼夜概率密度分布情况,可见,WindSat 与探空之间比对的误差在白天总体偏向正向,这与 Wang 和 Zhang^[18]将探空资料与地基 GPS 进行比对所得的结论相同,即白天探空释放所得的水汽数据存在干性误差,这是由于探空携带的湿度传感器易受到太阳辐射的影响,测得的湿度值低于实际值,导致利用探空资料计算所得的大气可降水量偏小^[19]。

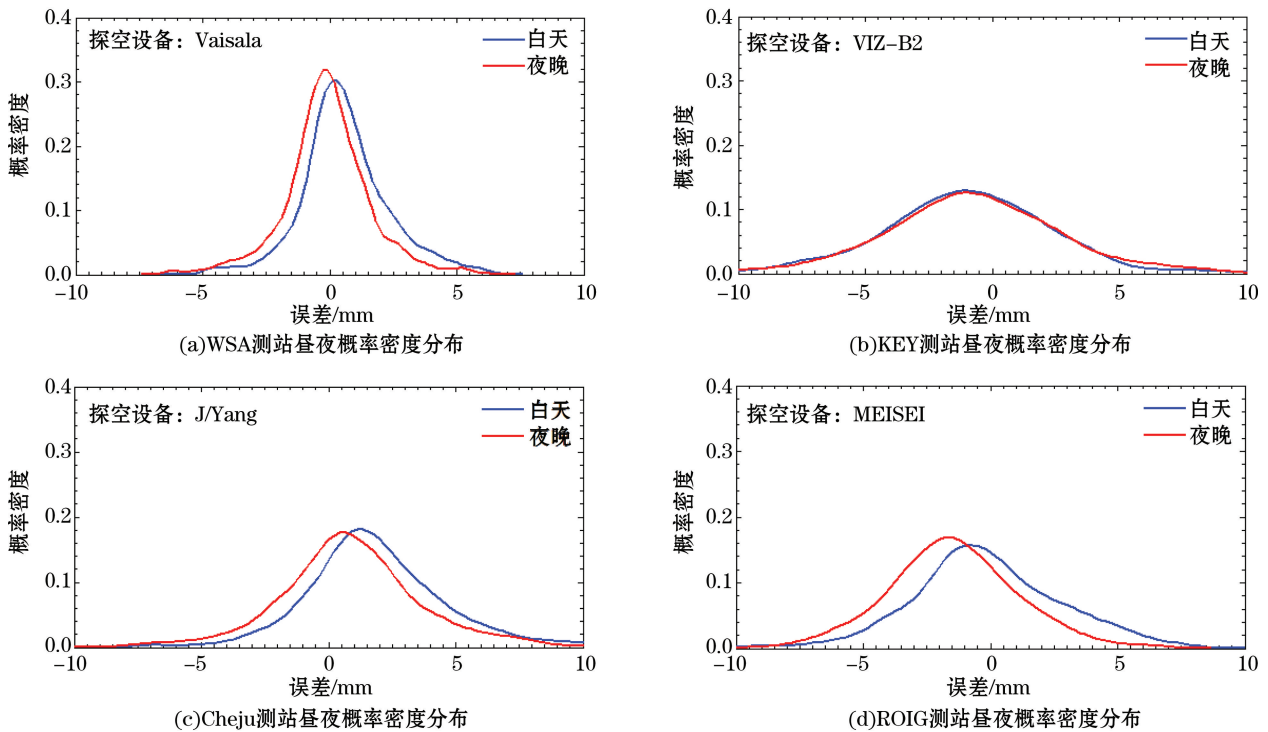


图 13 WSA,KEY,Cheju 和 ROIG 测站误差昼夜概率密度分布情况

Fig.13 Probability density of the errors for WSA,KEY,Cheju and ROIG stations

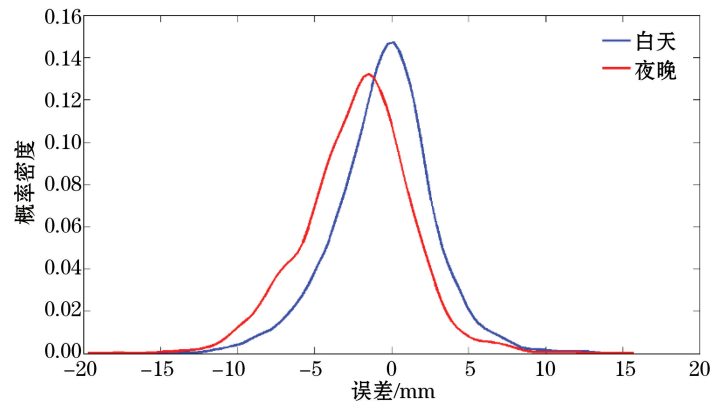


图 14 总体偏差昼夜概率密度分布情况

Fig.14 Probability density of the errors for all stations

3 结 论

本文以 2007—2015 年的 WindSat 卫星反演大气可降水量产品为评估对象,以海岛探空资料计算的大气可降水量为验证数据,对 WindSat 反演可降水产品的偏差以及偏差与测量值、风速、海面温度、云中液态水、纬度和昼夜光照条件等之间的相关性进行了详细分析。

WindSat 大气可降水量产品与探空测量值之间平均偏差为 -0.43 mm,标准偏差为 3.11 mm;在所选的 15 个站点中,探空测量值与卫星计算值一致性均较好,其中 10 个站点的平均偏差小于 1 mm,均方根误差以及标准偏差小于 3 mm,线性相关性大于 0.97;WindSat 反演值在低值区间偏大,在高值区间偏小,且平均偏差及标准偏差具有明显的站点分布的特点;偏差与测量值的相关性分析表明,卫星在对高值区间进行反演时精度略差,具有明显的负向偏差;误差与风速的相关性分析表明,低风速对 WindSat 可降水反演精度影响较大;误差与海面温度及云中液态水的相关性分析表明,海面温度和云中液态水对可降水反演精度影响不明显;对偏差的纬度分布进行研究表明,随着纬度降低标准偏差明显增大,WindSat 反演精度下降明显;通过对昼夜不同光照条件下偏差的分布情况进行分析表明,利用白天释放的探空资料计算所得的可降水量值偏小。

总体而言,Windsat 大气可降水量产品在中高纬度地区反演效果较好,在低纬度地区反演精度略差些,尤其在大气水汽含量非常充沛时,卫星反演的大气可降水量存在系统性偏小现象,建议改进低纬度地区 WindSat 大气可降水量反演算法以提高反演精度。

参考文献 (References):

- [1] WANG J H, ZHANG L Y. Climate applications of a global, 2-hourly atmospheric precipitable water dataset derived from IGS tropospheric products[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3): 209-217.
- [2] MCCARTHY M P, THORNE P W, TITCHNER H A. An analysis of tropospheric humidity trends from radiosondes[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22: 5820-5838.
- [3] MEARS C A, SANTER B D, WENTZ F J, et al. Relationship between temperature and precipitable water changes over tropical oceans [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(24): 497-507.
- [4] ZHANG G, XU J M, HUANG Y B. Remote sensing of total column precipitable water vapor with two sun reflectance channels of FY-1C satellite[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(4): 385-394. 张弓, 许健民, 黄意珍. 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[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(4): 385-394.
- [5] HU X Q, HUANG Y B, LU Q F, et al. Retrieving precipitable water vapor based on the Near-infrared data of FY-3A satellite[J]. *Jour-*

- nal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(1): 46-56. 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[J]. 应用气象学报, 2011, 22(1): 46-56.
- [6] LI Y, WANG Z Z. Retrievals of sea surface temperatures, wind speeds, volume water vapor contents from SZ-4 RAD brightness temperatures[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(1): 133-136. 李芸, 王振占. “神舟 4 号”飞船微波辐射计亮温反演海面温度、风速和大气水汽含量[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 133-136.
- [7] FAN S J. Research on GPS marine water vapor inversion and three dimensional water vapor tomography[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013: 94-96. 范士杰. GPS 海上水汽信息反演及三维层析研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013: 94-96.
- [8] WENTZ F J. A Well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans(1978—2012), 1997, 102(C4): 8703-8718.
- [9] SOHN B J, SMITH E A. Explaining sources of discrepancy in SSM/I water vapor algorithms[J]. Journal of Climate, 2010, 16(20): 3229-3255.
- [10] MEARS C A, WANG J H, SMITH D, et al. Intercomparison of total precipitable water measurements made by satellite-borne microwave radiometers and ground-based GPS instruments[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120: 2492-2504.
- [11] ZHANG Y, LÜ D R. Vicarious calibration of WindSat polarimetric channels based sea surface background[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(5): 727-734. 张勇, 吕达仁. 一种基于海面背景的 WindSat 极化通道替代定标方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(5): 727-734.
- [12] MEISSNER T, WENTZ F. Ocean retrievals for WindSat: radiative transfer model, algorithm, validation[C]// WENTZ F. Oceans. Santa Rosa: IEEE Xplore, 2006: 130-133.
- [13] BUEHLER S A, STMAN S, MELSHEIMER C, et al. A multi-instrument comparison of integrated water vapour measurements at a high latitude site[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2012, 12(8): 10925-10943.
- [14] BOCK O, BOUIN M, WALPERSDORF A, et al. Comparison of ground-based GPS precipitable water vapour to independent observations and NWP model reanalyses over Africa[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2007, 133(629): 2011-2027.
- [15] WANG Y, ZHANG Y, FU Y F, et al. A climatological comparison of column-integrated water vapor for the third-generation reanalysis datasets[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(12): 1895-1906. 王雨, 张颖, 傅云飞, 等. 第三代再分析水汽资料的气候态比较[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(12): 1895-1906.
- [16] FRIEDRICH P. The three sigma rule[J]. The American Statistician, 1994, 48(2): 88-91.
- [17] WANG Y, FU Y F, LIU G, et al. A new water vapor algorithm for TRMM Microwave Imager (TMI) measurements based on a log linear relationship[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114(D21): 6149-6150.
- [18] WANG J H, ZHANG L Y. Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements[J]. Journal of Climate, 2008, 21(10): 2218-2238.
- [19] VOMEL H, SELKIRK H, MILOSHEVICH L, et al. Radiation dry bias of the vaisala RS92 humidity sensor[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2007, 24(6): 953-963.

Verification of WindSat Total Precipitable Water Based on the Comparison With Island Radiosonde Data

YIN Yan-tong^{1,2}, GUAN Ji-ping^{1,3}, LIU Gao-fei¹, SONG Qing-tao⁴

(1. *Institute of Meteorology and Marine, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China;*

2. Xichang Satellite Launch Center, Xichang 615000, China;

3. National Key Laboratory on Electromagnetic Environmental Effects and Electro-optical Engineering,

PLA Army Engineering University, Nanjing 210007, China;

4. National Satellite Ocean Applications Service, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the radiosonde data from 15 stations located on islands, accuracy of the total precipitable water (TPW) measurements over oceans made by WindSat from 2007 to 2015 is assessed in this paper, and the cause of the differences between the two measurements is analyzed. It is shown that the satellite retrievals over ocean scenes agree well with the radiosonde measurements, with a total mean bias of -0.43 mm, root-mean-square-error of 3.14 mm, standard deviation of 3.11 mm and correlation coefficient of about 0.98. The satellite retrieval algorithm has a good performance in the middle and high latitudes, with the root-mean-square-errors of less than 3 mm, while the accuracy of the satellite retrievals in low latitudes is much poor, with a root-mean-square-errors of more than 5 mm. Low wind speed has the significant influence on the TPW retrievals, while the TPW product shows little relationship with the SST and cloud water. The accuracy of the TPW retrievals deteriorates distinctly as the latitude decreases. Radiosonde TPW data obtained by sounding at daytime is plagued by a dry bias.

Key words: total precipitable water; WindSat; radiosonde; verification of satellite products; microwave radiometer

Received: January 6, 2017