

衡志炜, 傅云飞. 2014. 格点尺度对 TRMM 微波成像仪云水数据的影响 [J]. 气候与环境研究, 19 (6): 693–702, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13049. Heng Zhiwei, Fu Yunfei. 2014. Impact of gridding scale on TRMM microwave imager cloud water information [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (6): 693–702.

格点尺度对 TRMM 微波成像仪云水数据的影响

衡志炜 傅云飞

中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026

摘 要 选取热带测雨卫星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 微波成像仪 (TRMM Microwave Imager, TMI) 液态水路径 (liquid water path, LWP) 轨道像元数据为研究对象, 探讨了将瞬时探测以及逐月的像元数据进行格点化 (0.1° 、 0.25° 、 0.5° 、 1.0° 和 2.5° 五种格点分辨率) 时, 格点数据的失真情况。对 TMI 瞬时探测的个例分析结果表明, 细分分辨率 (0.1° 、 0.25° 和 0.5°) 格点能保留原始像元数据的细节; 而随着网格变粗, 细节受到较大的平滑。因此对于中尺度到天气尺度的天气系统分析而言, 将卫星轨道数据处理到网格尺度不大于 0.5° 的格点更合适。对逐月 LWP 像元资料格点化处理的分析表明, 细分分辨率格点能保留 LWP 空间分布细节, 尽管 5 种分辨率下 LWP 的概率密度分布 (probability density function, PDF) 均相近。因此, 对月尺度及以上的气候分析研究而言, 格点尺度大小对卫星像元数据格点化的影响不显著。最后利用本实验室计算的 TMI/LWP 格点数据与欧洲中期数值预报中心再分析资料 (European Centre for Medium-range Weather Forecasts Interim reanalysis, ERA-Interim) 和 NCEP 再分析资料 (NCEP Climate Forecast System Reanalysis, NCEP CFSR) 进行了对比, 发现两种再分析资料都高估了 LWP; TMI/LWP 格点数据与两种再分析资料 LWP 的多年变化趋势大致相同。

关键词 热带降雨测量卫星微波成像仪 液态水路径 水平分辨率

文章编号 1006-9585 (2014) 06-0693-10

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13049

Impact of Gridding Scale on TRMM Microwave Imager Cloud Water Information

HENG Zhiwei and FU Yunfei

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract Satellite observation data are valuable for model evaluation, but to readily compare satellite-based data with model simulations, swath pixel data must first be gridded. In this study, data distortions caused by gridding (0.1° , 0.25° , 0.5° , 1.0° , and 2.5° gridding resolutions) are investigated using instantaneous and monthly pixel data from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Microwave Imager (TMI) liquid water path (LWP) data. Results from this case study show that data gridded at grid scales of 0.1° , 0.25° , and 0.5° retain more local details in the instantaneous pixel data, while the details tend to be smoothed out at coarser grid resolutions. So data with grid scales no coarser than 0.5° are suitable for analyzing weather activities from the mesoscale to the synoptic scale. In terms of the monthly pixel LWP, data with gridding resolutions of 0.1° , 0.25° , and 0.5° also retain more detail. Although, probability density functions (PDF) of the LWP show similar patterns at all the gridding scales considered. So when analyzing monthly

收稿日期 2013-03-21 收到, 2013-06-05 收到修定稿

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05100303, 国家公益性行业支撑项目 GYHY201306077, 国家重点基础研究发展计划 2010CB428601, 国家自然科学基金 41230419、41075041、41230419

作者简介 衡志炜, 男, 1985 年出生, 博士研究生, 主要从事卫星遥感和数值模式的研究。E-mail: hzwjy@mail.ustc.edu.cn

通讯作者 傅云飞, E-mail: fyf@ustc.edu.cn

LWP data, the impact of gridding scales is not significant. Finally, this study compared the gridded TMI LWP data with the European Centre for Medium-range Weather Forecasts Interim reanalysis (ERA-Interim) and NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), and found that both of these reanalyses overestimate the magnitudes of the LWP. Gridded TMI LWP data, the ERA-Interim, and the CFSR show reasonably similar regularities in the variance of the LWP.

Keywords TRMM Microwave Imager (TMI), Liquid water path, Horizontal resolution

1 引言

随着卫星探测手段的进步、传感器性能的提升,卫星资料已经成为天气和气候研究中不可缺少的数据来源(Stephens and Kummerow, 2007; 邱金桓等, 2008)。此外,卫星资料也常被用于数值模式的检验分析中(Eliasson et al., 2011; 衡志炜等, 2011; Fu et al., 2012; Li et al., 2012),对数值模式的改进起到了积极的作用。

由于星载仪器的在轨高度、探测方式等参数不同,其探测结果具有不同的空间分辨率。比如有些仪器的可见光和红外探测结果的空间分辨率为 1 km 左右(Mitchell and D'Entremont, 2012);被动微波仪器的分辨率可为 10 km(Ferraro and Marks, 1995);而地球辐射收支实验(Earth Radiation Budget Experiment, ERBE)大气辐射产品分辨率约为 2.5°(Hartmann et al., 1992)。同时,数值模式的空间分辨率也有较大差别:中尺度天气模式主要是对 10 km 左右的天气过程进行模拟(吕光辉等, 2009; 何晖等, 2012),而气候模式的结果为 2°~5°不等(Dufresne and Bony, 2008)。将卫星探测结果应用于模式的检验时,需要先将卫星像元数据和模式数据进行匹配,建立与模式分辨率对应的数据集,这就会涉及到卫星像元数据的格点化处理以及数据空间分辨率的改变。

分辨率的改变会对数据带来怎样的影响? Kassianov et al. (2005)使用地基观测资料对云的短波辐射特性进行研究时发现,当太阳天顶角较大时,垂直方向像元分辨率的改变对辐射特性有显著影响。Krijger et al. (2007)将中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)反演的云掩膜(cloud mask)产品处理为水平分辨率 3 km×3 km 至 99 km×99 km 不等的的数据,发现像元分辨率越粗晴空区的比例越小。Koren et al. (2008)通过分析 LandSat 1.65 μm 反射率发现,当分辨率从 30 m 降低到 1 km 时,晴空区

的反射率增加了 20%;云区反射率减少了 50%,但云的覆盖范围加倍。de la Torre Juárez et al. (2011)的研究进一步指出云量、有效半径和液态水路径(liquid water path, LWP)这些物理量都与像元分辨率有关。这些结果都明确表明,空间尺度的改变会对探测和反演结果造成影响。

前人的研究大多集中在可见光和红外波段的探测结果及其反演结果。与之相比,星载被动微波的探测结果的空间分辨率较低,但能够直接反映云的内部特征以及降水信息(Wang et al., 2008)。为了更好地将被动微波反演产品应用到模式检验中,有必要了解分辨率的改变对数据产生的影响。为此,本文对搭载于热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)的微波成像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)(Kummerow et al., 1998, 2000)反演得到的像元 LWP 产品进行了格点化处理,分别分析了两种不同时间尺度下(瞬时探测和逐月平均),格点数据中 LWP 的分布规律,以及由于分辨率的改变所造成的数据失真情况。并将生成的格点资料应用在欧洲中期数值预报中心再分析资料(European Centre for Medium-range Weather Forecasts Interim reanalysis, ERA-Interim)(Dee et al., 2011)和 NCEP 再分析资料(NCEP Climate Forecast System Reanalysis, NCEP CFSR)(Saha et al., 2010)两种再分析资料 LWP 变量的对比检验中。

2 资料和方法

本文使用的 LWP 数据来自 TRMM/TMI 反演的第 7 版轨道像元数据 2A12 和月平均格点数据 3A12。此外还用到了 ERA-Interim、CFSR 两种再分析资料。

TRMM 卫星是由美国航空航天局(NASA)和日本空间发展署(JAXA)联合设计制造,专门用于监测和研究热带降水(Kummerow et al., 1998, 2000)。该卫星于 1997 年 11 月 27 日发射升空,轨道高度 350 km,而后为了延长卫星寿命,在 2001

年 8 月 7 日升轨至 403 km。其上搭载有 TMI、测雨雷达 (Precipitation Radar, PR) 等多种仪器, 现已积累了超过 10 年的热带副热带地区云和降水的观测数据, 相关研究也很多 (傅云飞等, 2008; Wang et al., 2009; 刘鹏和傅云飞, 2010; 刘显通等, 2011)。其中 TMI 为 9 通道的微波成像仪, 可以探测大气顶的频率为 10.65、19.35、21.3、37.0 和 85.5 GHz 的上行微波辐射, 除 21 GHz 只有垂直极化通道之外, 其余 4 个频率均设置了水平和垂直双极化通道, 每天可以获取约 16 条轨道的数据。2A12 产品是使用戈达德廓线算法 (Goddard Profiling Algorithm, GPROF) (Kummerow et al., 2001), 由 TMI 探测的微波亮温反演得到的洋面水凝物 (液态云水、云冰、雨水和降冰) 廓线数据, 垂直方向分为 28 层 (从地表到 18 km 高度), 水平分辨率约 5 km。通过对 2A12 产品的液态云水含量 (单位: g m^{-3}) 求垂直积分, 即可得到 LWP (单位: g m^{-2}) 的数据。为了分析格点化分辨率对微波信号的影响, 本文用到了傅云飞等 (2008) 相同的格点化方法, 即对每个格点内的卫星探测样本点做算数平均。通过对逐轨道的 2A12 产品进行处理, 得到了全球热带和副热带地区 ($40^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}\text{N}$) 的 0.1° 、 0.25° 、 0.5° 、 1.0° 、 2.5° 5 种分辨率的格点数据集。同时, 为了验证生成的数据集, 本文也用到了 NASA 提供的 TMI 0.5° 月平均 3 级产品 3A12。与 3A12 数据不同, 本文将由 2A12 像元数据格点化后得到了 5 种分辨率的数据, 简称为 “TMI/LWP 格点数据”。

ERA-Interim 是由 ECMWF 最新发布的再分析资料, 其水平分辨率为 0.75° (纬度) $\times 0.75^{\circ}$ (经度)。该资料的生成使用了 ECMWF 集成预报系统 (Integrated Forecast System, IFS) Cy31r2 模式 (Dee et al., 2011)。云水含量是该模式的预报量, 其相态由等压面温度决定: 当温度高于 273.16 K 时, 云水全是液相; 温度低于 250.16 K 时全是冰相; 温度在 250.16~273.16 K 之间时, 液相云水占总云水的比例 (α) 是温度的函数:

$$\alpha = \left(\frac{T - T_i}{T_0 - T_i} \right)^2, \quad (1)$$

其中, T 是等压面温度 (单位: K), 模式中根据经验设置 $T_i = 250.16 \text{ K}$, $T_0 = 273.16 \text{ K}$ (<http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY31r1/index.html> [2013-03-20])。对各层的液态云水求垂直积分即得到 LWP 数据。

CFSR 再分析资料由 NCEP 制作发布, 水平

分辨率为 0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度) (Saha et al., 2010), 云水含量是模式输出的预报量 (Moorthi et al., 2001)。为了方便比较, 对 CFSR 资料中的云水含量的相态处理采用了和 ERA-Interim 相同的方法。

3 结果和分析

3.1 台风个例的 LWP 分析

对天气活动进行探测是卫星遥感的主要应用之一。首先选取 2007 年 7 月 10 日西北太平洋的一次台风个例 (轨道号 54986), 分析格点化对 LWP 数据的影响。为了了解 2A12 原始数据分辨率与格点大小的关系, 图 1 给出了每个格点中的 2A12 样本数的分布。轨道两侧样本点最多, 这与 TMI 圆锥扫描探测方式有关。由于 2A12 数据的分辨率约为 5 km, 按照 0.1° 分辨率进行格点化时 (图 1a), 某些格点中仅有 1 个 2A12 像元。随着网格尺度增大, 每个格点的样本数也有所增加, 每个 0.25° 格点的样本数为 6 个以上 (图 1b), 而每个 2.5° 格点的样本数超过 200 个 (图 1e)。

为了分析对 TMI 瞬时探测的 LWP 进行格点化时, 格点分辨率的变化对数据的影响, 图 2 给出了轨道号 54986 的 2A12 原始像元数据以及 5 种分辨率的 TMI/LWP 格点数据。从 2A12 原始像元数据 (图 2a) 可知, LWP 主要分布在台风眼壁以及螺旋云带, 其值一般在 400 g m^{-2} 以上, 最大可以达到 1400 g m^{-2} , 这反映了台风眼周围的深厚对流云以及强降水的存在。对像元数据进行格点化后, 不同分辨率下的 TMI/LWP 格点数据与原始 LWP 相比有着不同程度的偏差。其中 0.1° 格点分辨率与原始数据接近, 格点化后保留了原始数据的细节 (图 2b); 同时, 部分格点也由于样本点太少而缺少数据。 0.25° 格点 (图 2c) 在保留了原始数据细节的同时也保证了每个格点都有数据。随着格点的继续增大, LWP 的水平分布细节被逐渐平滑。从 0.5° 格点 (图 2d) 中已经较难识别台风眼的位置, 眼壁周围的 LWP 最大值也有所降低。 1.0° 分辨率 (图 2e) 下已经难以分辨出台风的螺旋结构, 而 2.5° 格点中的台风云系已经被平滑至若干个格点, LWP 最大值也降低至 600 g m^{-2} 。

为了更直观地表示格点尺度的改变对 TMI/LWP 格点数据的影响, 按照 LWP 的数值大小将数

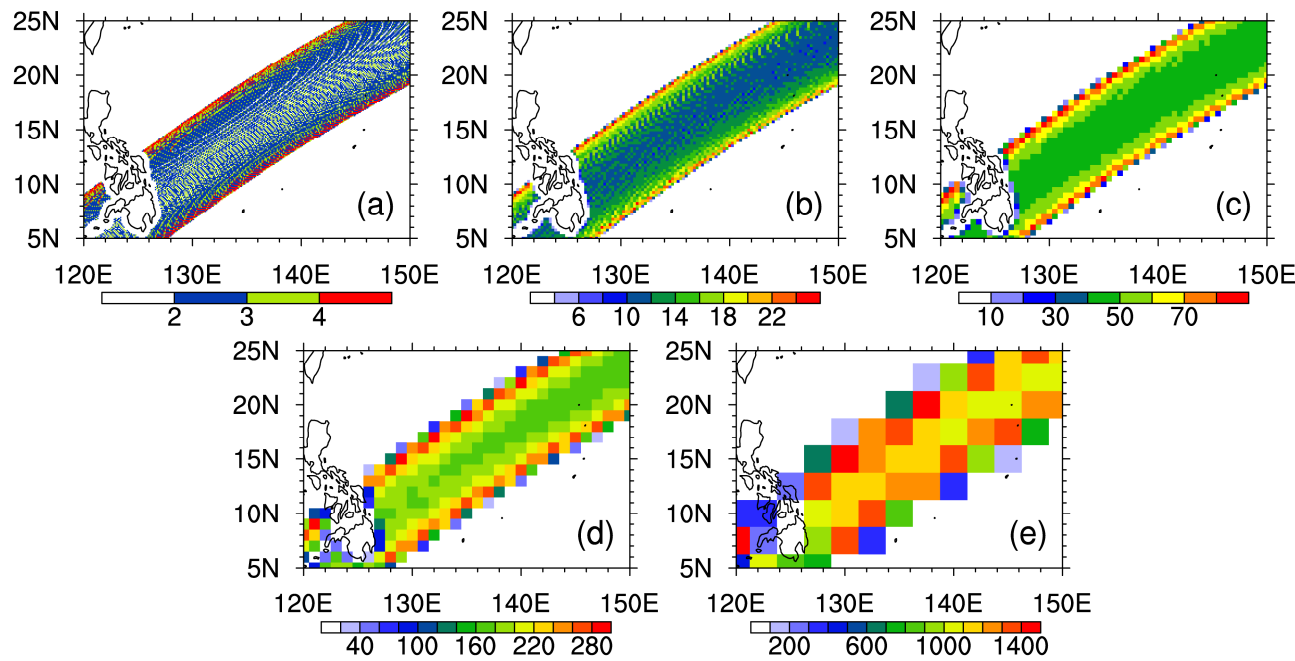


图1 (a) 0.1°格点、(b) 0.25°格点、(c) 0.5°格点、(d) 1.0°格点、(e) 2.5°格点中的2A12样本数
Fig. 1 Sample numbers of 2A12 in each grid box for (a) 0.1°, (b) 0.25°, (c) 0.5°, (d) 1.0°, and (e) 2.5°

据分成3类： $LWP < 20 \text{ g m}^{-2}$ （简称A类样本）， $20 \leq LWP < 180 \text{ g m}^{-2}$ （简称B类）， $LWP \geq 180 \text{ g m}^{-2}$ （简称C类）。其中A类可认为“晴空”，B类为“有云”（Weng et al., 1997），而C类被判断为“有降水”（Wentz and Spencer, 1998）。3类样本占总样本数的比例如图3所示。从图3可以明显看出，随着网格由细变粗，A类样本占总样本数的比例逐渐降低，B类样本的比例变化不大，而C类样本的比例升高。这直接反映了由于格点分辨率的改变对LWP数值所造成的影响，即随着格点分辨率变粗，更多的“晴空”格点被识别为“有云”或“有降水”，这与Krijger et al.（2007）的结论一致。同时也可以看出，0.1°分辨率的格点数据中各类样本点的比例与原始数据最接近，0.25°和0.5°格点与原始数据的差异也较小。而1.0°和2.5°格点数据的A类样本所占比例由原始数据的26%降低至20%，C类样本所占比例由原始数据的30%增加到35%。

为了从统计上分析格点化对LWP数据的影响，计算了图2区域（5°N~25°N，120°E~150°E）中的原始数据和格点数据LWP的平均值和标准差（结果如表1所示）。从表1可知，随着网格尺度变大，LWP平均值和标准差都有所降低。与原始数据相比，2.5°格点的LWP平均值下降了8%，标准差下

降了39%，表明格点化所造成的数据失真主要表现为数据细节的平滑。

表1 原始数据以及格点数据的LWP的平均值和标准差
Table 1 Means and standard deviations for original pixel and gridded liquid water path (LWP)

	平均值/ g m^{-2}	标准差/ g m^{-2}
原始数据	166	213
0.1°格点	164	207
0.25°格点	164	205
0.5°格点	163	189
1.0°格点	161	168
2.5°格点	152	130

综上所述，对中尺度到天气尺度的天气活动进行分析时，使用网格尺度不大于0.5°的格点数据效果更好。其中，0.1°和0.25°格点分辨率最能保留原始数据的细节，1.0°和2.5°格点数据的细节有较大程度的平滑。

3.2 月平均的LWP分析

为了进一步了解格点分辨率的改变对月平均LWP数据的影响，使用2007年7月的所有2A12像元数据（约480轨数据），生成了5种分辨率的月平均TMI/LWP格点数据。其中西太平洋暖池地区的LWP分布如图4所示。由前面的分析可知，0.1°和0.25°格点能更好地保留LWP的分布细节，月尺度上也是如此：由图4a和4b可知，菲律宾以

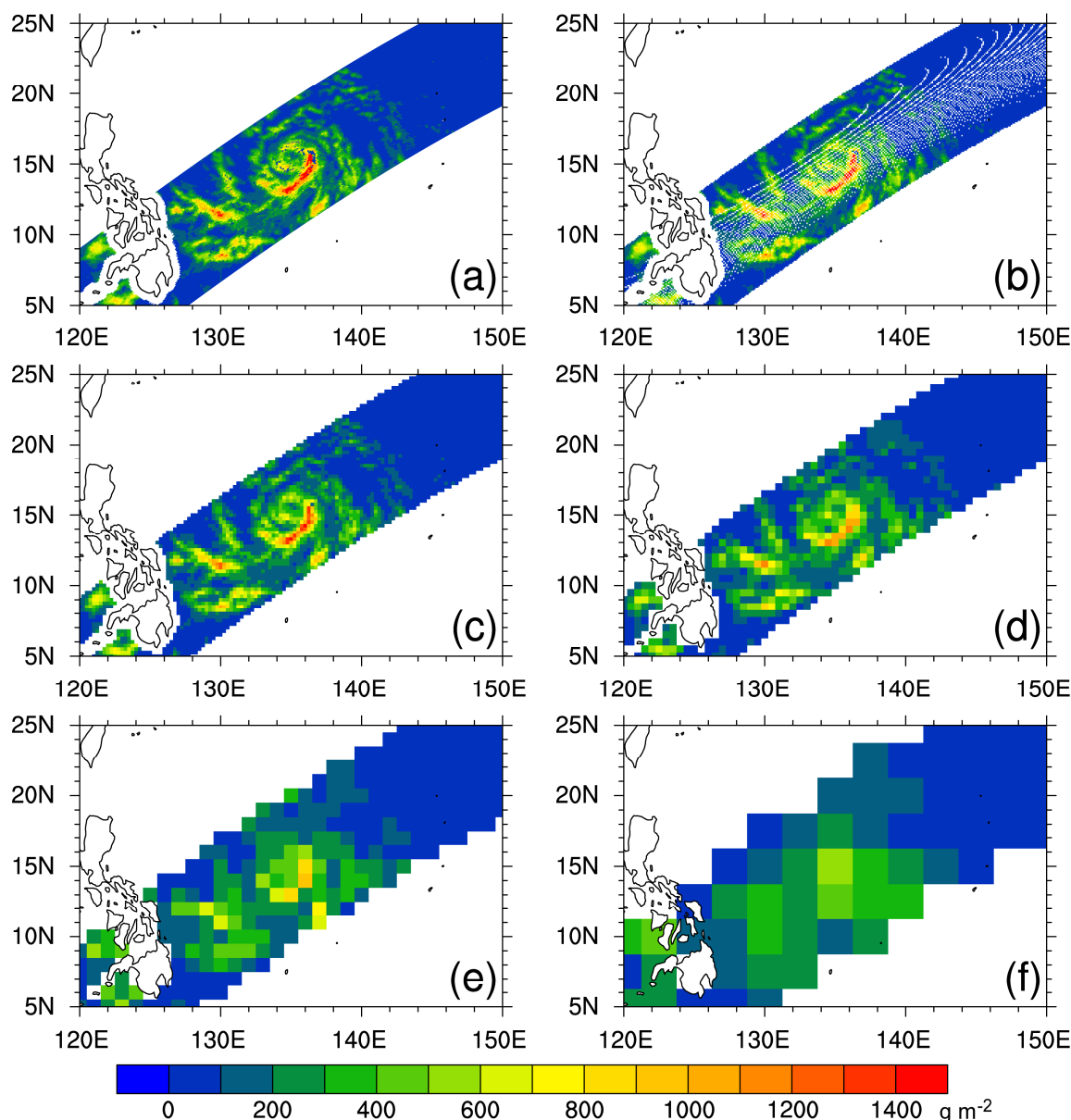


图2 (a) 原始像元数据 LWP 及 (b) 0.1°、(c) 0.25°、(d) 0.5°、(e) 1.0°、(f) 2.5° 格点化数据 LWP 的分布 (轨道号为 54986)

Fig. 2 Distributions of LWP for (a) original pixel data and (b) 0.1° grid, (c) 0.25° grid, (d) 0.5° grid, (e) 1.0° grid, and (f) 2.5° grid (orbit number 54986)

东洋面 LWP 普遍大于 40 g m^{-2} , 最大可以达到 160 g m^{-2} ; 同时可以看到, 在副热带高压控制范围内 (图中以 5880 gpm 等位势线标出, 这里使用了 CFSR 的位势高度数据) LWP 普遍较低, 仅部分区域可以达到 40 g m^{-2} , 这与 Feng et al. (2011) 对副热带高压带云量分析得到的结论类似。从总体上看, 月尺度上 LWP 的分布主要受到大尺度环流的影响, 各种分辨率的 TMI/LWP 格点数据的水平分布都基本一致。为了对我们生成的 5 种 TMI/LWP 格点数据进行验证, 图中用黑色实线表示 TMI 3A12 产品中 LWP 大于 40 g m^{-2} 的区域。其中 2.5° 分辨率

的 TMI/LWP 格点数据 (图 4e) 由于网格较粗, LWP 的水平分布与 3A12 产品略有差异, 其它分辨率的 TMI/LWP 格点数据与 3A12 产品在分布上都有较好的对应。

为了更清楚地揭示 TMI/LWP 格点数据与 3A12 产品的异同, 图 5 给出了沿 140°E 经线的 LWP 的分布。从图 5 可知, LWP 表现出明显的纬度梯度, 即 LWP 随纬度的增加逐渐减少, 最大值 110 g m^{-2} 出现在 2°N , 最小值 30 g m^{-2} 出现在副热带高压控制区域 (15°N 、 19°N 和 27°N)。除了 2.5° 格点的数据只能大致表现出 LWP 随纬度的变化情况, 且与

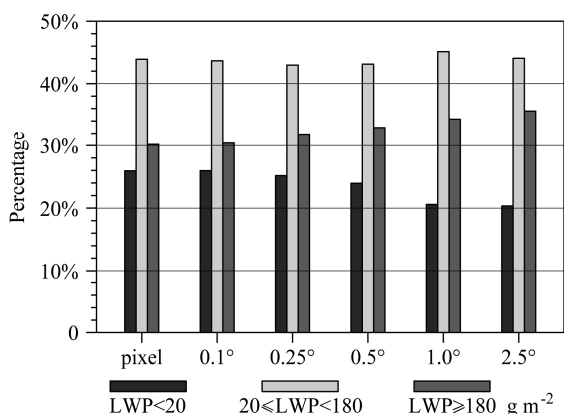


图3 原始像元数据以及格点数据中不同LWP范围的样本点占总样本点的比例

Fig. 3 Percentages of samples in different LWP ranges for original pixel and gridded data

3A12 产品存在较大差异外, 其它 4 种分辨率的格点数据都与 3A12 产品有较好的对应关系。

图 6 给出了 5 种分辨率的 TMI/LWP 格点数据以及 3A12 产品的概率密度分布 (percentage distribution function, PDF)。由图 6 可知, 3A12 LWP 大致表现为正态分布, 90% 的样本点都在 $20 \sim 100 \text{ g m}^{-2}$ 。峰值出现在 50 g m^{-2} , 概率为 10%。5 种格点数据的 PDF 分布与 3A12 产品基本相同。综上所述, 对月尺度的 LWP 进行格点处理时, 细网格 (0.1° 、 0.25° 和 0.5°) 能保留更多的细节; 从统计上看, 各种分辨率都能较一致地表现出 LWP 的分布形式, 分辨率的变化对 LWP 数据的影响较小。类似地, 也对季尺度的格点数据做了分析, 结论相同, 这里不再赘述。

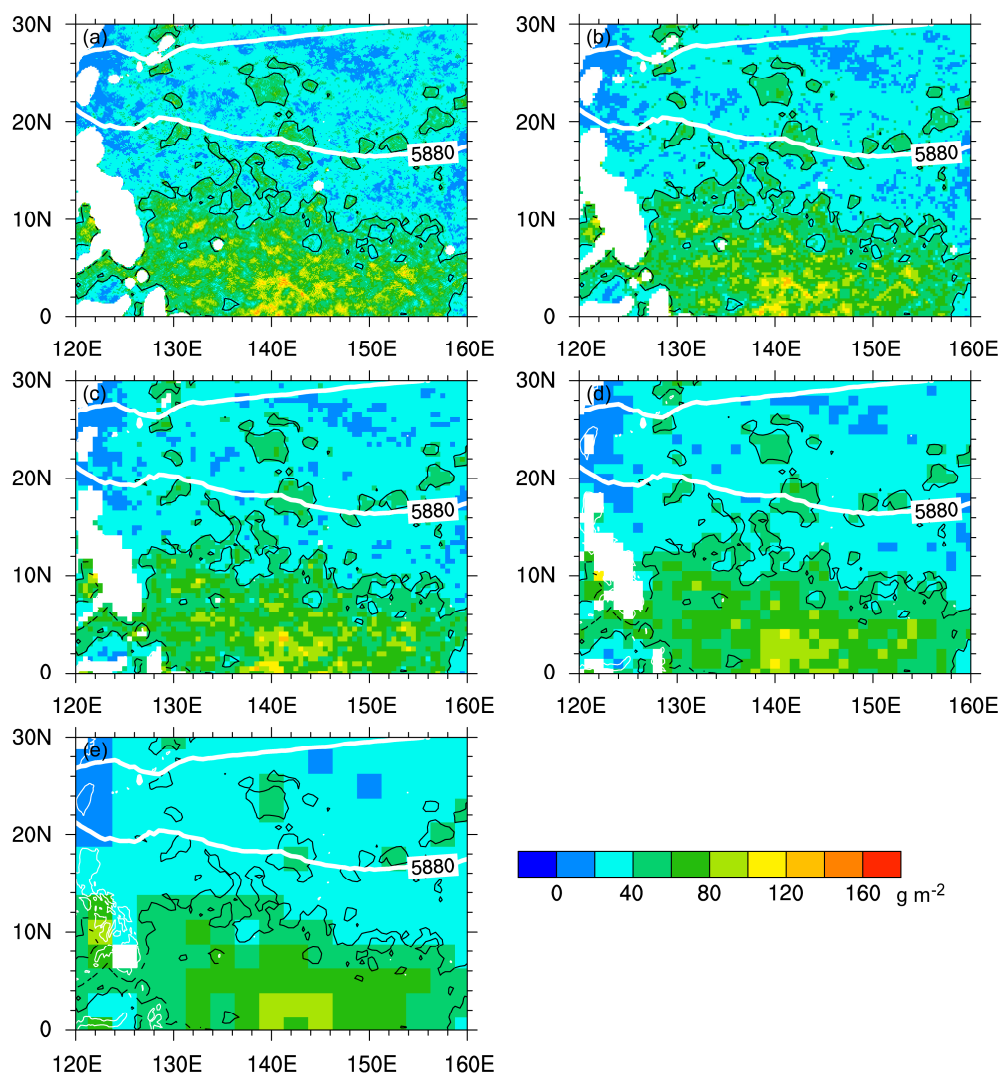


图4 2007年7月西太平洋暖池地区的TMI/LWP 5种分辨率格点数据的分布(黑线表示2007年7月3A12产品中LWP大于 40 g m^{-2} 的区域, 白线为500 hPa高度5880 gpm等位势线)

Fig. 4 Distributions of gridded LWP in the Western Pacific warm pool region in Jul 2007 (black lines indicate regions where LWP of 3A12 is greater than 40 g m^{-2} , white line indicates 5880 gpm isopotential at 500 hPa)

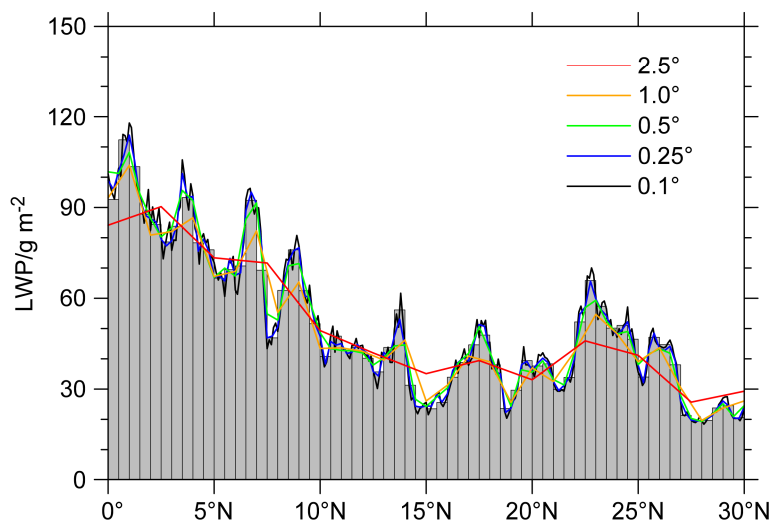


图5 沿图4中140°E经线的TMI/LWP格点数据(阴影表示3A12产品的LWP)

Fig. 5 Magnitudes of gridded LWP along 140°E in Fig. 4 (shadings indicate 3A12 LWP data)

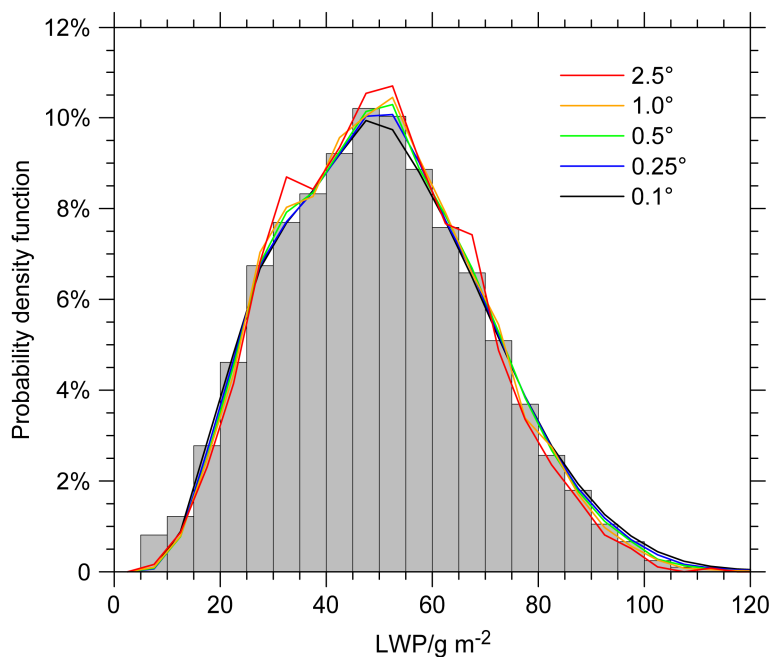


图6 2007年7月热带副热带洋面(40°S~40°N)5种格点数据以及3A12产品(灰色直方图表示)的LWP的PDF分布

Fig. 6 Percentage density function(PDF)s of gridded LWP and 3A12 LWP data (gray histogram) in tropical and subtropical oceans (40°S~40°N) in Jul 2007

3.3 LWP 格点数据的应用

通过对逐轨 2A12 数据进行处理,得到了多年逐月的 5 种分辨率的 TMI/LWP 格点数据集,这些数据集可以方便地应用在不同格点尺度的模式资料的检验中。这里,以 ERA-Interim 和 CFSR 两种再分析资料为例进行讨论。由于 ERA-Interim 和 CFSR 的水平分辨率分别为 0.75°和 0.5°,选取 0.5°的 TMI/LWP 格点数据进行对比分析。

为了从整体上了解 LWP 的气候分布特征,图 7 给出了 3 种资料 2002~2009 年平均 LWP 的分布。从 TMI/LWP 格点数据可知(图 7a),LWP 在热带和副热带地区存在若干高值区。其中太平洋东部、南印度洋以及大西洋东部由于存在有大量的低云(Weare, 2000),LWP 可以达到 80 g m^{-2} 。同时,在赤道辐合带上空也有大量的云水存在,这与该地区常年存在的对流活动有关。此外,南北半球西风带

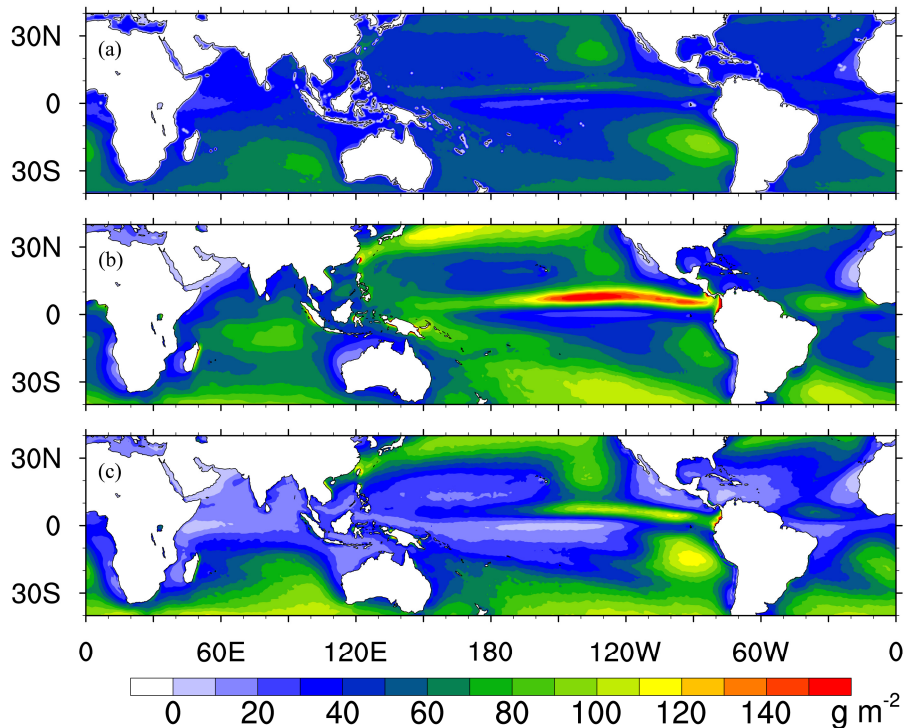


图7 2002~2009年热带和副热带洋面(40°S~40°N)(a) TMI/LWP格点数据、(b) ERA-Interim以及(c) CFSR资料的LWP平均分布

Fig. 7 Annual means of LWP from (a) TMI gridded data, (b) ERA-Interim, and (c) CFSR data in tropical and subtropical oceans (40°S–40°N) during 2002–2009

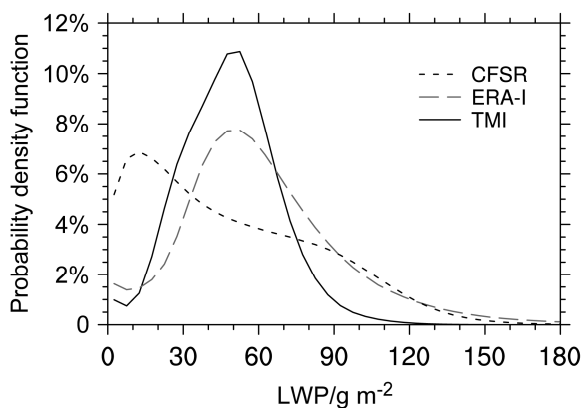


图8 同图7, 但为LWP的PDF分布

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for PDF of monthly LWP

也是LWP大值中心。与TMI/LWP格点数据相比, ERA-Interim(图7b)和CFSR(图7c)都能较好地再现LWP的水平分布形式,但两者都高估了LWP的数值,而模式参数化对云和降水的高估是造成这种结果的可能原因(Chevallier and Bauer, 2003)。

TMI/LWP格点数据的PDF(图8)与2007年7月(图6)类似,其分布在 50 g m^{-2} 存在一个峰值,概率密度为11%,样本点大多分布在 $20 \sim 90 \text{ g m}^{-2}$

m^{-2} 范围内。ERA-Interim再分析资料的PDF分布曲线与TMI/LWP格点数据类似,峰值出现在 50 g m^{-2} ,概率密度为8%。CFSR的峰值则出现在 10 g m^{-2} (7%)附近。同时也可以发现,两种再分析资料中,LWP数值超过 80 g m^{-2} 的样本点比例都多于TMI/LWP格点数据,这也和前面图7给出的LWP的平均分布相符合。

为了了解2002~2009年期间的LWP变化情况,计算了3种资料在热带和副热带洋面(40°S~40°N)的LWP月距平(如图9所示)。从整体上看,3种资料大致表现出相同的变化规律,最大正距平值出现在2007年(5 g m^{-2}),最大负距平值出现在2002年和2005年年末(-5 g m^{-2}),这反映了LWP对气候变化的响应。同时也可以发现,两种再分析资料往往高估了LWP的变化幅度,表明再分析资料LWP与TMI反演结果的气候特征依然存在差异。

4 结论和总结

卫星资料在模式的检验分析中有很大的应用

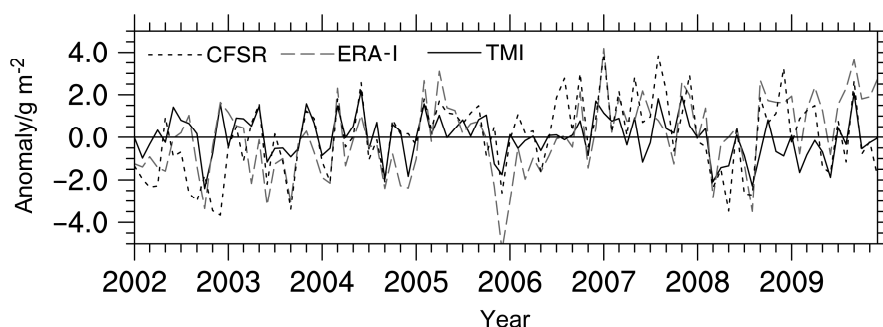


图9 同图7, 但为LWP的月距平

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for anomalies of monthly LWP

价值。由于轨道数据和模式格点分辨率存在差异, 为了方便进行比较, 必须先对卫星数据进行轨道到格点的转换。本文对两种时间尺度下(瞬时探测以及逐月平均)的TMI 2A12产品的像元LWP数据进行了格点化, 生成了5种空间分辨率的格点数据集, 并分析了分辨率的改变所造成的数据失真情况, 结论如下:

在对中尺度到天气尺度的天气活动进行分析时, 由于2A12数据的水平分辨率约为5 km, 网格尺度不大于0.5°的格点数据能保留更多的细节, 并且失真较小。从月平均结果可知, LWP的分布与大尺度环流有较好的对应; 其中0.1°、0.25°和0.5°格点数据能捕捉到LWP的分布细节。进一步分析得知, 5种分辨率的格点数据与3A12数据的PDF分布基本一致。因此从统计上看, 对月尺度及以上的气候分析而言, 网格尺度的变化对数据的影响较小。

最后, 使用生成的TMI/LWP格点数据集, 对ERA-Interim和CFSR再分析资料的LWP的气候特征做了对比分析。结果表明, 两种再分析资料都高估了LWP。TMI/LWP格点数据、ERA-Interim和CFSR的LWP大致表现出相同的长期变化规律。

格点数据集的建立可以极大地减少数据量, 降低资料存储的压力。类似地, 国内外学者也使用插值法或格点化法建立了水汽、降水(沈艳等, 2008, 2010)、LWP(O'Dell et al., 2008)的格点数据集, 这些数据为研究天气活动和气候变化提供了方便。需要提到的是, 本文用到的方法也可以用于其他卫星反演产品(Wang et al., 2008, 2009); 此外, 本文仅仅讨论了格点分辨率对数据的影响, 格点化方法或插值方法的不同对网格数据会造成什么影响, 这

是我们未来工作将要回答的问题。

致谢 本文所使用的TMI 2A12和3A12数据由戈达德地球科学数据和信息中心(GES DISC)提供。ERA-Interim和CFSR再分析资料分别由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和NCEP制作并提供。

参考文献 (References)

- Chevallier F, Bauer P. 2003. Model rain and clouds over oceans: Comparison with SSM/I observations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131: 1240–1255.
- de la Torre Juárez M, Davis A B, Fetzer E J. 2011. Scale-by-scale analysis of probability distributions for global MODIS-Aqua cloud properties: How the large scale signature of turbulence may impact statistical analyses of clouds [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 11 (6): 2893–2901.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137 (656): 553–597.
- Dufresne J, Bony S. 2008. An assessment of the primary sources of spread of global warming estimates from coupled atmosphere–ocean models [J]. *J. Climate*, 21 (19): 5135–5144.
- Eliasson S, Buehler S A, Milz M, et al. 2011. Assessing observed and modelled spatial distributions of ice water path using satellite data [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 (1): 375–391.
- Feng S, Liu Q, Fu Y. 2011. Cloud variations under subtropical high conditions [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28 (3): 623–635.
- Ferraro R R, Marks G F. 1995. The development of SSM/I rain-rate retrieval algorithms using ground-based radar measurements [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 12: 755–770.
- 傅云飞, 张爱民, 刘勇, 等. 2008. 基于星载测雨雷达探测的亚洲对流和层云降水季尺度特征分析 [J]. *气象学报*, 66 (5): 730–746.
- Fu Yunfei, Zhang Aimin, Liu Yong, et al. 2008. Characteristics of seasonal scale convective and stratiform precipitation in Asia based on measurements by TRMM precipitation radar [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (5): 730–746.
- Fu Yunfei, Heng Zhiwei, Li Tianyi, et al. 2012. Evaluation of WRF model

- hydrometeors based on TMI observations using an indirect method [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 5 (1): 32–37.
- Hartmann D L, Ockert-Bell M E, Michelsen M L. 1992. The effect of cloud type on earth's energy balance: Global analysis [J]. J. Climate, 5 (11): 1281–1304.
- 何晖, 金华, 李宏宇, 等. 2012. 2008 年奥运会开幕式日人工消减雨作业中尺度数值模拟的初步结果 [J]. 气候与环境研究, 17 (1): 46–58. He Hui, Jin Hua, Li Hongyu, et al. 2012. Preliminary study of the mesoscale numerical simulation of the rain mitigation operation during the opening ceremony of the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (1): 46–58.
- 衡志伟, 宇如聪, 傅云飞, 等. 2011. 基于TMI产品资料对数值模式水凝物模拟能力的检验分析 [J]. 大气科学, 35 (3): 506–518. Heng Zhiwei, Yu Rucong, Fu Yunfei, et al. 2011. Evaluation and analysis of simulation capability of hydrometeor variables in numerical models based on TMI products [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (3): 506–518.
- Kassianov E, Ackerman T, Kollias P. 2005. The role of cloud-scale resolution on radiative properties of oceanic cumulus clouds [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 91 (2): 211–226.
- Koren I, Oreopoulos L, Feingold G, et al. 2008. How small is a small cloud? [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 8 (14): 3855–3864.
- Krijger J M, van Weele M, Aben I, et al. 2007. Technical Note: The effect of sensor resolution on the number of cloud-free observations from space [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 7 (11): 2881–2891.
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 15 (3): 809–817.
- Kummerow C, Simpson J, Thiele O, et al. 2000. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit [J]. J. Appl. Meteor., 39 (12): 1965–1982.
- Kummerow C, Hong Y, Olson W S, et al. 2001. The evolution of the Goddard profiling algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors [J]. J. Appl. Meteor., 40: 1801–1820.
- Li J L F, Waliser D E, Chen W T, et al. 2012. An observationally based evaluation of cloud ice water in CMIP3 and CMIP5 GCMs and contemporary reanalyses using contemporary satellite data [J]. J. Geophys. Res., 117 (D16): D16105, doi: 10.1029/2012JD017640.
- 刘鹏, 傅云飞. 2010. 利用星载测雨雷达探测结果对夏季中国南方对流和层云降水气候特征的分析 [J]. 大气科学, 34(4): 802–814. Liu Peng, Fu Yunfei. 2010. Climatic characteristics of summer convective and stratiform precipitation in Southern China based on measurements by TRMM precipitation radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 802–814.
- 刘显通, 刘奇, 傅云飞. 2011. 基于光学厚度和有效半径的白天降水云识别方案 [J]. 大气科学, 35 (5): 903–911. Liu Xiantong, Liu Qi, Fu Yunfei. 2011. Daytime precipitating clouds identification scheme relying on optical thickness and effective radius [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 903–911.
- 吕光辉, 于恩涛, 向伟玲, 等. 2009. WRF模式分辨率对新疆异常降雨天气要素模拟的影响 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 85–96. Lü Guanghui, Yu Entao, Xiang Weiling, et al. 2009. Effect of horizontal and vertical resolution on WRF simulation of the unusual rainfall event in Xinjiang [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 85–96.
- Mitchell D L, D'Entremont R P. 2012. Satellite retrieval of the liquid water fraction in tropical clouds between -20 and -38 °C [J]. Atmos. Meas. Tech., 5 (7): 1683–1698.
- Moorthi S, Pan H, Caplan P. 2001. Changes to the 2001 NCEP operational MRF/AVN global analysis/forecast system [R]. NOAA Technical Procedures Bulletin Series No. 484 (<http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/docs/484.pdf> [2013-03-20])
- O'Dell C W, Wentz F J, Bennartz R. 2008. Cloud liquid water path from satellite-based passive microwave observations: A new climatology over the global oceans [J]. J. Climate, 21 (8): 1721–1739.
- 邱金桓, 王普才, 夏祥鳌, 等. 2008. 近年来大气遥感研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 841–853. Qiu Jinhuan, Wang Pucai, Xia Xiang'ao, et al. 2008. Recent progresses in atmospheric remote sensing researches [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 841–853.
- Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 91 (8): 1015–1057.
- 沈艳, 熊安元, 施晓晖, 等. 2008. 中国 55 年来地面水汽压网格数据集的建立及精度评价 [J]. 气象学报, 66 (2): 283–291. Shen Yan, Xiong Anyuan, Shi Xiaohui, et al. 2008. Development of the grid-based ground water vapor pressure over China in recent 55 years and its accuracy evaluation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (2): 283–291.
- 沈艳, 冯明农, 张洪政, 等. 2010. 我国逐日降水量格点化方法 [J]. 应用气象学报, 21 (3): 279–286. Shen Yan, Feng Mingnong, Zhang Hongzheng, et al. 2010. Interpolation methods of China daily precipitation data [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (3): 279–286.
- Stephens G L, Kummerow C D. 2007. The remote sensing of clouds and precipitation from space: A review [J]. J. Atmos. Sci., 64 (11): 3742–3765.
- Wang Y, Fu Y, Wang Z, et al. 2008. Retrieval of liquid water path inside nonprecipitating clouds using TMI measurements [J]. Acta Meteorologica Sinica, 22 (3): 342–350.
- Wang Y, Fu Y, Liu G, et al. 2009. A new water vapor algorithm for TRMM Microwave Imager (TMI) measurements based on a log linear relationship [J]. J. Geophys. Res., 114 (D21): doi: 10.1029/2008JD011057.
- Weare B C. 2000. Near-global observations of low clouds [J]. J. Climate, 13 (7): 1255–1268.
- Weng F Z, Grody N C, Ferraro R, et al. 1997. Cloud liquid water climatology from the special sensor microwave/imager [J]. J. Climate, 10 (5): 1086–1098.
- Wentz F J, Spencer R W. 1998. SSM/I rain retrievals within a unified all-weather ocean algorithm [J]. J. Atmos. Sci., 55 (9): 1613–1627.