

太平洋上云水路径反演产品及其气候变化特征分析

钱小立^{1,2}、秦正坤^{1,2}、张文君¹

1 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏, 南京 210044;

2 南京信息工程大学 大气科学学院 资料同化研究与应用联合中心, 江苏, 南京 210044;

摘要 基于极轨卫星 NOAA-15 上的微波温度计 AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit-A)多年亮温观测资料, 建立了全球海洋上的云液态水路径反演产品, 并通过对比 ERA5 和 FNL/NCEP 再分析资料的云水路径产品, 分析了反演产品对云液态水路径气候变化特征的再现能力, 进一步通过线性回归和 EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition)方法分别分析了太平洋地区大气云水路径的线性和非线性气候变化趋势特征。结果表明, 云水路径反演资料可以很好的再现多年平均空间分布特征及相应的气候变化趋势, 云水路径气候趋势表现出明显的纬度带特征, 增多和减小趋势随纬度带间隔出现, 而且在北半球东太平洋地区, 云水路径气候趋势的纬度带特征有向北迁移的现象。相比而言, 反演产品的气候趋势与 ERA5 再分析资料有更好的相似性, 而 FNL 资料对趋势的纬度带特征, 尤其是纬度带特征的北移现象未能很好的再现, 只是表现为赤道地区水汽减少, 而两侧云水路径显著增加的特征。

关键词 微波温度计 云液态水路径 EEMD 气候变化趋势

文章编号 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Cloud liquid water path retrieval products over the Pacific Ocean and their climate change characteristics

Qian Xiaoli^{1,2}, Qin Zhengkun^{1,2}, Zhang Wenjun¹

1 School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2 Joint Center of data assimilation research and applications, school of atmospheric science, Nanjing University of Information Science & technology, Nanjing 210044, China;

Abstract Based on the multi-year brightness temperature observation data of the AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit-A) on the polar-orbiting satellite

收稿日期 2021-09-08; 网络预出版日期

作者简介 钱小立, 男, 1997 年 10 月出生, 硕士生, 主要从事卫星资料的气候应用研究。Email:20191201014@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划资助 (2016YFC0402702), 国家自然科学基金青年项目 (41805076), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金 (2019Z006)

Funded by National Key R&D Program of China(2016YFC0402702), National Natural Science Foundation of China(41805076), Fundamental Research Funds of the Chinese Academy of Meteorological Sciences(2019Z006)

NOAA-15, a product of cloud liquid water path on the global ocean has been established and compared with ERA5 and FNL/NCEP. We analyzed the ability of retrieval products to reproduce the climate change characteristics of cloud liquid water path, and further analyzed the linear and nonlinear climate change trend characteristics of cloud water path in the Pacific region through linear regression and EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) methods. The results show that the CLWP inversion data can well reproduce the average spatial distribution characteristics of the years and the corresponding climate change trend. The CLWP climate trend shows obvious latitude zone characteristics, and the increasing and decreasing trends appear with the latitude zone interval. Moreover, in the eastern Pacific region of the northern hemisphere, the latitude zone characteristic of the climatic trend of the CLWP has a phenomenon of migration northward. In contrast, the climatic trend of the inversion product has better similarity with the ERA5 reanalysis data. While the latitude zone characteristics of the trend, especially the northward movement of the latitude zone characteristics, cannot be reproduced well by the FNL data. It is characterized by a decrease in water vapor in the equatorial region, and a significant increase in cloud liquid water paths on both sides.

Keywords AMSU-A, Cloud liquid water path, EEMD method, Climate change trends

一、引言

水汽凝结形成的云主要通过潜热影响大气,而云凝聚之后也会通过对短波和长波辐射传输的调制对大气产生额外的影响。云层对地球的能量收支和水循环有着很大的影响,无论是在天气尺度还是在气候尺度上,都会对大气状态产生重大的影响。

云水路径作为云属性之一,是一个重要的气候系统参数,与气候系统的水文和辐射特性的形成有着重要的关联。目前,尽管存在一些长期的地表观测,但研究表明这些观测容易出现较大的误差(Norris, 1999; Dai et al., 2006),不能有效地用于云的气候变化分析。卫星微波辐射计资料为我们提供了具有全球范围大气云液态水路径(CLWP: cloud liquid water path)的空间分布信息 (Prabhakara et al., 1983; Weng and Grody, 1994)。对于湿润地区(如赤道辐合带), CLWP 可以超过

1mm; 相反, 在干旱地区(如副高控制的地区), CLWP 一般会低于 0.1kg/m^2 (Grody et al., 2001)。

因为微波仪器能够直接响应云滴的热发射, 所以微波仪器观测资料是 CLWP 观测信息的重要来源。目前气象学家已经开发了各种基于物理或统计的算法来测量云液态水路径。最先发展起来的一系列算法是利用特殊传感器微波成像仪 (SSM/I: Special Sensor Microwave/Imager), 为了测量与各种云层有关的大范围液态水, 可根据测量要求使用不同的 SSM/I 通道组合(Weng and Grody, 1994)。还有些算法使用固定的通道组合, 仅检索非降雨云的云液态水(Greenwald et al., 1993)。

利用 SSM/I 反演云液态水的经验加快了其他微波传感器云水产品的开发。自 1998 年 7 月先进微波探测装置 (AMSU) 首次搭载在 NOAA-15 以来, 尽管 AMSU 只有四个窗区通道, 但是由于 AMSU 独特的毫米波通道, 其云液态水、水汽、降雨率等产品的质量与 SSM/I 的产品相似。Weng 等人 (2003) 使用两个 AMSU 窗区通道推导出了云液态水和总可降水量。此外, 还产生了云冰、冰粒半径等产品。AMSU 获得的云和降水产品和 SSM/I 产品相结合, 提供了更多的全球时间和空间观测, 减少了天气和气候分析的不确定性。在卫星资料同化研究中, 云和降水产品可以用于识别被云层污染的微波探测通道, 提高同化进数值预报系统中卫星资料的质量(Weng et al., 2003)。

自 1998 以来, 高级微波温度计已经有了近 23 年的观测历史, 此外, 美国的 NOAA-15-19 和欧洲的 MetOp 系列极轨气象卫星等多颗卫星都搭载了 AMSU-A 探测仪, 从而为我们提供了丰富的观测资料来源, 这也为我们研究大气 CLWP 气候趋势特征提供了很好的数据基础。只是由于卫星仪器使用寿命的限制, 大部分卫星的只能提供几年的观测结果, 不同卫星仪器参数的差异也使得不同卫星的 AMSU-A 观测资料可能存在系统的偏差, 这是限制 AMSU-A 资料气候应用的主要难题。但是在众多搭载 AMSU-A 仪器的极轨气象卫星中, NOAA-15 具有最悠久的历史, 该卫星携带的 AMSU-A 一直能够稳定的为我们提供具有全球覆盖率的观测资料, 由于数据来自单颗卫星, 因此避免了传感器之间的校准难题, 并且由此导出的趋势比来自多个卫星的趋势更为稳定。因此, 本论文利用 2000 年 1 月 1 日至 2020 年 11 月 30 日期间的 NOAA-15 的 AMSU-A 资料, 反演得到了对应时间段内的云液态水路径资料集, 在利用再分析资料对反演产品进行细致评估

的基础上，论文还进行了在太平洋地区大气 CLWP 气候变化特征分析。

本文的具体结构如下：第二节具体介绍了作为数据基础的 AMSU-A 资料及 CLWP 反演算法；第三节对该算法进行了敏感性试验，并比较了反演结果与再分析产品的年平均分布特征；第四节讨论了使用线性回归方法和集合经验模态分解方法分析 CLWP 气候趋势的区别；第五节中探讨了太平洋上 CLWP 的气候变化特征；第六节比较了反演结果与再分析产品在气候变化特征上存在的差异；最后第七节给出了主要结论。

二、资料和方法

2.1 AMSU-A 微波温度计资料

多个极轨卫星搭载了先进的微波探测仪(AMSU-A)，包括美国的 NOAA 系列卫星和欧洲的 MetOp 系列卫星。AMSU-A 是一种跨轨道仪器，每根扫描线上有 30 个 FOV(Field Of Views)，其轨道宽度约为 2300km，最大扫描角为 $\pm 48.3^\circ$ ，FOV 为 15 和 16 时扫描角为 1.67° ，其星下点空间分辨率约为 48km。AMSU-A 提供了 15 个温度探测通道，覆盖了 23.8 至 89 GHz 微波频谱范围，主要用于提供大气温度廓线信息。

AMSU-A 被分为两个物理上独立的模块，每个模块独立运行并与航天器连接。模块 A1 包含 13 个通道，模块 A2 包含 2 个通道。大气温度分布主要基于 60GHz 附近的通道 3-14 测量，而云液态水和地球表面信息是通过通道 1-2 进行测量。表 1 列出了 NOAA-15 的 AMSU-A 的一些通道特征，包括通道频率、辐射温度灵敏度、3-dB 带宽和波束宽度(Mo, 1999)。

表 1 NOAA15/AMSU-A 的各通道参数特征
Table 1 parameter characteristics of each channel of NOAA15/AMSU-A

通道	频率(MHz)	辐射温度灵敏度(K)	带宽(MHz)	波束宽度($^\circ$)
1	23800.37	0.211	251.02	3.53
2	31400.42	0.265	161.20	3.41
3	50299.91	0.219	161.14	3.76
4	52799.39	0.143	380.52	3.72
5	53595.41 $\pm$ 0.115	0.148	168.20/168.	3.70
			20	
6	54399.53	0.154	380.54	3.68

7	54940.64	0.132	380.56	3.61
8	55498.70	0.141	310.34	3.63
9	57290.33	0.236	310.42	3.51
10	57290.33±0.217	0.250	76.58/76.58	3.51
11	57290.344±322±48	0.280	34.28/35.11 35.11/34.28	3.51
12	57290.344±322±22	0.400	15.08/15.29 15.29/15.08	3.51
13	57290.344±322±10	0.539	7.92/7.93 7.93/7.92	3.51
14	57290.344±322±4.5	0.914	2.94/2.92 2.92/2.94	3.51
15	88997.00	0.166	1998.98	3.80

因为频率为 23.8 和 31.4GHz 的 AMSU-A 通道的观测资料能够直接响应液滴的发射，所以前人建立了基于通道 1 和 2 观测资料的云液态水路径反演方法 (Weng and Grody, 2000)。本文正是应用了该反演方法进行云液态水路径反演研究。

为了避免星间校准的问题，同时利用 NOAA-15 的长期观测性能，本文只选用了 NOAA-15 的 AMSU-A 观测资料进行研究，研究时段为 2000 年 1 月 1 日至 2020 年 11 月 30 日。

为了验证反演结果的正确性，我们还选用了两种常用的再分析资料进行对比研究。即 ERA5 再分析资料和 NCEP/NCAR FNL(Final Analysis)再分析资料。

2.2 ERA5 逐小时再分析资料

ERA5 是来自欧洲中心的新一代全球再分析数据，目前可以提供自 1979 年的数据。ERA5 再分析资料也提供了 CLWP 资料，资料水平分辨率约为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。本文中选取的资料时间长度为 2000 年 1 月 1 日到 2020 年 11 月 30 日。

2.3 NCEP/NCAR-FNL 再分析资料

NCEP-FNL 资料来自全球数据同化系统，目前可以提供自 2001 年 5 月开始的 CLWP 数据，资料的水平分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ ，时间间隔为 6 小时。本文中选的

取的资料时间长度为 2002 年 1 月 1 日到 2020 年 11 月 30 日。

2.4 云水路径反演算法

利用低频窗口通道的微波测量可以计算得到非降水云中的云液态水 (Greenwald et al., 1993; Weng and Grody, 1994; Weng et al., 1997, 2000; Wentz,1997)。Weng 等人 (2003) 提出通过 AMSU-A 的两个频率分别为 23.8 和 31.4GHz 的窗区通道的观测亮温和海表温度、风场可以计算云液态水路径和总可降水量。本文在 Weng 等人提出的方法的基础上, 利用拉格朗日插值将海表温度和风场的再分析资料插值到卫星的观测点上, 然后再计算得到 CLWP。本文研究的主要区域为海洋上空, 而 50°N 以北区域陆地面积较大, 因此本文的研究区域主要集中在南北纬 50°之间。

图 1 展示了 2000 年 1 月 10 日基于 NOAA-15 的 AMSU-A 升轨资料并结合 FNL 再分析资料提供的海表温度和风速资料反演获得的太平洋上的云液态水路径的空间分布图。

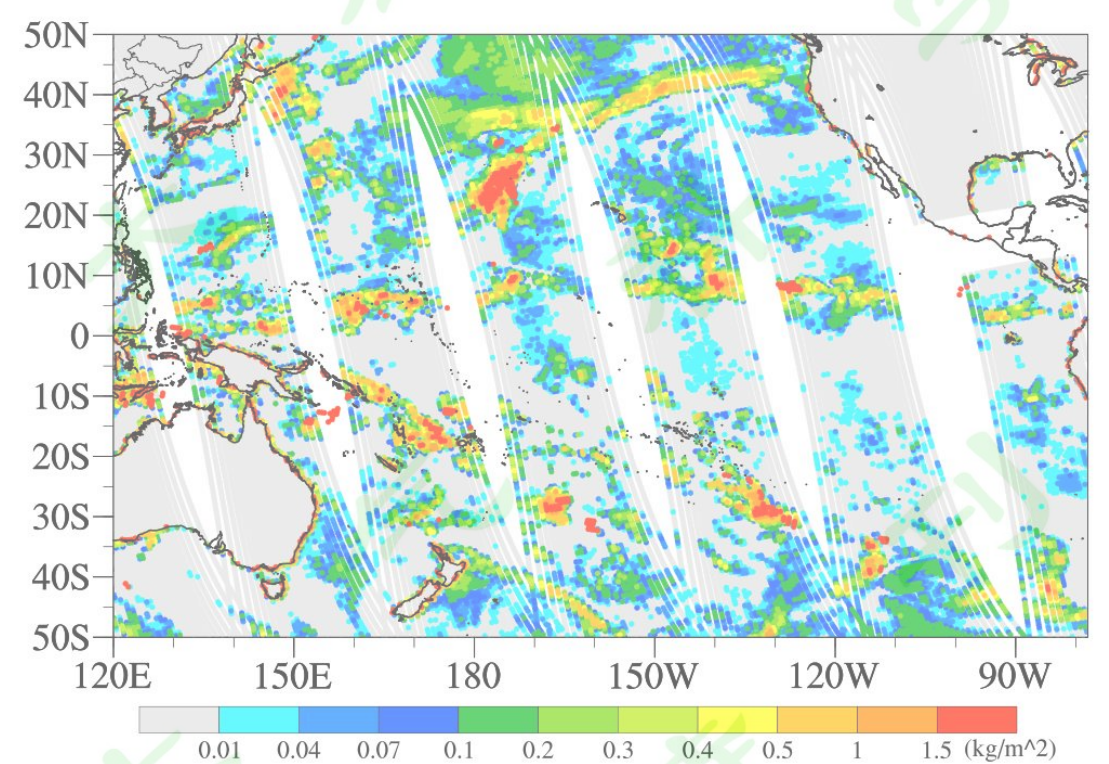


图 1: 2000 年 1 月 10 日太平洋地区的云液态水路径反演结果的空间分布图
Figure 1: spatial distribution of cloud liquid water path inversion results in the Pacific on January 10, 2000

图中带状阴影区域为卫星升轨轨道覆盖区域, 白色区域为卫星扫描未覆盖区

域，不存在观测值，这里只是给出了 CLWP 大于 0.01kg/m^2 的空间分布特征，CLWP 小于 0.01kg/m^2 的观测区域统一标为灰色。在 2000 年 1 月 10 日，CLWP 主要分布在 $0\text{-}10^\circ\text{N}$ 的热带太平洋地区和 20N 以北的北太平洋中部地区。北太平洋地区存在明显的带状大值区，最大值区可以达到 2.0 kg/m^2 以上。另外南太平洋也有零星的大值区。需要说明的是，由于反演方法精度的限制，反演的 CLWP 大于 2.0 的区域这里都是设定为 2.0 kg/m^2 。

三、敏感性试验及年平均云水路径空间分布

3.1.基于 AMSU-A 的云水路径反演的敏感性试验

正如上文中所介绍的，CLWP 可以通过 AMSU-A 的两个频率分别为 23.8 和 31.4GHz 的窗区通道的观测亮温和海表温度、风场计算得到。其中海表温度和风场主要用于计算海表反射率及粗糙程度。由于反演产品中包含了再分析资料的海表温度和风场信息，因此在利用反演产品进行气候研究前，首先要明确反演产品对海表温度和风场的敏感性特征。这里分别设计了两组敏感性试验：(1)保持海表面风场不变，改变海表温度，观察不同量级 CLWP 的变化幅度；(2)保持海表温度不变，改变海表面风场，分析不同量级的 CLWP 随海表面风场的变化幅度。具体的试验结果如图 2 所示。

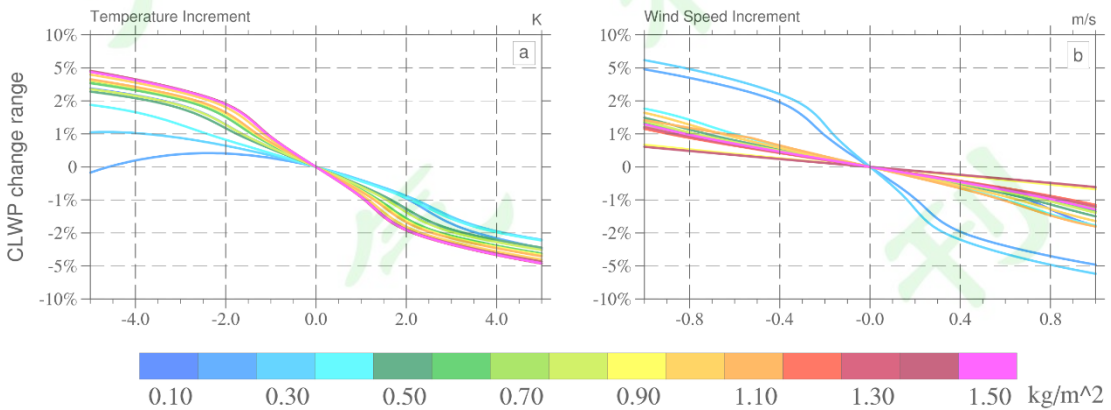


图 2：CLWP 反演结果随海表温度和风速的变率。(a) 温度；(b) 风速
Figure 2: variability of CLWP inversion results with sea surface temperature and wind speed. (a) Temperature; (b) Wind speed

从两组敏感性试验结果对比可以看出，温度与风速对 CLWP 的影响表现出相似的特征，即温度升高和风速增加，CLWP 会减小，反之亦然。但是对于不同

量级的 CLWP，风速和温度的影响程度并不一致。温度增加对 CLWP 的大值影响更为明显，而风速则是对 CLWP 的小值影响更为显著。但是从变化的量值来看，温度和风速的改变对 CLWP 的影响相对较小，相较于初始温度的 CLWP 量值，改变温度或风速导致的 CLWP 量值的变化一般在 5% 以内，这就表明再分析资料的信息对反演结果的气候变化特征影响较小。

3.2 多年 CLWP 卫星反演结果验证

CLWP 反演产品对再分析资料的低敏感性也证明了反演产品用于气候研究的可行性。利用 2000 年 1 月 1 日至 2020 年 11 月 30 日期间的 NOAA-15 的 AMSU-A 资料，分别使用了 FNL 和 ERA5 的海表温度和海表面风速资料，反演得到了太平洋地区对应时间段内的 CLWP，建立了 21 年逐日的 CLWP 气候资料集。下文中分别用反演 1 和反演 2 来代替基于 NOAA-15/AMSU-A 卫星资料，结合 FNL 再分析资料提供的海表温度和风速资料，获得的 CLWP 反演结果和基于 NOAA-15/AMSU-A 卫星资料，结合 ERA5 再分析资料提供的海表温度和风速资料，获得的 CLWP 反演结果。

为了确认卫星荷载仪器观测亮温本身是否会随着时间的推移而衰减，从而导致反演的 CLWP 资料存在误差。图 3a-d 分别给出了 2005 年和 2020 年反演 1 和 ERA5 的 CLWP 产品的夏季平均 CLWP 的空间分布图。比较这两年的卫星反演结果和 ERA5 产品结果，我们可以发现卫星反演结果的空间分布和 ERA5 产品较为接近，而且比较 2005 年和 2020 年的卫星反演结果，发现 CLWP 在量值上不存在明显的增强或衰减。

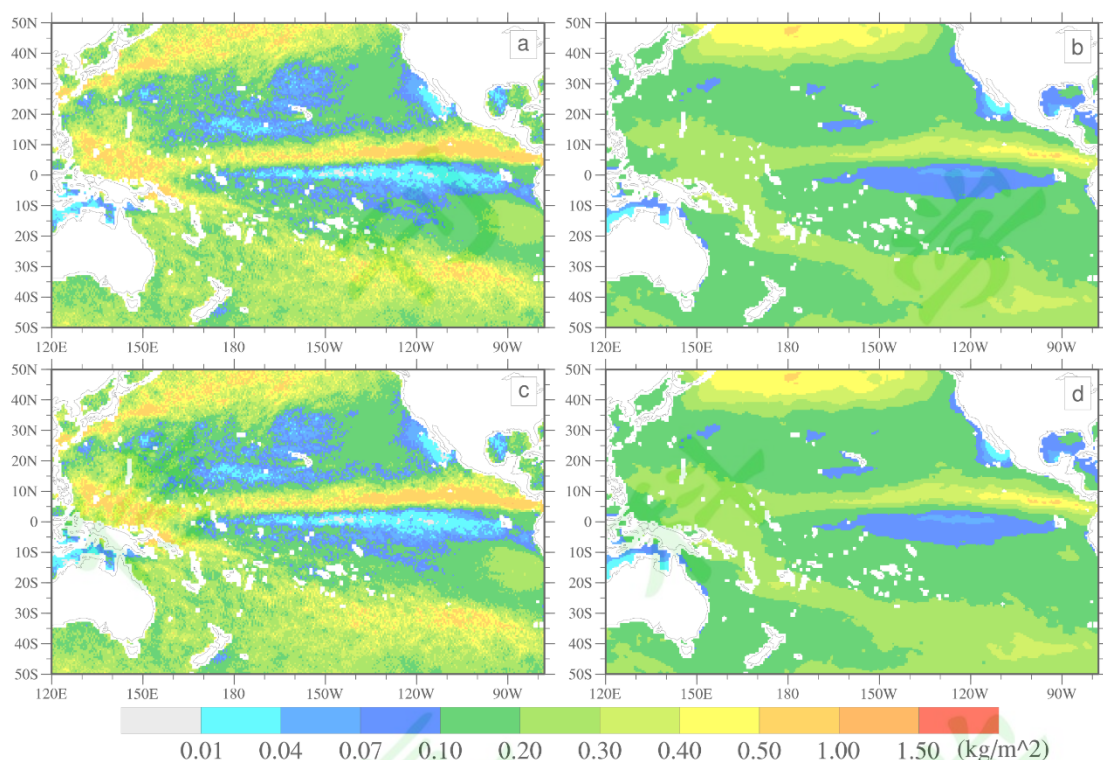


图 3：太平洋地区夏季平均 CLWP 空间分布图（a, b: 2005 年；c, d: 2020 年）

a, c: 反演 1; b, d: ERA5/CLWP 产品

Figure 3: spatial distribution of summer average CLWP in the Pacific region (a, b: 2005; c, d: 2020)

a, c: inversion 1; b, d: ERA5/CLWP products

为了进一步验证这个结论，我挑选了三个区域分别给出了 21 年以来，区域平均 CLWP 的逐月变化，并与 ERA5 的结果进行了比较，结果如图 4 所示。从图中可以很明显的看出，两种资料，虽然在量值上存在一定的差距，但在变化趋势上基本保持一致。而且，从这幅图中我们可以更加明显的观察到，三个区域的卫星反演 CLWP 都呈现一种随季节变化的变化趋势，而不存在量值上的明显的增加或者衰减，因此使用 21 年的卫星数据，不会影响 CLWP 气候特征的分析。

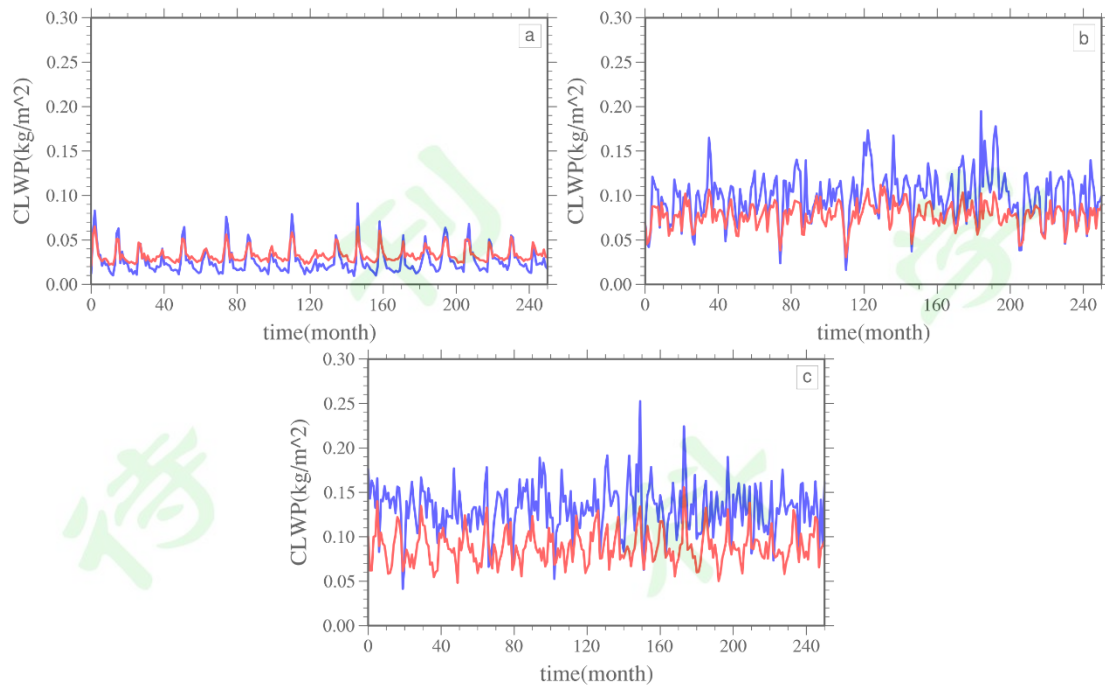


图 4：2000-2020 年太平洋地区不同区域平均 CLWP 的逐月变化。

蓝线：反演 1；红线：ERA5/CLWP 产品。

(a):120-130W, 0-10S; (b):110-120W, 0-10N; (c):170-180E, 35-45N

Figure 4: monthly variation of average CLWP in different regions of the Pacific from 2000 to 2020.

Blue line: inversion 1; Red line: ERA5/CLWP products.

(a):120-130W, 0-10S; (b):110-120W, 0-10N; (c):170-180E, 35-45N

3.3 太平洋上年平均云水路径的比较

为了检验反演产品对太平洋地区 CLWP 气候特征的再现能力。图 5a-b 分别给出了基于两种再分析资料和 AMSU-A 观测资料反演获得的 CLWP 的气候平均值空间分布图，为了评估反演产品的正确性，这里还给出了 FNL 和 ERA5 的 CLWP 产品用于比较（图 5c-d）。

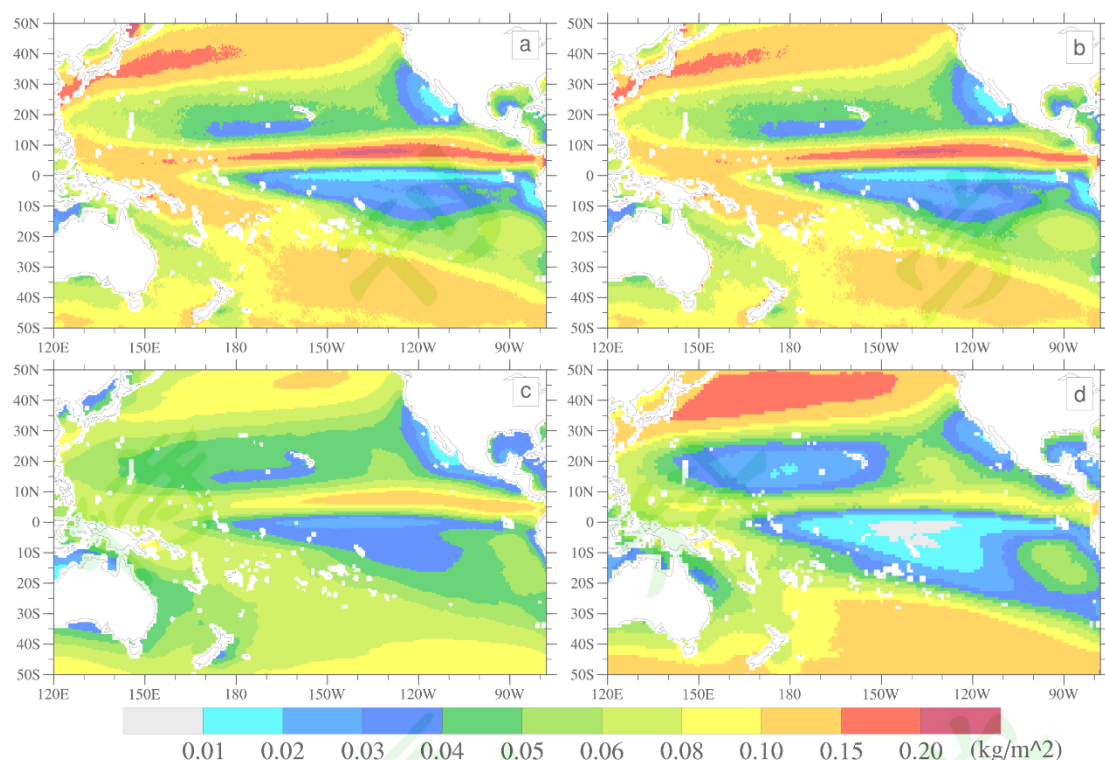


图 5：2002-2020 年太平洋地区多年平均 CLWP 空间分布图。

a: 反演 1; b: 反演 2; c: ERA5/CLWP 产品; d: FNL/CLWP 产品

Figure 5: spatial distribution of multi-year average CLWP in the Pacific region from 2002 to 2020.

a: inversion 1; b: inversion 2; c: ERA5/CLWP products; d: FNL/CLWP products

四种资料的多年平均 CLWP 的空间分布特征具有很好的相似性，CLWP 大值区主要分布在 0-10°N 之间的赤道中东太平洋地区，30°N 以北和 30°S 以南的太平洋地区，而 CLWP 的小值区主要集中在 0-15°S 的赤道中东太平洋地区、15°N 左右的中太平洋和靠近北美洲的西太平洋区域。

四种 CLWP 资料的极值区域分布基本一致，但是在量值上存在一定的差别。利用两种不同的再分析资料反演的 CLWP 具有非常相似的空间分布特征和量值，这也进一步印证了上文中的敏感性试验的结论。相比而言，反演得到的 CLWP 结果与 ERA5 的产品更为接近，尤其是中低纬度两者量级尤为接近，但是 FNL 的产品在量值上与其他 3 种资料存在一定的差别，主要在 30°N 以北区域的大值区，FNL 资料的 CLWP 明显大于其他资料，而在赤道南北的小值区，FNL 的 CLWP 又明显低于其他资料，而且低值区的覆盖范围也明显偏大。

四、太平洋上云水路径的气候变化趋势分析

4.1 CLWP 的线性趋势

随着全球变暖现象得到越来越多的重视,不同变量气候变化趋势特征研究得到了普遍的关注。利用线性回归的方法,这里计算了 2000-2020 年太平洋地区不同纬度带上四种资料 CLWP 的线性趋势,结果如图 6 所示。不同资料的线性趋势在量值上存在明显的不同,其中 FNL 资料的线性趋势与其他资料的差异最为明显。在 10°N 附近,两种反演结果和 ERA5 资料都表现出增加的趋势,只是 ERA5 的增加趋势相对较弱,但是 FNL 则是显著的减少趋势;而在 30°N 以北和 30°S 以南的大部分区域, FNL 资料则是表现出显著的增加趋势,但是另外 3 种资料则是主要表现为减小的现象。由于 CLWP 趋势属于小量,因此后文中 CLWP 单位改为 g/m^2 。

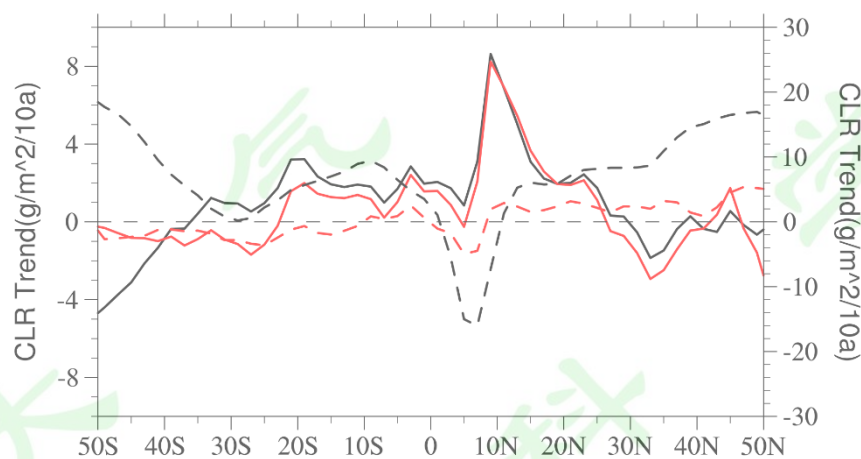


图 6:2000-2020 年太平洋上不同纬度带上 CLWP 的线性趋势。

黑色实线: 反演 1; 红色实线: 反演 2; 黑色虚线: FNL/CLWP 产品; 红色虚线: ERA5/CLWP 产品

Figure 6: linear trend of CLWP at different latitudes in the Pacific from 2000 to 2020.

Black solid line: inversion 1; Red solid line: inversion 2; Black dotted line: FNL /CLWP products; Red dotted line: ERA5/CLWP product

4.2 线性趋势与非线性趋势的比较

线性趋势对资料时间长度非常敏感,不同的时间长度会对趋势测定产生较大的影响(Qin et al., 2012)。而用于非线性趋势分析的 EEMD (ensemble empirical mode decomposition)方法不需要任何先验确定的基函数,并且可以自然地将自适

应和时间局部性融入到数据分解的过程中(Huang and Wu, 2008; Wu and Huang 2009; Wu et al., 2009)。为了避免资料时间长度对气候变化趋势分析结果的影响,这里还进一步利用 EEMD 方法对 CLWP 的非线性气候趋势特征进行分析。

EEMD 方法通过将多个噪声加到观测值中,来模拟多个现实中的场景,从而可以使用对应的本征模函数的集合平均方法来提取尺度一致性信号。具体的计算公式如公式(1)所示(其中用 C_j 表示本征模函数)。因此这里利用 EEMD 方法进一步分析 CLWP 的非线性气候趋势。

$$R_n(t) = x(t) - \sum_{j=1}^n C_j(t) \quad (1)$$

首先为了对比 EEMD 的非线性趋势与线性趋势的差异,这里选择了三个纬度带,分别给出了 CLWP 的线性趋势与 EEMD 获得的非线性趋势特征,结果如图 7 所示。在三个纬度带上线性趋势和 EEMD 方法得到的趋势在变化方向上是一致的,在 9°N 和 21°N 随时时间的推移,CLWP 逐渐增加,而在 21°S 上 CLWP 随着时间的推移逐渐的减小。但是线性趋势只能反应出气候趋势的单调变化部分,而利用 EEMD 方法所得到的趋势能够再现 CLWP 气候变化的非线性特征。例如在 CLWP 增加比较剧烈的 9°N,从非线性趋势曲线中可以看出,CLWP 的增加主要是从 2010 年前后开始的,增加的趋势明显快于线性趋势结果。从图 7 的结果中可以看到,非线性趋势能够揭示更多丰富的气候变化趋势特征。

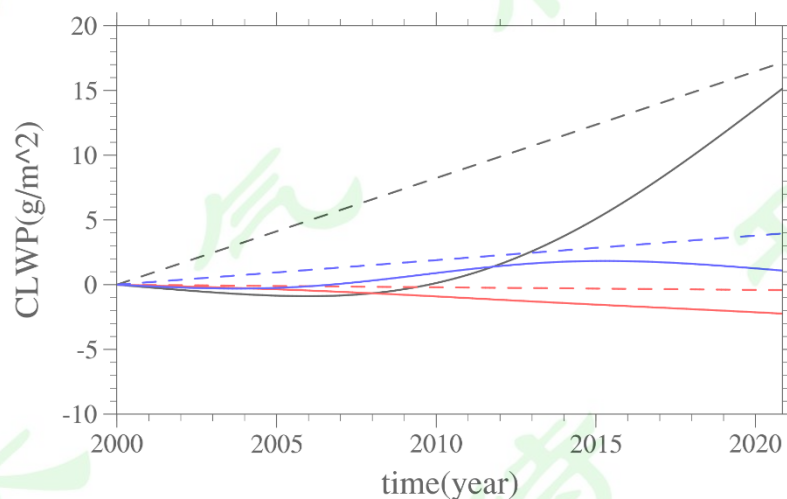


图 7: 2000-2020 年基于 ERA5 资料的 CLWP 反演产品的线性趋势与非线性趋势(实线: EEMD 方法; 虚线: 线性趋势)

Figure 7: linear trend and nonlinear trend of CLWP inversion products based on

era5 data from 2000 to 2020 (solid line: EEMD method; Dotted line: linear trend)

4.3 CLWP 的非线性趋势

为了更好的与再分析资料进行对比，这里首先将反演产品插值成 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 水平分辨率的格点资料，插值过程中剔除了海陆交界处的异常值点，最终得到了逐日的 CLWP 反演产品。由于两种反演产品具有很好的相似性，所以这里只分析基于 FNL 再分析资料的反演产品。图 8 为太平洋各纬度带上 CLWP 反演产品的非线性趋势。

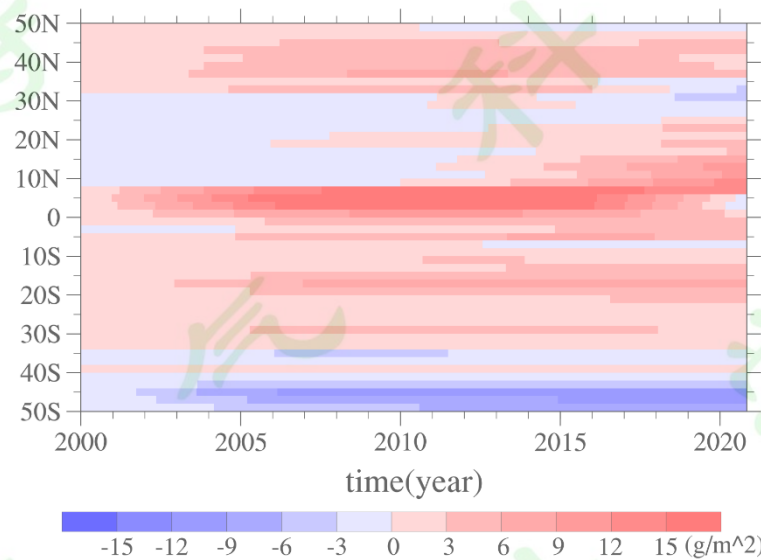


图 8: 2000-2020 年太平洋各纬度带上 CLWP 反演产品的变化趋势

Figure 8: variation trend of CLWP inversion products in various latitudes of the Pacific from 2000 to 2020

与线性趋势相似，CLWP 增加趋势最大的地方依旧在 5°N 附近，而减小的区域还是在 30°N 附近和 30°S 以南。然而，从图 8 中看到在 2015 年以前，CLWP 增加最大的区域位于 5°N 附近。但是，2015 年以后该区域 CLWP 变成了一个逐渐减小的趋势，而呈增加趋势的区域逐渐向北移动，转移到了 $10\text{-}15^{\circ}\text{N}$ 附近。

为了进一步分析这个特征，我们给出了反演产品非线性气候趋势不同年份的空间分布图，图 9 分别给出了 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 7 月太平洋上经过 EEMD 方法分解之后得到的 CLWP 气候变化趋势的空间分布图。从图中可以更加直观的看出 CLWP 在各个纬度带上的变化趋势，更好地印证了太平洋各纬度带上 CLWP 变化趋势（图 8）的结论，而且可以看出，2015 年以后 CLWP 增加区域向北移动，主要集中在中东太平洋地区。此外，相较于太平洋各纬度带

上 CLWP 变化趋势（图 8），月平均 CLWP 气候变化趋势空间分布图（图 9）中可以更加明显地观察到整个太平洋区域 CLWP 的气候变化趋势；在 20-30°S 区域，CLWP 表现为减小趋势，但是减小趋势主要集中在西太平洋区域，而在中东太平洋依然是呈逐渐增加的趋势；30°N 纬度带的 CLWP 减小趋势也是集中在中北太平洋地区，而且减小的趋势也表现出趋势北移的现象。

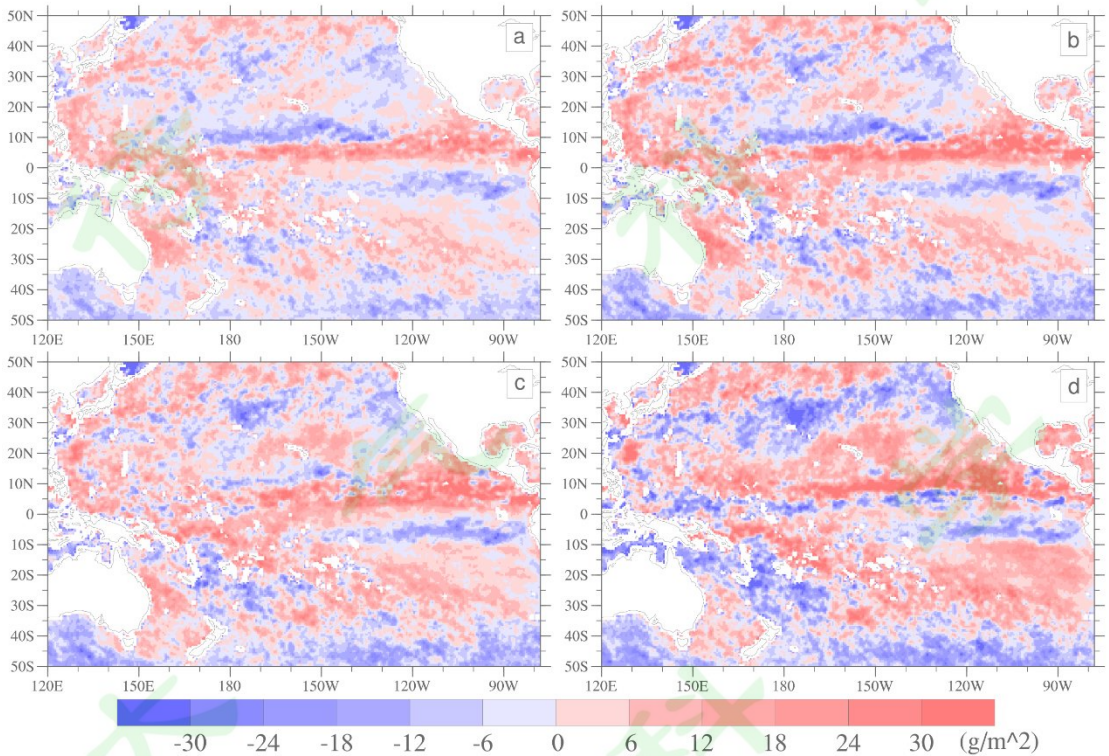


图 9：7 月太平洋上月平均 CLWP 反演产品的气候趋势空间分布图。
(a) 2005 年; (b) 2010 年; (c) 2015 年; (d) 2020 年

Figure 9: spatial distribution of climate trend of last month's average CLWP inversion products in the Pacific in July.
(a) 2005; (b) 2010; (c) 2015; (d) 2020

4.4 趋势检测的不确定性

所有数据都可能出错。目前用于数据分析的任何方法（如傅里叶分析、小波分析或者线性回归等）都会因数据端效应而受到不确定性的影响。对于 EEMD 方法，与数据端效应相关的误差与筛选过程中每次重复确定的序列的包络值有关。为了估计 EEMD 趋势中的不确定性，这里使用 Wu 等人（2011）提出的向下采样方法。以 CLWP 卫星反演产品为例，在每个纬度带的序列上增加一个均值和标准差相同的随机正态分布序列，得到一个新的序列。然后对这个新的序列做

EEMD 分解，得到新的序列的 EEMD 趋势。将该过程重复 100 次，这些趋势的变化代表了 EEMD 趋势的不确定性。5°N 的结果如图 10 所示。从图中我们可以发现，EEMD 方法产生的数据低频分量对时间局部扰动不敏感，随机增加扰动前后得到的趋势几乎相同。

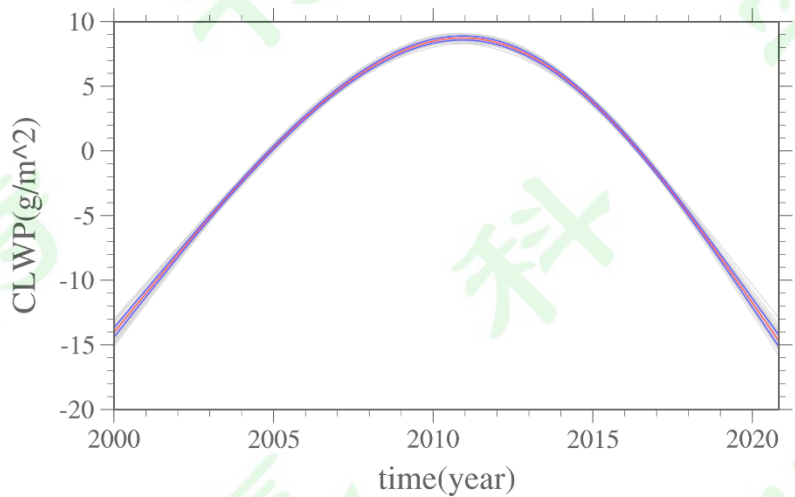


图 10：5°N EEMD 趋势的不确定度。

灰色线：100 次 EEMD 趋势；红色线：趋势的平均值；蓝色线：表示一个标准偏差

Figure 10: uncertainty of 5°N EEMD trend.

Gray line: 100 EEMD trends; Red line: average value of trend; Blue line: indicates a standard deviation

为了验证结论在所有纬度带具有普适性，图 11 给出了 CLWP 反演产品、ERA5/CLWP 和 FNL/CLWP 再分析资料所有纬度带上不确定性的标准差。观察各纬度带上的 EEMD 趋势的标准差可以发现，在所有纬度带上都有类似的结果，所有纬度带上的标准偏差在序列的中心最小，在序列的末端最大。而且三种资料的结果都是如此。因此，根据图 10 和图 11 中的结果可以得出结论，对于本研究中研究 CLWP 气候变化趋势的三种资料的数据端效应和噪声相对较小。

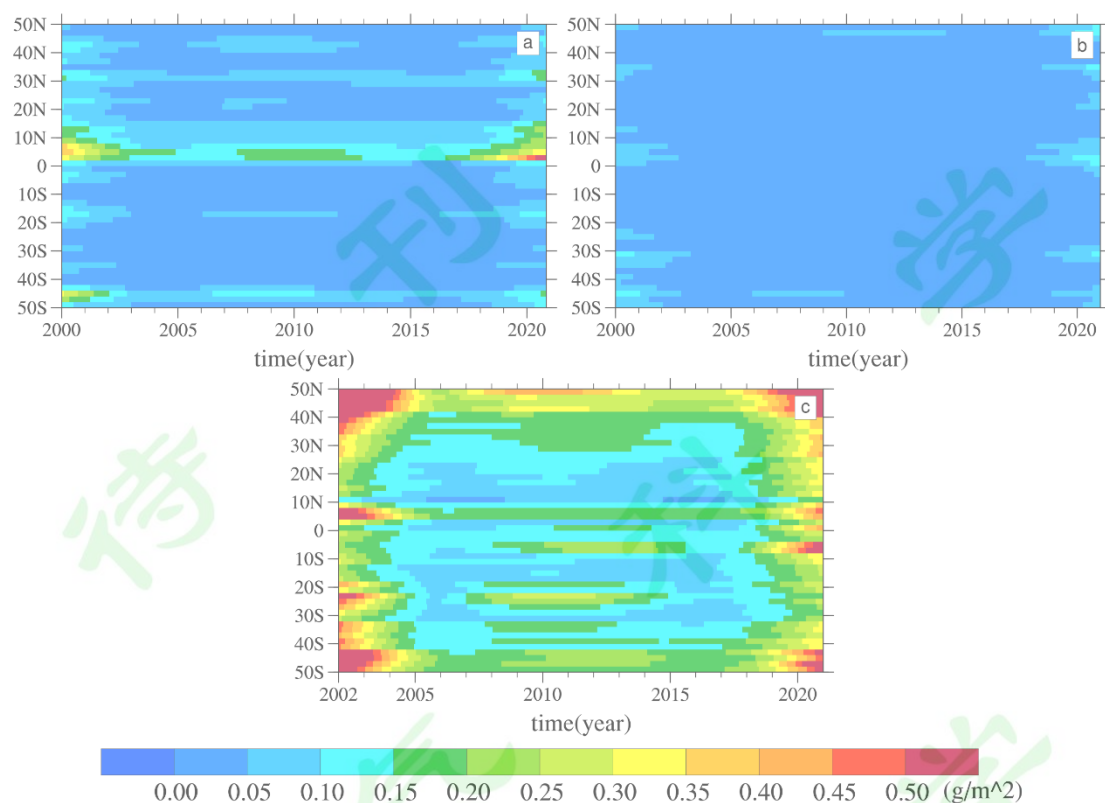


图 11：各纬度带上的 EEMD 趋势的不确定度的标准差。

a: CLWP 反演 1; b: ERA5/CLWP 产品; c: FNL/CLWP 产品

Figure 11: standard deviation of uncertainty of EEMD trend in each latitude band.

a: CLWP inversion 1; b: ERA5/CLWP products; c: FNL/CLWP products

六、三种云水路径资料气候变化趋势的比较

为了检验反演产品对 CLWP 气候变化特征的再现能力，我们将反演产品的非线性气候趋势与再分析资料的 CLWP 产品进行对比分析。图 12 给出的是两种再分析资料在太平洋各纬度带上 CLWP 气候变化趋势。

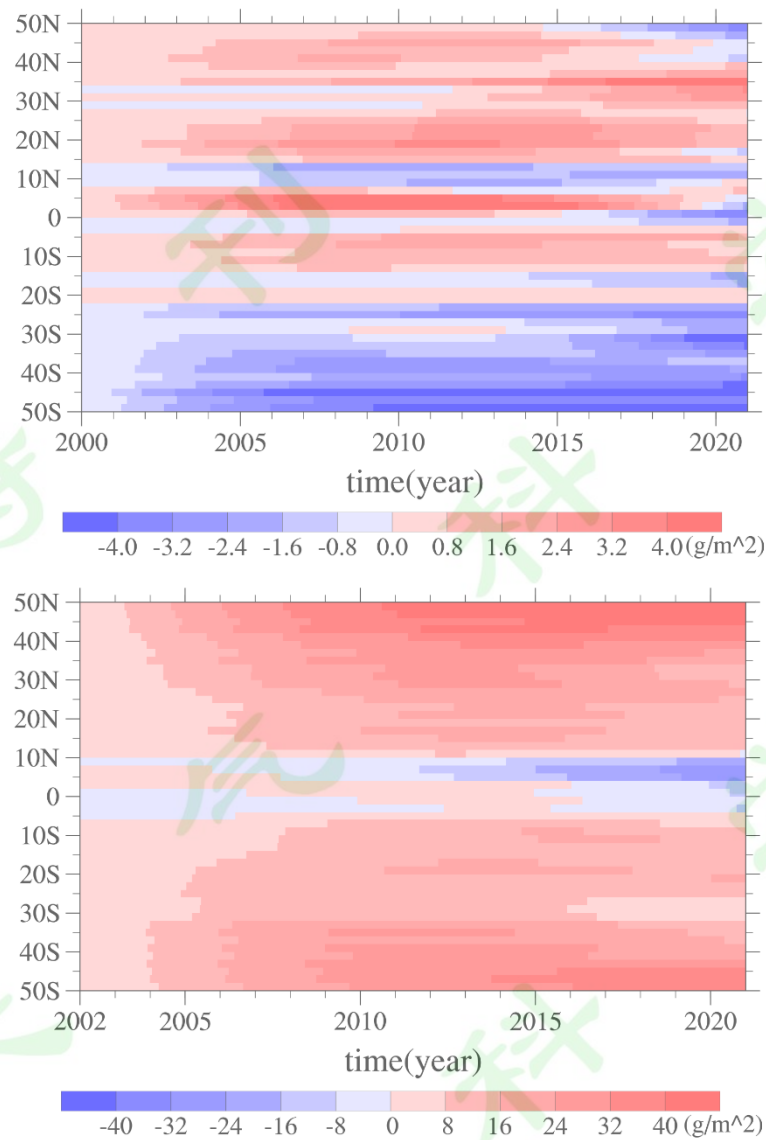


图 12：太平洋各纬度带上 CLWP 气候变化趋势（上：ERA5/CLWP 产品；下：FNL/CLWP 产品）

Figure 12: climate change trend of CLWP in various latitudes of the Pacific (upper: ERA5/CLWP products; lower: FNL/CLWP products)

结合图 8 和图 12，可以很明显的看出，与上文中比较线性趋势得到的结果类似，不同资料的非线性趋势在量值上同样存在明显的不同，但是 FNL 的 CLWP 的非线性趋势与另外两种资料得到的结果差距较大，趋势变化存在量级的差异，FNL 的非线性趋势的极值要比其他两种资料大 10 倍左右，在 0-10°N、30°N 以北和 30°S 以南区域呈完全相反的变化趋势。比较 CLWP 反演结果和 ERA5 云水产品，可以看出，在太平洋大部分区域，二者的变化趋势相近，仅在 30°N 附近呈相反的变化趋势。我们还可以看到，在 ERA5 资料的非线性气候变化趋势上，一

样出现了 5°N 附近的 CLWP 从 2015 年开始快速增加区域逐渐向北移动的现象。

图 13 和图 14 分别给出了不同年份再分析资料的非线性气候趋势空间分布图。结合图 9 和图 13-14，可以看到 FNL 的 CLWP 的非线性趋势与另外两种资料得到的结果差距较大甚至在大部分地区呈相反的变化趋势。在 ERA5 的结果中出现的 2015 年开始 CLWP 快速增加区域逐渐向北移动的现象与图 9 中反演 1 结果类似，而在 FNL 资料中，中高纬度的增加趋势北移现象能够很好的再现，但是对于中低纬度的气候趋势北移的现象没有很好的模拟，而且 FNL 资料的 CLWP 的气候趋势较为单一，赤道地区为单一的减小趋势，而南北两侧则是基本为增加趋势，未能很好的反映出非线性趋势的空间演变特征。

在 30°N 附近的区域，反演 1 的气候变化趋势与 ERA5 产品的气候变化趋势表现为相反的变化趋势，主要是因为反演资料在 30°N 附近的中太平洋区域表现为 CLWP 减小趋势偏强，而在东太平洋地区的增加趋势则是偏弱，因此导致二者在纬度带平均气候变化趋势上呈相反的变化趋势。但是从非线性气候趋势的空间分布图上可以看到，两种资料在气候趋势是较为一致的。

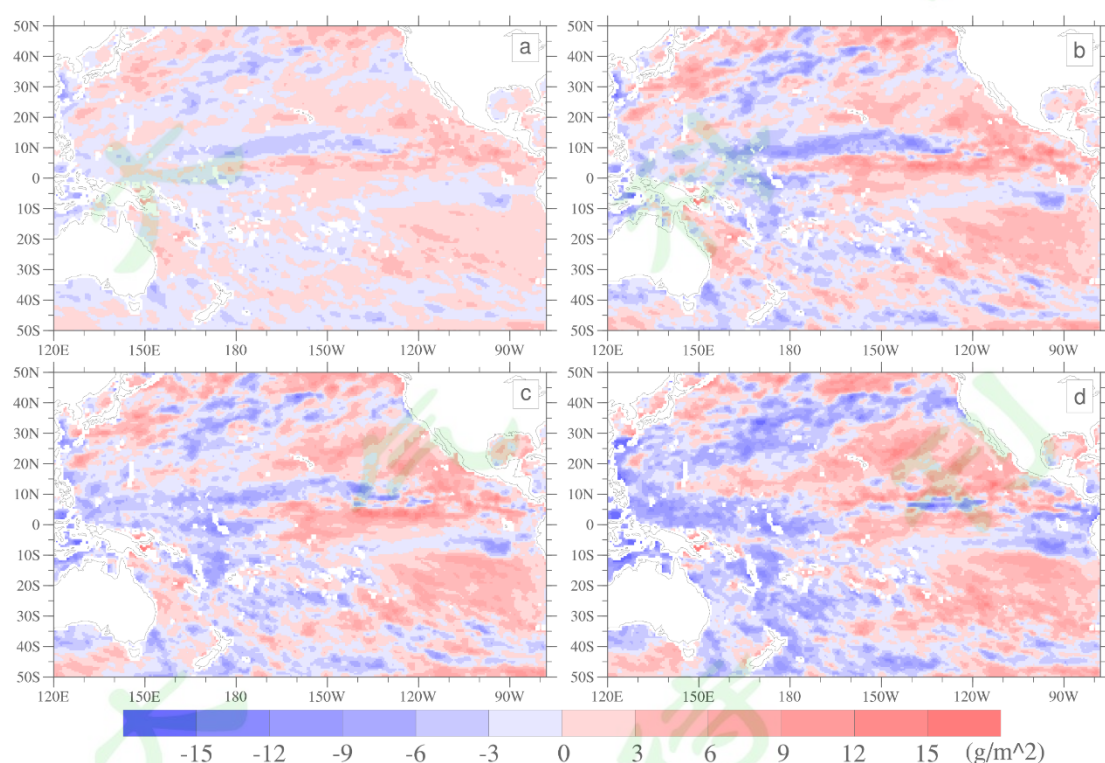


图 13: 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 7 月 ERA5/CLWP 产品太平洋上月平均 CLWP EEMD 分解后的空间分布图。

(a):2005 年; (b):2010 年; (c):2015 年; (d):2020 年

Figure 13: spatial distribution of ERA5/CLWP products in the Pacific Ocean after decomposition of last month's average CLWP EEMD in July 2005, 2010, 2015 and 2020.

(a): 2005; (b): 2010; (c): 2015; (d): 2020

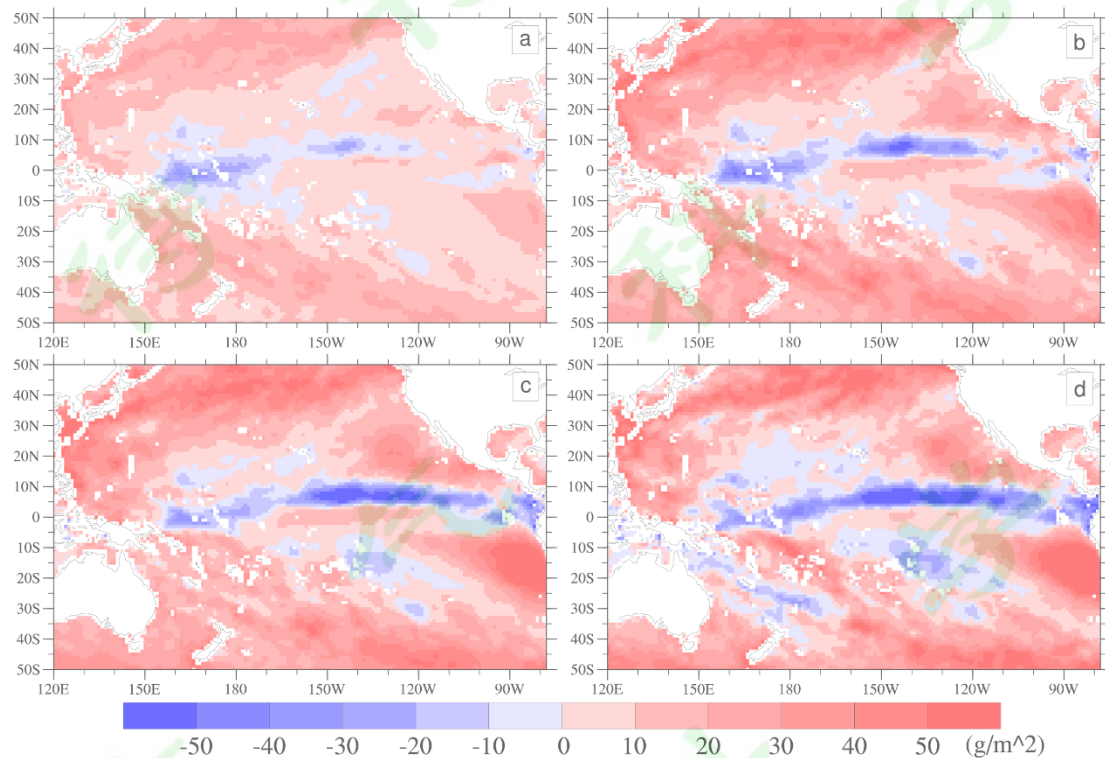


图 14: 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 7 月 FNL/CLWP 产品太平洋上月平均 CLWP EEMD 分解后的空间分布图。

(a):2005 年; (b):2010 年; (c):2015 年; (d):2020 年

Figure 14: spatial distribution of FNL/CLWP products in the Pacific Ocean after decomposition of last month's average CLWP EEMD in July 2005, 2010, 2015 and 2020.

(a): 2005; (b): 2010; (c): 2015; (d): 2020

七、结论与讨论

云层对地球的能量收支和水循环有着重要的影响，明确作为云参数之一的云水路径的气候变化，对天气和气候预测都起着重要作用。而观测云水的最好的星载观测仪器就是微波仪器。论文利用 NOAA-15 的 AMSU-A 观测资料，结

合再分析资料，通过前人建立的 CLWP 反演算法，成功反演得到了 2000-2020 年的云液态水路径资料。并进一步利用线性趋势和非线性 EEMD 气候趋势分析方法分析了太平洋上 CLWP 的气候变化趋势，并与 CLWP 的再分析资料产品进行了细致的对比研究。

研究结果表明利用 AMSU-A 观测资料可以有效地反演出海洋上的 CLWP，反演得到的 CLWP 很好地再现了 CLWP 的年平均分布特征。比较反演产品与再分析资料的线性变化趋势发现，FNL 产品可能存在较大的偏差，在大多数纬度带上呈相反的变化趋势。进一步通过 EEMD 方法分析太平洋上 CLWP 非线性气候趋势，发现北太平洋的 CLWP 气候趋势具有纬度带分布特征，而且气候趋势出现了整体的北移现象，而对于南太平洋，东部和西部出现了反向的气候趋势特征。

相比而言，在太平洋地区，卫星反演产品与 ERA5 产品变化趋势更为相近，而 FNL 产品的气候趋势与其他资料存在较大的量值偏差，对于热带北太平洋的 CLWP 的增加趋势和 30N 附近的减小趋势都未能很好再现，总体而言 FNL 资料未能很好的再现 CLWP 气候趋势的细致空间特征。

本文仅使用了一颗卫星的 AMSU-A 资料，导致每个观测点的时间分辨率较小，不能进行 CLWP 日变化研究。在后续的研究中，将利用极轨卫星数量多的特点，尝试加入其它极轨卫星 AMSU-A 资料进行反演，建立更高时空分辨率的观测资料，从而进一步对海洋上 CLWP 的日变化特征进行研究。

八、参考文献

Dai, A., T. R. Karl, B. Sun, and K. E. Trenberth. 2006. Recent trends in cloudiness over the United States: A tale of monitoring inadequacies [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc, 87: 597–606.

Greenwald, T. J., G. L. Stephens, T. H. Vonder Haar, D. L. Jackson. 1993. A physical retrieval of cloud liquid water over the global oceans using Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) observations [J], J. Geophys. Res, 98: 18471–18488, doi:10.1029/93JD00339.

Huang NE, Wu Z. 2008. A review on Hilbert-Huang transform: method and its applications to geophysical studies

[J]. Rev Geophys 46:RG2006.

Mo T. 1999. AMSU-A antenna pattern corrections [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens., 37: 103-112.

Norris, J. R. 1999. On trends and possible artifacts in global ocean cloud cover between 1952 and 1995 [J]. J. Climate, 12: 1864–1870.

Norman Grody, Jiang Zhao, Ralph Ferraro, Fuzhong Weng, Reinout Boers. 2001. Determination of precipitable water and cloud liquid water over oceans from the NOAA 15 advanced microwave sounding unit [J]. J. Geophys. Res., 106: 2943-2953.

Prabhakara, C., J. Wang, A. Chang, P. Gloerson. 1983. A statistical examination of Nimbus-7 SMMR data and remote sensing of sea surface temperature, liquid water content in the atmosphere and surface wind speed [J]. J. Clim. Appl. Meteorol., 22: 2033–2037.

Weng, F., N. C. Grody. 1994. Retrieval of cloud liquid water using the Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) [J]. J. Geophys. Res., 99: 25,535–25,551.

Weng, F., N. C. Grody, R. R. Ferraro, A. Basist, D. Forsyth. 1997. Cloud liquid water climatology derived from the Special Sensor Microwave Imager [J]. J. Climate, 10: 1086–1098.

Weng, F., N. C. Grody. 2000. Retrieval of ice cloud parameters using a microwave imaging radiometer [J]. J. Atmos. Sci., 57: 1069–1081.

Weng, F., R. R. Ferraro, N. C. Grody. 2000. Effects of AMSU cross-scan asymmetry of brightness temperatures on retrieval of atmospheric and surface parameters [M]. in Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere, edited by P. Pampaloni and S. Paloscia, pp. 255–262, VSP, Zeist, Netherlands.

Weng, F., L. Zhao, R. R. Ferraro, G. Poe, X. Li, and N. C. G. 2003. Advanced microwave sounding unit cloud and precipitation algorithms [J]. Radio Science, Vol., 38, No.4, 8068, doi:10.1029/2002RS002679.

Wentz, F. J. 1997. A well-calibrated ocean algorithm for special sensor microwave/imager [J]. J. Geophys. Res., 102: 8703–8718.

Wu Z, Huang NE. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Adv Adapt Data Anal, 1(1):1–41.

Wu Z, Huang NE, Chen X. 2009. The multi-dimensional ensemble empirical mode decomposition method [J]. Adv Adapt Data Anal, 1(3):339–372.

Wu Z, Huang NE, Wallace JM, Smoliak BV, Chen X. 2011. On the time-varying trend in global-mean surface temperature [J]. Clim Dyn, 37: 759–773. doi:10.1007/s00382-011-1128-8

Z.Qin., X.Zou., F.Weng. 2012. Comparison between linear and nonlinear trends in NOAA-15 AMSU-A brightness

temperatures during 1998-2010 [J]. Clim Dyn, 39: 1763-1779. doi:10.1007/s00382-012-1296-1.