

西太平洋赤道海域上空可降水 和云液态水的遥感分析*

魏 重 忻妙新 王普才 邹寿祥
宣越健 陈 英 林 海 吕达仁

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

提 要

根据1985—1989年中国科学院组织的西太平洋热带海域(0° — 5° N, 110° — 150° E)综合考察过程中船载双通道微波辐射计五年累计获得的22599组观测资料, 以及NOAA极轨卫星资料, 综合分析了该海域中水汽总量和云液态水的统计特征及其年际变化, 水汽场的整层与下层关系, 可降水的日变化及空间分布等特征. 指出了某些与陆地上不同的特点, 为气候及海上边界层研究提供了有意义的观测事实. 同时, 给出了五年中辐射计探测与探空测值的统计比较结果.

关键词: 可降水量; 云液态水含量; 热带海域; 微波遥感.

一、引 言

海气相互作用研究是气候研究的重要内容之一, 水在海气相互作用及相应的气候过程中起着举足轻重的作用: 占地球总面积百分之七十的海洋本身就是地球温度的最大的调节器; 海水在蒸发以致成云致雨过程中海气之间发生着物质(水)和能量(潜热)的复杂的双向交换过程, 更不要说云的生消、运动及分布对于太阳短波辐射及大气长波辐射能量的重要影响了; 水汽在红外波段的辐射特性使它成为大气向外辐射能量的主要成分. 就是这些输入输出能量和伴随的动力过程一起控制着地球的温度. 总之, 水汽和云是气候研究的重要对象.

由于受地面(特别是海上)站网密度所限, 探空所测水汽资料不能完全满足研究的需要, 更为遗憾的是, 除了地面上能对云的类型、云量作目测外, 根本没有常规手段能对云液态水含量作定量的观测. 60年代以来, 随着气象卫星的发展, 已有大量工作对云覆盖作观测分析. 卫星所测水汽资料也开始为一些气象工作者所利用, 当然, 它至今仍受到卫星探测目前所能达到的精度的限制. 在卫星遥感技术发展的同时, 地基被动遥感技术也有很大发展^[1,2]. 许多工作都已表明, 地基双波长(1.35, 0.85 cm)微波辐射计在探测水汽及液态含水量的路径总量方面有较高的探测精度和好的时间分辨率,

1990年10月24日收到, 1991年1月14日收到修改稿.

* 本文为国家自然科学基金资助项目, 本研究亦属中国科学院七五重点项目“西太平洋热带海域海气相互作用和年际气候变化研究”的一部分.

这是其他探测手段(包括卫星探测)不能相比的,作为遥感技术不可缺少的一支,它有着广泛的应用前景.但应该指出,目前地基辐射计的运行多是在中纬大陆地区,作为地球大气中水汽和云的主要源地的热带海域中这种探测还几乎是空白.

1985—1989年期间,中国科学院每年都组织西太平洋热带海域的综合考察,其宗旨是进行西太平洋热带海域海气相互作用的年际变化及其对东亚气候影响的研究.我们首次将陆上证明行之有效的地面被动遥感技术用到这一考察中,用自行研制的双波长微波辐射计系统,在海上连续获取两波段的辐射值,经过反演后得到相应单位面积垂直气柱中水汽总量(也称之为可降水量)和垂直路径积分云液态水含量的测值.五年总共进行了150多天观测,累积获资料22,599组.每年出海后,我们已对资料作过一些分析(见文献[3—5]),本文只着重于五年资料的综合分析以及那些与气候研究及海面边界层特性有关的事实.为了与陆上情况作比较,我们适当选用了双波长辐射计在北京地区进行观测的资料.同时,我们还对考察海域上空NOAA卫星的TOVS水汽资料作了初步分析.

二、船载微波辐射计系统的探测精度

表1给出了五年中船载双波长辐射计所测水汽总量与相应的船上施放的探空所测水汽总量的统计比较.由表可见,晴空条件下两种测值的一致性好于云天情况.包括云天在内,五年的水汽总量均方根偏离为 0.79 g/cm^2 ,相应的相对偏离平均在12.5%左右.考虑到微波辐射计在探测路径、取样空间和取样时间上都与探空有所不同,探空本身也存在着3%—10%的测湿误差,表1反映的结果是合理可信的,可以说辐射计探测的水汽总量与探空探测的精度是相当的.

由于缺乏可直接对比的其他独立探测手段,一般只能间接估计液水探测的合理性.从我们在陆上用辐射计对云作的多年探测来看,各类云的路径积分含水量的统计结果,与那些由飞机探测得到的云含水量及相应云型的云底、云顶高度(因而可得云厚)观测所估算的平均垂直液态水总量,在量级上以及各类云的相对数值大小上都是基本一致的.我们也曾对两波段辐射计的探测资料,选用五种相互独立的反演方法进行处理^[6],得到的五种液态水含量在变化趋势上一致性很好,在绝对量值上互相之间的差别也在可接受的探测精度之内,这表明了目前双波长辐射计测云液态水含量的结果的客观性.

表1 辐射计所测水汽总量与探空测值比较的偏差统计

年 份	晴 空				云 天				总 计			
	次 数	均方根 偏差 (cm)	平均水 汽总量 (cm)	相对偏差 (%)	次 数	均方根 偏差 (cm)	平均水 汽总量 (cm)	相对偏差 %	次 数	均方根 偏差 (cm)	平均水 汽总量 (cm)	相对偏差 %
1985	9	1.268	6.07	20.9	6	0.914	6.15	14.9	15	1.140	6.10	18.7
1986	12	0.570	6.00	9.5	4	1.471	6.48	22.7	16	0.886	6.12	14.5
1987	6	0.079	6.15	1.3	16	0.984	6.27	15.7	22	0.840	6.24	13.5
1988	10	0.245	5.56	4.4	5	0.830	5.96	13.9	15	0.519	5.69	9.1
1989	9	0.369	5.13	7.2	10	0.412	5.50	7.5	19	0.392	5.32	7.4
总计	46	0.663	5.77	9.1	41	0.915	6.04	14.0	87	0.792	5.90	12.5

综上所述, 双波长辐射计完全适用于海上观测, 与探空测水汽总量精度相当, 又可同时测得探空无法获得的云液态水路径积分值, 还具有经济、方便、时间分辨率高、可无人值守连续观测等优点, 有着广泛的应用前景。

三、可降水和云液态水的统计特征及其年际变化

1. 统计特征

考察海域中 22599 份水汽总量测值中有百分之九十以上集中于 $4.5-6.5\text{g}/\text{cm}^2$ 之间, 平均在 $5.8\text{g}/\text{cm}^2$ 左右, 这个值约比中纬大陆相同季节的均值高出 $2.0-3.0\text{g}/\text{cm}^2$ 。这片海域很少有无云的万里晴空, 平均云量在 3—7 之间。按照出现频数由大到小的云形依次是淡积云、卷云、高积云和浓积云, 层状云出现很少。在常见的四种水云中曾观测到的最大垂直路径积分液态水含量分别是: 浓积云 ($4700\text{g}/\text{m}^2$), 层积云 ($500\text{g}/\text{m}^2$), 淡积云 ($200\text{g}/\text{m}^2$), 高积云 ($150\text{g}/\text{m}^2$)。

2. 统计分布的年际变化

图 1 给出了五次考察得到的辐射计所测水汽总量相对频数分布曲线和云垂直路径积分液态水含量的频率分布直方图。由图可见各年的水汽和云液态水频率分布是有明显差异的。为了定量反映这些差异, 我们在表 2 中给出了逐年的统计平均值及相应的水汽频率等于 0.5 时曲线的宽度。我们可以近似地把所考察的海域当作一个箱体, 每次测值当作是从该箱体中的一次随机取样, 图 1 中测值频率分布曲线近似看作各年考察期间该海域的水汽和云液态水的概率分布, 其中也包括了晴空 (即云积分液态水值为零) 时的概率。以这样的分布为基础求得的大气中积分液态水的均值有别于单纯的某类云的液态水均值, 它应该是海域上空液态水出现的概率和积分液态水值大小的综合指标, 为了区别于单纯的某类云的液水值, 我们称之为云积分液态水的综合均值, 在表 2 中以 $\bar{L}$ 表示。另外, 我们还发现, 在热带海域中含液态水的云的出现大多数情况下是与对流活动有关的。以 1986 年考察期间对云型的目测为例可以清楚地反映这个情况: 那次考察目测各类云型出现总次数为 1313 次, 除去 205 次基本不含液态水的卷云 (Ci , Cs) 外, 在剩下的 1108 次中, 与对流活动直接有关的云型 ($Cu\text{ hum}$, $Cu\text{ Con}$, Cb 和 Fc) 出现频率占到了 72%, 高积云占 22%, 层积云占 4.7%, 真正与对流活动无关的层状云 (St , As) 只占 1.3%。因此, 在我们的分析中把 $\bar{L}$ 值的大小当作该海域对流活动强弱的一种表征。与表 2 相呼应的是五次考察的该海域云量的目测结果, 我们将它列在表 3 中。从两个表都可以看出, 1986 和 1987 两年中无论是云液态水综合均值 $\bar{L}$ 还是目测云量都比其他年份明显要低, 表明这两年秋季西太平洋考察海域的对流活动较其他年弱。值得注意的是: 1986 年中开始到 1988 年初发生了一次中等程度的 El Niño 事件, 1986 和 1987 年的两次考察正处于这个事件的进程之中, 从文献 [7] 的图 1 可见, 在 1986 中—1987 初的 El Niño 期间西太平洋热带海域 ($120-160^\circ\text{E}$, $5^\circ\text{N}-5^\circ\text{S}$) 海面温度呈负距平。黄荣辉^[8]曾指出: “Kurihara (1986) 和 Nitta (1986) 发现菲律宾附近对流活动和西太平洋热带海域 SST 异常之间有密切相关, SST 比正常值低时菲律宾附近对流活动弱 (这时对应 ENSO 发展阶段), 相反西太平洋热带海面温度比正常偏高

时菲律宾和南海附近对流活动强……”。我们所考察的海域处于菲律宾的东南，和上面指出的地区相邻。我们观测到的1986，1987两年考察海域对流活动弱这一现象，正是上述 El Niño 期间异常现象的一种反映。它从一个侧面进一步证实和补充了上述作者们所发现的事实。另外，从表2中可见1986和1987两年水汽总量频率分布曲线的宽度比其他年要宽，这也是一个值得注意的事实。

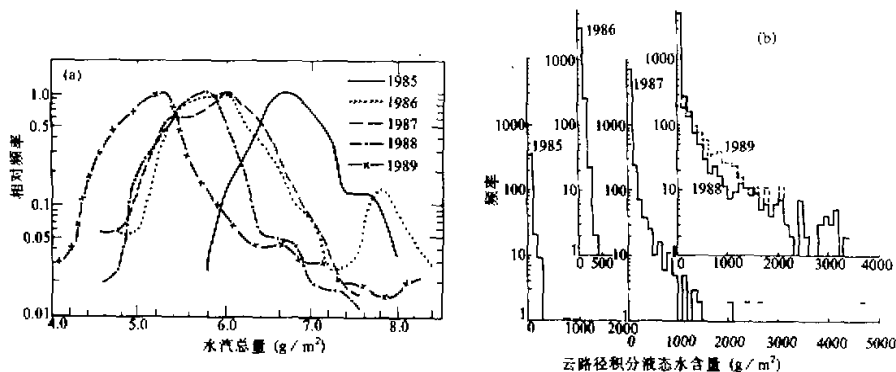


图1 (a) 辐射计所测水汽总量相对频率分布曲线

(b) 辐射计所测云路径积分液态水含量的频率分布直方图

表2 水汽总量和云垂直路径积分液态水总量统计特征的年际比较

年份	季节	样本个数	水汽总量均值 $\bar{Q}$ (g/cm^2)	Q值频率分布曲线 宽度 (g/cm^2)	云路径积分液态水 综合均值 $\bar{L}$ (g/m^2)
1985	冬	388	6.77	1.25	53.9
1986	秋	3047	6.08	1.50	21.0
1987	秋	7643	6.01	1.69	36.8
1988	秋	5174	5.71	1.22	98.7
1989	秋	6347	5.31	1.19	97.9

表3 目测云量的频数和均值

年 份	出现频率 样本数	云量										平均 云量	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		10
1985	283	0.018	0.021	0.042	0.071	0.071	0.064	0.046	0.056	0.039	0.067	0.505	7.56
1986	138	0	0.007	0.130	0.188	0.225	0.167	0.109	0.145	0.029	0	0	4.46
1987	150	0.220	0.073	0.087	0.067	0.033	0.067	0.040	0.007	0.007	0.053	0.287	5.08
1988	585	0	0.009	0.060	0.074	0.053	0.044	0.031	0.036	0.065	0.140	0.489	7.89
1989	121	0	0.149	0.174	0.050	0.050	0.074	0.050	0	0.099	0.041	0.355	6.23

四、整层水汽总量与海面绝对湿度的关系

研究整层水汽总量与地(海)面绝对湿度的关系，对于了解水汽的垂直输送机制和指导地(海)面通量观测设计都是很有意义的。为此，我们将在地(海)面用辐射计探测

得到的水汽总量和用通风干湿球湿度计测值换算得到的地(海)面绝对湿度作相关点聚图. 图2(a)给出的是1988年秋季海上观测的结果, 观测所在的船甲板位置约高出海面15m. 图2(b)是1988和1989年夏季以及1982年春夏秋三季在北京的观测结果, 观测地点为距地面约20m的楼顶. 由图可见, 海上与陆上明显不同, 海上整层水汽总量与海面绝对湿度之间几乎没有明显的相关, 而陆上相关系数可达0.88. 海上两个量之间这种几乎不相关的特性, 我们考察中不止一年都观测到, 这里只给出了一年作为例子. 为了进一步证实这一差异, 我们分别选取西太平洋海域中美托管地雅浦岛(9.6°N , 138°E)和北京的冬夏两季探空资料各150和280份, 经计算作出类似的点聚图. 结果表明, 有陆地特点的北京地区水汽总量和地面绝对湿度之间线性相关系数达0.97, 而且回归拟合曲线外推后通过原点; 具有海洋特点的雅浦岛夏季两个量之间不相关, 在冬季两个量表现出弱相关, 即使这时按此弱相关趋势外推到整层水汽总量趋于零时, 地面绝对湿度也仍维持 $16-17\text{g}/\text{m}^3$ 的高(截距)值. 以上的分析表明海上近海面边界层具有与陆地上不同的特点, 近海面有一高湿层基本不受其上面空气状态的影响. 应该指出, 在陆上人们常根据地面空气湿度按某种高度分布规律(例如指数衰减)来推断水汽廓线, 并由此求水汽总量, 人们也常以近地面的通量测量来作为边界过程中地气的交换量. 上述事实告诉我们, 简单地将上述办法用到海上是不妥当的. 为了准确地定量反映海气交换过程中水汽(及相应的潜热通量)交换量, 进一步搞清近海面边界层的厚度、层次等结构特点是很有必要的.

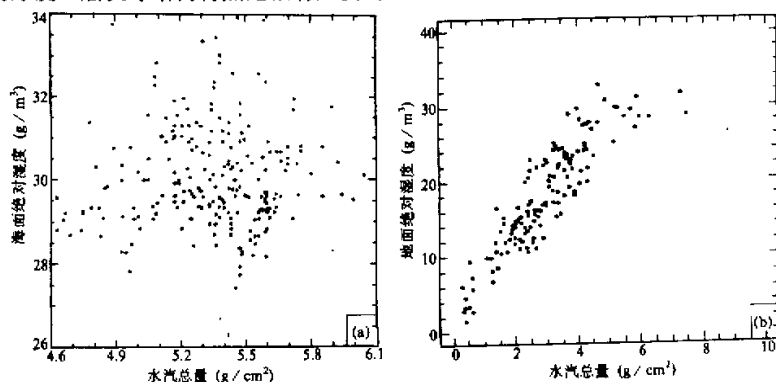


图2 辐射计所测水汽总量与海(地)面绝对湿度的关系

(a) 西太平洋热带海域, 1988年秋. (b) 北京春、夏、秋三季

五、水汽总量的日变化特征

我们对考察海域中水汽总量的时间序列作了全面的逐日分析, 发现晴空、非降水云天及热带辐合或某些小尺度对流天气形势下水汽总量的时间演变有着不同的特征. 图3给出了这三种情况下水汽总量(左侧三幅图)和云液态水含量(右侧图)的日变化序列的典型个例. 观测是在 5°N , 130°E 处定点停泊时进行的, 记录时间间隔为5分钟. 上面一组为晴天, 中间为非降水云天, 下面是降水天气, 图中符号“·”标出了本站降水发生的时段, 这时所测的云液态水含量值实际上包含了雨水的信息. 由图可见, 晴空和非降水云天水汽总量日变化较小, 有降水发生的日子水汽总量变化幅度大而且

剧烈。我们发现了一个带普遍性的特点是：在降水发生前的一段时间内（约 20—30 分钟或 1—2 小时不等），水汽总量（和路径积分云液态水含量）短时内有突然大幅度增加的现象。下面我们给出晴空时海上水汽总量的相对日变化的平均情况及其与陆上的比较。为此，我们按下列条件挑选了样本：（1）一日内连续晴朗的时间一般在 20 小时以上，最低也不少于 7 小时；（2）地（海）面风速不超过 4 m/s ；（3）海上只选船定点停泊时的资料。按上述条件选出海上 5 天陆上 13 天的原始资料，每隔一小时取前后三次测值的平均作为中间时刻的值，然后将一天内各值对地方时 12 点的测值进行归一，得

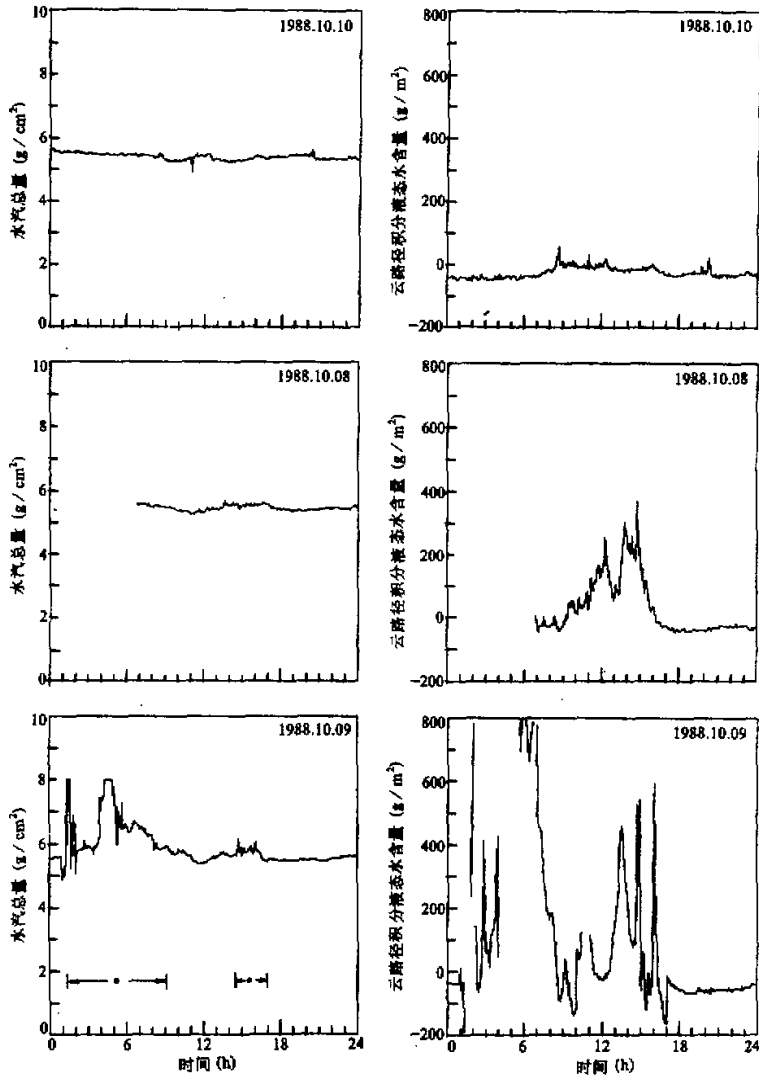


图3 不同天气条件下水汽总量及云垂直路径积分液态水含量日变化个例

(上)晴天(中)非降水云天,(下)降水天气(5°N , 130°E)

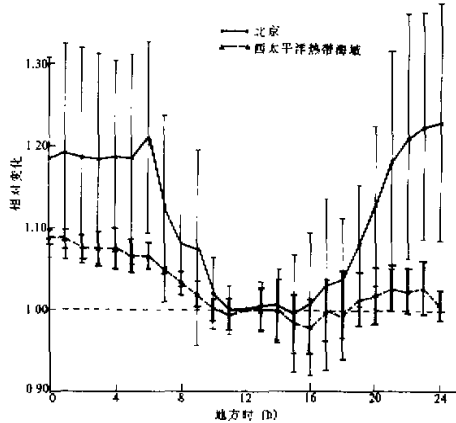


图4 海上晴空水汽总量相对日变化及其与陆上的比较

到24小时内水汽总量相对变化。图4是这种相对变化的平均及方差范围。由图可见,海上和陆上晴空水汽总量的相对变化呈大致相同的趋势,但海上水汽总量的相对变化比陆上要小,一般在5%—10%,陆上可高达20%。另外,相对值的均方根偏离也是海上较陆上小,表明海上控制日变化的因子较单一,而陆上影响日变化的因素较复杂。

六、NOAA卫星 TOVS 水汽资料的分析

1988年和1989年在西太平洋海域考察的同时,广东省气象卫星地面站收集了美国NOAA-10气象卫星通过考察海域上空时的轨道资料,中国科学院大气物理研究所技术系统发展研究室用他们移植研制的微机TOVS软件包^[9]作了反演。在此基础上,我们对该海域水汽总量的空间分布作了初步分析,得到了一些有意义的结果。

我们将赤道到北纬40度之间以2度纬度为间隔分成若干区间,把在1989年10月5日至11月4日一个月期间内,覆盖考察海域所跨经度区间(110—150°E)的那些NOAA-10极轨卫星资料,在所划分的纬度区间上分别作平均,作为各纬度区间中点上的月平均值。图5为所得到的水汽总量均值及方差的经向分布曲线。图的右下角所画曲线是1968年9月27日一天当中苏联“宇宙-243”试验极轨卫星上获得的太平洋上水汽总量经向均值的经向分布^[10]。比较两条曲线可见其经向分布趋势是一致的,进一步比较表明,在中纬30—40°N范围内两曲线在数值上也很接近,但在0—20°N的低纬部分,NOAA卫星资料反演的水汽总量偏低1—2g/cm²。除了月平均分布外,我们还对NOAA卫星所测水汽总量的空间分布个例作了分析,发现水汽总量与流场之间在空间分布上相互呼应:图6(b)为1988年10月8日11:00卫星测水汽总量的分布,图6(a)是同天中相临近时刻(12:00z)的热带地面流线分析图。图6(a)表明10—20°N之间为台风和辐合区,相应图6(b)中稍偏北处为一水汽高值区。台风及辐合区的南面流线比较平直,相应水汽总量的空间分布也均匀。图6(b)中“▲”所标注处为船载辐射计的位置,由图可见,船附近海域卫星所测的水汽总量值比船载辐

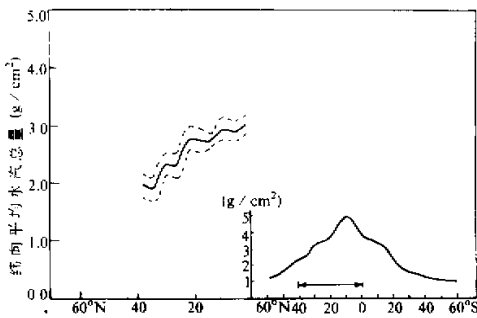


图 5 极轨卫星所测水汽总量纬向平均的经向分布

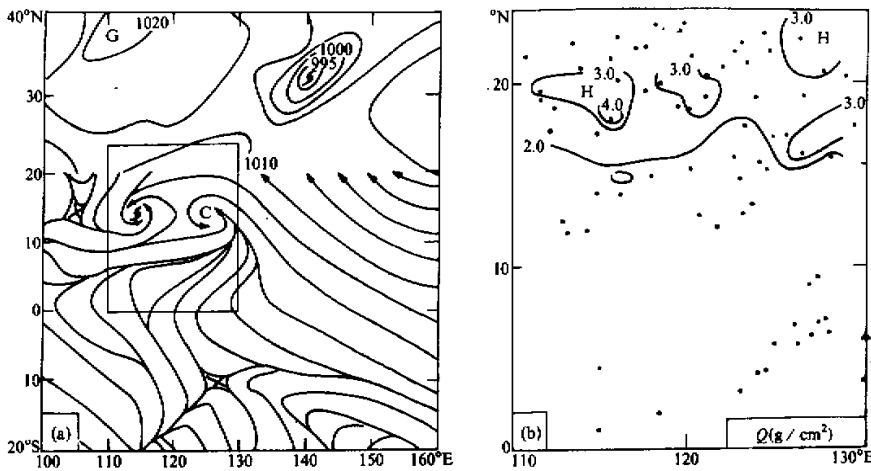


图 6 NOAA 极轨卫星 TOVS 水汽总量分布个例及相应的热带地面流线分析图

射计测值偏低 $2 - 3 \text{ g/cm}^2$ ，多次个例比较都表现出这种偏低趋势。本文第二节中我们已对船载辐射计的精度作了讨论，使我们确信船载辐射计的测值有可信的精度。图 6 反映出的这种在热带海域卫星测值偏低的情况与图 5 反映的情况也是一致的。我们推测这种偏离可能是现有的微机 TOVS 软件包中缺乏具有该海域代表性的初值廓线所造成的。

七、小 结

- (1) 双通道微波辐射计在海上的探测精度可以和探空相比，并且能定量探测云路径积分液态水含量。它具有灵活、实时、经济、时间分辨率高以及可无人值守连续观测等优点，是一种实用的海上测湿和测云水的工具。
- (2) 考察海域水汽总量平均在 5.8 g/cm^2 左右，比中纬大陆相应季节的值高出 $2.0 - 3.0 \text{ g/cm}^2$ 。海域平均云量在 $3 - 7$ 之间。云型依出现频率大小顺序为淡积云、

卷云、高积云和浓积云等, 曾观测到的最大垂直路径积分液态水含量 (g/cm^2) 分别为: 浓积云 4700, 层积云 500, 淡积云 200, 高积云 150.

(3) 该海域水汽总量和云垂直路径积分液态水含量的频率分布存在着明显的年际变化, 初步分析表明这些变化与 El Niño 事件有一定对应关系.

(4) 与大陆上不同, 热带海域水汽总量与海面绝对湿度之间几乎没有相关关系, 表明海上边界层有着特殊的结构, 在研究海气交换和进行海上通量观测设计时应予以注意.

(5) 热带海域中在中小尺度降水发生前水汽总量 (及路径积分液态水含量) 在短时内有大幅度的增加. 除这种情况外, 一般非降水云天和晴天的水汽总量变化平稳. 晴天时, 海上水汽总量相对日变化在 10% 以内, 比陆上日变化 (可达 20%) 要小, 影响日变化的因子也较陆上单一.

(6) NOAA 极轨卫星的微机 TOVS 水汽资料可给出热带海域水汽场的相对分布, 但所得该海域水汽总量绝对值偏低, 定量分析时应作适当订正.

参 考 文 献

- [1] Hogg, D.C., et al., 1983, An automatic profiler of the temperature, wind and humidity in the troposphere, *J. Clim. & Appl. Meteor.*, 22 (5), 807 — 831.
- [2] 赵伯林等, 1984, 大气微波辐射与水汽的遥感, 科学通报, 29 (4), 225 — 227.
- [3] 魏 重等, 1989, 微波遥感海上大气可降水和云液态含水量, 大气科学, 13 (1), 101 — 107.
- [4] 魏 重等, 1989, 西太平洋热带海域水汽和云中液态水含量的统计特征, 大气科学, 13 (2), 199 — 203.
- [5] Wei Chong, Lin Hai, et al., 1989, Microwave remote sensing of atmospheric water vapor and cloud liquid water over equatorial western pacific ocean with a shipborne dual-wavelength radiometer, *Microwave Remote Sensing of the Earth System*, Ed. by Alain Chedin, A. Deepak Publishing, 111 — 126.
- [6] Wei Chong, H. G. Leighton and R.R. Rogers, 1989, A comparison of several radiometric methods of deducing path-integrated cloud liquid water, *J. Atmos. & Oceanic Tech.*, 6 (6), 1001 — 1012.
- [7] Kousky, V.E. and A. Leetma, 1989, The 1986 — 1987 Pacific warm episode: evolution of oceanic and atmospheric anomaly fields, *J. Clim.*, 2 (3), 254 — 267.
- [8] Huang Ronghui and Wu Yifang, 1989, The influence of ENSO on the Summer climate change in China and its mechanism, *Advances in Atmospheric Sciences*, 6 (1), 21 — 32.
- [9] 曲燕妮、周凤仙, 1989, 处理卫星垂直探测资料 (TOVS) 的微机软件包, 气象, 15 (8), 34 — 36.
- [10] А.М. Обухов, и другие, 1971, Исследование атмосферы по собственному излучению излучу Ченню на цсз «Космос-243», *Космические Исследования*, 9 (1), 66 — 76.

Analysis of Precipitable Water and Cloud Liquid Water Content over Equatorial Area of Western Pacific on the Basis of Remote Sensing

Wei Chong, Xin Miaoxin, Wang Pucai, Zou Shouxiang,
Xuan Yuejian, Chen Yin, Lin Hai, Lu Daren

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029)

Abstract

The statistical features of precipitable water (PW) and cloud path-integrated liquid water content (PILWC) and their interannual variation, the relation of total and lower layer water vapor fields, and the diurnal variation and the spatial distribution of PW have been analyzed on the basis of 22,599 sets of data obtained by a ship-borne dualwavelength microwave radiometer and other observations, such as satellite data etc., during the 5-year comprehensive survey organized by Chinese Academy of Sciences over tropical area of the western pacific ($0-5^{\circ}\text{N}$, $110-115^{\circ}\text{E}$) from 1985 to 1989. Observations show that some features of PW and PILWC over the sea are different from those over land. The statistical comparison of the microwave radiometer-derived precipitable water from the 5-year data with those by radiosondes is also given.

Key words: Precipitable Water, Cloud Liquid Water Content, Tropical Ocean Area, Microwave Remote Sensing.