

用多光谱卫星信息分析白昼云天条件下的湿度场^{*}

郁 凡 刘长盛 余志豪

(南京大学大气科学系, 南京, 210093)

摘 要

TOVS 资料的晴空湿度场反演已进行多年, 如何利用卫星遥感信息实现云天条件下的湿度场反演, 仍是一个值得研究的问题。多光谱卫星图像上不同云类的云层高低分布蕴涵着三维湿度场的分布信息, 文中用相关分析、最小二乘拟合分析和多元线性回归分析分别讨论了多光谱卫星信息与各标准层相对湿度的关系。标准回归分析的复相关系数 R 在地面最小, 约为 0.64, 随高度增加, R 逐层增大, 700 hPa 以上大于 0.7, 250 hPa 以上大于 0.8。相应显著性检验的结果 F 值从地面的 30.71, 也逐层增大, 至 200 hPa 时达 119.36。逐步回归分析在剔除了不显著的变量因子后, 回归自变量减少到 2~4 个, 反映显著水平的 F 值有较大提高。在此基础上建立了一组云天条件下的多元线性回归方程, 由此可得到具有卫星图像像素分辨率(8~10 km)的 9 层湿度场。

关键词: 多光谱卫星信息, 湿度场, 反演。

1 引 言

雷暴、暴雨等严重灾害性天气往往都是中尺度对流系统的产物。对于造成灾害性天气的强降水预报, 仍然是中尺度数值预报最薄弱的环节之一。原因之一是由于用于客观分析的常规观测资料密度不够, 使湿度场分析缺乏代表性, 难以捕捉到实际水汽场的中、小尺度变化特征。采用能够较好反映出水汽场水平变化细节特征的卫星资料, 处理后作为初值, 被视为改进这一问题的重要途径之一。

在利用 TOVS 资料进行湿度场反演研究的同时, 国内外气象工作者也在努力试验用高时空分辨率的多光谱卫星图像反演有云条件下三维湿度场, 并不断取得新的进展。Mills 和 Davidson^[1] 用 GMS 红外数字图像提取云类、云高和云量等气象特征量, 统计建立这些特征量与同点探空资料之间的联系, 确定了 19 条按不同云类、云量和云高分别使用的对流层湿度廓线。依此在实际应用中建立三维湿度场。Garand^[2] 和 Koch 等^[3] 分别用最小二乘偏差程序或动态聚类方法先实现云的分类, 从各类云中提取云量等拟合特征量, 再建立云量等拟合特征量与相对湿度的关系, 并以此为基础, 构造三维湿度场。他们的研究表明: 不同的云类以及同一云类不同的

云量分别对应有不同的湿度分布; 二维光谱特征空间上, 构成集群的光谱特征向量(多波段卫星测值作分量)依其在光谱特征空间的位置, 不仅包含云类的信息, 也含有云量的信息。对于这个论点, Platt^[4] 曾用辐射传输理论分别对低云(水云)和高云(冰云)做了很有意义的探讨, 也得到了相似的结论。从他们的试验中可以看到, 可见光波段卫星测值对大气低层伴有降水高湿区的水汽含量、水汽波段卫星测值对大气高层的水汽含量分别有很好的指示性。但是, 由于云量与相对湿度垂直廓线之间的关系复杂, 故对各类云而言, 从云量向相对湿度廓线的转换有较大的不确定性。

既然云量与相对湿度垂直廓线之间的关系难以可靠地确定, 那能否直接使用不仅包含云类信息, 也含有云量信息的多维光谱向量本身与相对湿度垂直廓线建立相互之间的关系呢? 为此, 本文尝试应用统计分析方法, 分别考察了各波段卫星测值、卫星估计降水强度和降水概率^[5] 与各标准等压面相对湿度场的关系。相关分析、最小二乘拟合分析和多元线性回归分析的结果均表明, 多波段卫星测值、卫星估计降水强度和降水概率与各标准层相对湿度场之间确实存在着比较明确的统计关系。在此基础上, 文中建立了一组多元线性回归方程, 直接从多波段

* 初稿时间: 2000 年 10 月 9 日; 修改稿时间: 2001 年 3 月 13 日

资助课题:《国家重点基础研究发展规划》项目(G1998040910)和国家自然科学基金项目(40175007)。

卫星测值确定具有卫星图像像素分辨率的各标准层湿度场。

2 资料及其处理

文中进行湿度场反演试验选用的是 GMS-5 静止卫星的红外、水汽、可见光 3 波段图像资料。可见光图像已作了太阳高度角订正。图像采用等经纬度投影方式, 投影的中心纬度是 32.00°N , 中心经度是 110.00°E , 纬度和经度分辨率分别为 0.0520° 和 0.0633° 。共有 1996 年 6 月 16 日至 7 月 15 日每小时一次的红外、可见光和水汽 3 波段图像用于统计分析和校验。

作湿度场分析时参考的地面和探空资料主要取自 $22\sim 36^{\circ}\text{N}$, $106\sim 124^{\circ}\text{E}$ 范围内 38 个常规地面和探空观测站, 时间从 1996 年 6 月 16 日至 7 月 15 日。其中, 6 月 24, 25, 29 日和 7 月 3, 5, 9 日的资料用作校验, 其它资料用于统计分析。

为分析卫星测值和各层相对湿度的统计关系, 首先需按探空资料所在测站从多波段卫星图像上读取相应的卫星测值。为避免单点卫星测值对测站及相邻区域缺乏代表性, 在从卫星图像读取测值前, 均先对各波段卫星图像进行了 3×3 或 5×5 中值滤波处理。各标准等压面的湿度资料也作了从温度露点差到相对湿度的转换。读取的各波段卫星测值和相应的各层相对湿度均按人机对话云分类方法^[6,7]确定的积雨云、多层云系、中云、低云、厚卷云、薄卷云及无云等 7 种云况逐类形成原始数据文件。

3 卫星测值和各层相对湿度的相关分析

3.1 分类样本分析

图 1 是不同云况相对湿度统计中值的垂直分布廓线。相对湿度统计中值垂直分布廓线比较客观地反映了各种云况相对湿度垂直分布的典型特征。

积雨云的相对湿度统计中值在 500 hPa 以下均

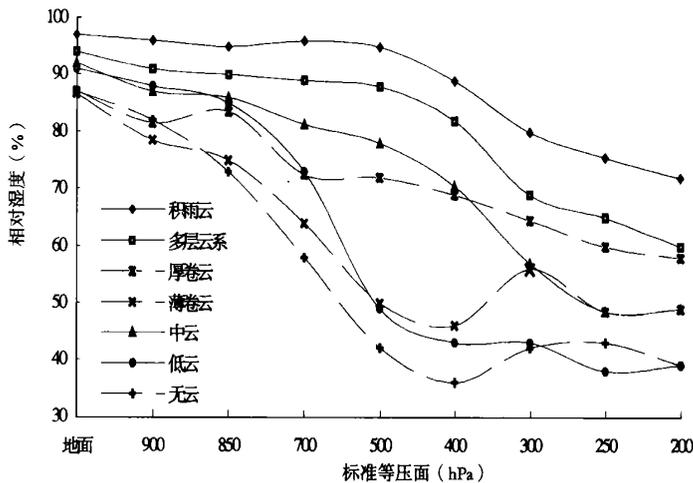


图 1 7 类云况相对湿度统计中值分布廓线

保持在 95% 左右, 多层云系(指下有中低云上卷云的情况或较弱的积雨云情况)相应也达 90%。中云和低云分别在 400 hPa 和 700 hPa 以下保持着 70%~90% 以上较湿的相对湿度, 再往上相对湿度就迅速下降。厚卷云和薄卷云的相对湿度统计中值在低层比前述 4 种云况均明显偏干, 直到 400 hPa 以上厚卷云和薄卷云的相对湿度统计中值才达到或超过低云和中云的情况。无云时的相对湿度统计中值, 从低层至高层几乎都是最低的。由此可见, 相对湿度统计中值垂直分布廓线能够比较客观地反映出各种云况相对湿度垂直分布的典型特征。但是, 并

不能简单地直接利用它按云类来确定湿度场。统计分析表明, 经过云分类确定的各种云况, 在各个标准等压面上相对湿度的动态变化范围相当大。因此, 某一云况的相对湿度统计中值垂直分布廓线对该类云相对湿度垂直分布只是反映了总体平均的情况, 对具体分析个例并不具有显著的代表性。

不同云况下 3 波段卫星测值与同时同地探空实测相对湿度的相关分析表明(表略), 各波段卫星测值与实测相对湿度的相关系数普遍都不大。除水汽波段的卫星测值(W)与实测相对湿度的相关在低云和无云区的上层有较好的表现, 相关系数可达到

0.6~0.7外,其余相关系数几乎都低于0.5。分析其原因,一方面是因为,经分类后,受资料的限制,某些云况的样本数量较少(如:在所用的探空资料中,积雨云有30多个分析样本),难以确保统计分析结果的可靠。但在对中空、低云和无云等云况专门取了一百多个分析样本分析,也并没有显著提高卫星测值与探空实测相对湿度的相关系数。因此更重要的原因是,在各云况条件下,卫星测值的大小与相对湿度的高低实际上并不存在简单的对应关系。经分类后,各云况的卫星测值往往仅分布在一个较小、甚至很小的范围内。以积雨云的可见波段卫星测值(V)为例,它仅在55~63的范围内变化,显然,55以上的 V 无论大小皆揭示了高湿度区的存在。但此时,也很可能有略大些的 V 却对应着相对较低的实测相对湿度,而略小些的 V 反而却对应着更高的实测相对湿度的情况。55以上的 V 在对应着高湿度区的前提下,积雨云的 V 测值的些许差异往往并不能敏感反映该云况实测相对湿度的细微变化,这必然造成 V 与实测相对湿度之间难以存在大的相关。但就总体样本(不分云况)情况的综合分析看, V 直接反映的是云体的反照率,它间接揭示了云体的光学厚度。由于云的光学厚度与云所在高度的相对湿度有密切联系,因此, V 的大小与实测相对湿度之间的高低存较好的相关。红外波段卫星测值(I)、水汽波段的卫星测值(W)与实测相对湿度之间也有相似的关系。在分析中,同时发现由卫星测值导出的降水概率(P_p)和降水强度(P_I)与整层实测相对湿度之间亦有较大的相关。为此,本文进一步综合考察了所有样本的卫星测值及降水概率和降水强度与各层实测相对湿度之间的统计关系。

3.2 综合样本分析

表1是综合各云况样本形成一个大大样本集的3波段卫星测值以及直接由卫星测值导出的降水概率(P_p)和降水强度(P_I)^[5]与同时同地探空实测相对湿度的相关分析。分析表明, V 卫星测值与700 hPa以下的实测相对湿度、 I 卫星测值和降水概率 P_p 值与500~400 hPa间的实测相对湿度水汽测值、 W 与300 hPa以上的实测相对湿度分别有最好的相关。降水强度 P_I 值在300 hPa以上与实测相对湿度亦有相对较好的相关。各层最好的相关系数都在0.6~0.8之间,这基本反映了3波段卫星测值与各等压面高度相对湿度的相关程度。但任一波段的卫星测值都只能在某些层面上与实测相对湿度有

较好的相关,若简单地用某一波段的卫星测值去建立与各等压面相对湿度的关系显然是不合适的。

表1 综合样本3波段卫星测值与实测相对湿度的相关分析

| | I | V | W | P_p | P_I |
|---------|------|------|------|-------|-------|
| 地面 | 0.29 | 0.60 | 0.15 | 0.50 | 0.31 |
| 900 hPa | 0.30 | 0.59 | 0.20 | 0.52 | 0.35 |
| 850 hPa | 0.39 | 0.65 | 0.26 | 0.53 | 0.34 |
| 700 hPa | 0.51 | 0.72 | 0.33 | 0.62 | 0.39 |
| 500 hPa | 0.68 | 0.63 | 0.51 | 0.67 | 0.43 |
| 400 hPa | 0.71 | 0.57 | 0.63 | 0.65 | 0.48 |
| 300 hPa | 0.61 | 0.43 | 0.77 | 0.53 | 0.57 |
| 250 hPa | 0.53 | 0.41 | 0.82 | 0.50 | 0.64 |
| 200 hPa | 0.52 | 0.42 | 0.83 | 0.50 | 0.68 |

从红外与可见光($I-V$)和红外与水汽($I-W$)两波段卫星测值与850,700,500以及300 hPa的实测相对湿度进行最小二乘拟合所得的结果来看(图略),在 I 与 V 二维光谱特征空间,低层的相对湿度,虽然与 I 并没有很好的相关,但仍可以清楚地看出低层相对湿度的大小随 V 和 I 变化的层次。相对湿度在低层基本随 V 的增大而增大,在 I 的一个较大的变化范围内($I: 100\sim 180$),当 V 同时较大时(对应于低、中云),反映云层厚度的 V 越大,低层的相对湿度亦越大,低云比中云更显著;当 V 较小时(对应于薄卷云或碎云),低层的相对湿度明显变小。当 I 与 V 均很大时(对应于积雨云)低层相对湿度接近饱和。随等压面层的上升,对应标准层上高相对湿度区逐渐向右上角收缩,相对湿度逐渐从在低层时的与 V 高相关转到与 I 有更高的相关。到300 hPa高度,在 $I-V$ 二维光谱特征空间上,只有对应积雨云的区域(高 I 和 V 测值区),保持着近饱和的相对湿度。在 $I-W$ 二维光谱特征空间,一个显著的特点是,在中低层,当 I 测值固定时,相对湿度随 W 测值的增大而下降。这是因为,较薄的卷云由于下层的透射,往往具有与中低云相近的 I ,而 W 波段对薄卷云所在的高层的辐射较敏感,能够更好地检测出存在的卷云。因此,对应于一个有相同的 I 、但不同 W 的像素,若 W 越大,越可能是薄卷云,这种情况下,是薄卷云,则其下的中低层相对湿度势必要比是中低云时更低些。这样,利用 W 波段的测值,可为排除薄卷云的干扰,为更可靠地确定中低层的相对湿度提供保障。在300 hPa层上,在晴空和中低云区($I < 180$ 时),相对湿度的大小主要取决于 W , W 越大,越可能存在卷云,该层往往越湿些。在300 hPa高度,对积雨云或多层云系(I

> 180 时), 该层的相对湿度, 则主要与 I 相关。上述两波段卫星测值与标准等压面上实测相对湿度的最小二乘拟合分析表明: 综合应用多波段卫星测值可以更合理地确定卫星测值与各层相对湿度的关系。

4 卫星测值和各层相对湿度的回归分析

从表 1 的分析可以看出, 3 波段卫星测值以及直接由卫星测值导出的降水概率(P_p)和降水强度(P_I)与同时同地探空实测的各标准等压面相对湿度之间的确存在一定程度的相关。在此基础上, 文中分别采用标准多元线性回归方法和逐步回归方法(逐步剔除方案), 对 3 波段卫星测值及降水概率、降水强度与各标准等压面相对湿度进行了标准回归分析和逐步回归分析。

标准回归的复相关系数 R 在地面最小, 约为 0.64, 随高度增加, R 逐层增大, 700 hPa 以上大于 0.7, 250 hPa 以上大于 0.8。相应显著性检验的结果 F 值从地面的 30.71 也逐层增大, 至 200 hPa 时达 119.36。虽然 R 看上去不太大, 但由于最小的 F 值(地面) = 30.7, 也远大于 $F_{0.01} = 2.86$, 故在 $\alpha = 0.01$ 水平上, 各层的回归方程仍是相当显著的。标准回归的估计标准误差在 850 hPa 以下的低层和在 250 hPa 以上的高层小于 0.1, 在 700~300 hPa 内, 介于 0.1~0.15 之间。同时也须注意到, 5 个回归自变量, 在与各层的实测相对湿度回归分析中, 往往只有 1~3 个是显著的。由于存在着对相对湿度预报量的影响不显著因子, 随之带来许多其它与预报量无关的随机因素, 势必影响回归方程的稳定性, 反而使预报效果下降。为解决这个问题又采用了逐步回归方法进行分析。从逐步回归的结果看, 不显著的变量因子基本都被剔除, 回归自变量减少到 2~4 个。反映显著水平的 F 值有较大提高, 虽然, 复相关系数略有下降, 但估计总体回归关系解释方差的调整复相关系数(Adjusted R_2) 几乎均有所提高, 而且, 无论是估计标准误差与截距标准误差, 还是各回归自变量的不相关概率几乎都有所改善。

利用回归分析的结果, 可以得到卫星测值与各标准等压面上相对湿度的多元线性回归方程组:

$$R_{\text{地面}} = 0.756192939 - 0.000589I +$$

$$0.004891V + 0.002597P_I$$

$$R_{900 \text{ hPa}} = 0.676816935 - 0.000765I +$$

$$0.006175V + 0.004749P_I$$

$$R_{850 \text{ hPa}} = 0.565732191 - 0.000532I +$$

$$0.007478V + 0.003257P_I$$

$$R_{700 \text{ hPa}} = 0.366808084 + 0.008410V +$$

$$0.000619P_p$$

$$R_{500 \text{ hPa}} = 1.768427490 + 0.003854I -$$

$$0.007764W + 0.001924P_p$$

$$R_{400 \text{ hPa}} = -0.604958 + 0.002034I +$$

$$0.003902W + 0.001897P_p$$

$$R_{300 \text{ hPa}} = -3.18589 + 0.01679W + 0.00092P_p$$

$$R_{250 \text{ hPa}} = -3.095664730 + 0.01627W +$$

$$0.00816P_I$$

$$R_{200 \text{ hPa}} = -2.673711108 + 0.01423W +$$

$$0.01011P_I$$

其中 $R_{\text{地面}} \sim R_{200 \text{ hPa}}$ 分别是地区到 200 hPa 被反演的相对湿度。

图 2 是 6 种云况下, 用卫星测值统计反演整层相对湿度的几个典型示例。其中, 图 2a, b, c, d, e 和 f 分别是积雨云、多层云系、中云、低云、卷云和无云情况下的反演结果, 它们或是取自不同测站或是取自同一测站不同时间的观测资料。图上横坐标是相对湿度, 纵坐标是气压。粗曲线是统计反演曲线, 细曲线是探空实测曲线。竖直线是 90% 相对湿度标志线。“OBS”和“REG”下分别给出了各标准等压面上观测和反演的相对湿度, “DEF”下是观测相当湿度与反演相对湿度的差。每图右下端是该测站的站号和所在经纬度。每图的上端给出了当时的地面观测记录, 其中, “sumcld”, “lsumcld”分别给出的是总云量和低云量, “lowst”, “midst”, “higt”分别给出了低层、中层和高层的云状, “nowweather”, “pastweather”, “surfrain”则分别报告了当前、过去的天气状况和前 6 h 的雨量。地面观测的云报告与卫星资料云分类分析的结果由于观测方向的差异, 有时有所不同。例如, 图中(a₁)的积雨云个例, (a₁)的云报告结果是中低云的总云量为百分之百, 中低云的遮蔽使上层情况不明。从卫星观测中发现有很高的对流云顶(红外云顶温度很低), 可见光反照率很大, 具有强对流云的形态和结构, 因此, 卫星资料云分类分析判识其为积雨云(同时, 由地面报告可知, 当时天气为持续性中雨, 6 h 雨量 31 mm)。两个多层云系的例子也类似。

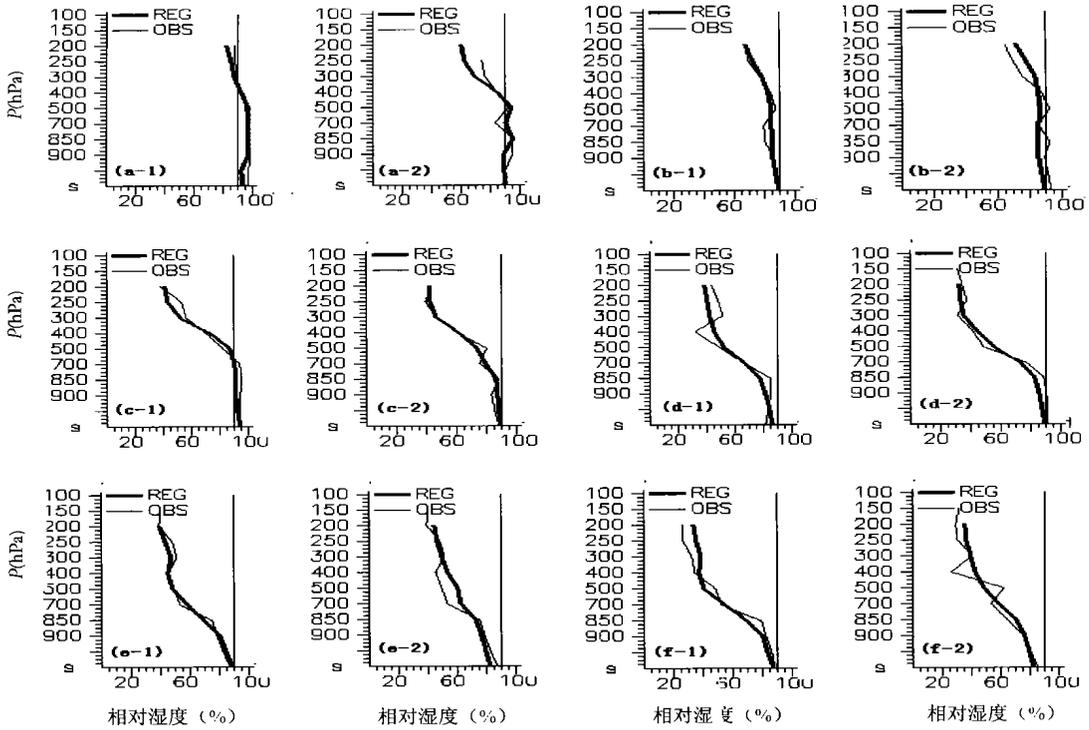


图2 不同云况下,卫星测值统计反演整层相对湿度的典型示例

(a. 积雨云, b. 多层云系, c. 中云, d. 低云, e. 卷云, f. 无云;

OBS 是测值, REG 是反演结果; 其中的 1, 2 分别是不同实况下的结果, 垂直线为 90% 相对湿度线)

由图可见, 在各种云况下, 卫星测值统计反演整层相对湿度与实测结果均较一致。

5 结果检验

为从总体上了解卫星测值统计反演整层相对湿度与探空实测各层相对湿度数据间的差异, 图3给出了1996年6月28日08时(北京时)分析区域(23~35°N, 106~122°E)内部分测站卫星反演和探空实测整层相对湿度的结果对比。

为便于比较不同情况下反演结果的优劣, 特定义单站整层绝对均方误差(R_{AMSE}), 以此衡量卫星反演与探空实测相对湿度的整层接近程度。

$$R_{AMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (R_{OBSj} - R_{REGj})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

其中 N 为参与分析的层数, 通常, $N = 9$, 从地面到 200 hPa 共有 9 层, 个别上层缺测的站, N 视具体情况而定。

分析结果表明, 在积雨云云况下或在有降水发生时, 通常整层有较好的分析结果($R_{AMSE} \leq 0.06$), 而分析结果较差的情况($R_{AMSE} > 0.10$) 则往往发生在无云、卷云或中层忽然很干以及各层间相对湿度变化较大时。一般而言, 用这种统计回归方法从卫

星测值反演各层相对湿度, 其效果湿区要优于干区, 有云区(或有云层面)要优于无云区(或无云层面)。

为检验卫星反演与探空实测的相对湿度在各层面上偏差程度, 再定义区域单层绝对均方误差(R_{AMSEi}):

$$R_{AMSEi} = \left[\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (R_{OBSij} - R_{REGij})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

其中下标 i 为分析所在的层数, M 是分析区域内所有参与分析的探空站数, 有 30 余个。表 2 是对用于检验的 6 d 资料进行计算后得到的区域单层绝对均方误差结果。

表2 分析区域内卫星反演和探空实测各层相对湿度绝对均方误差分析(1996年)

| | 6月24日 | 6月25日 | 6月29日 | 7月3日 | 7月5日 | 7月9日 |
|---------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 地面 | 0.06 | 0.05 | 0.11 | 0.07 | 0.05 | 0.05 |
| 900 hPa | 0.08 | 0.09 | 0.10 | 0.07 | 0.07 | 0.06 |
| 850 hPa | 0.06 | 0.08 | 0.12 | 0.08 | 0.09 | 0.11 |
| 700 hPa | 0.07 | 0.12 | 0.14 | 0.11 | 0.09 | 0.10 |
| 500 hPa | 0.14 | 0.14 | 0.15 | 0.12 | 0.13 | 0.10 |
| 400 hPa | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.15 | 0.14 | 0.14 |
| 300 hPa | 0.10 | 0.11 | 0.16 | 0.12 | 0.11 | 0.09 |
| 250 hPa | 0.11 | 0.10 | 0.11 | 0.12 | 0.11 | 0.07 |
| 200 hPa | 0.12 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.08 | 0.08 |

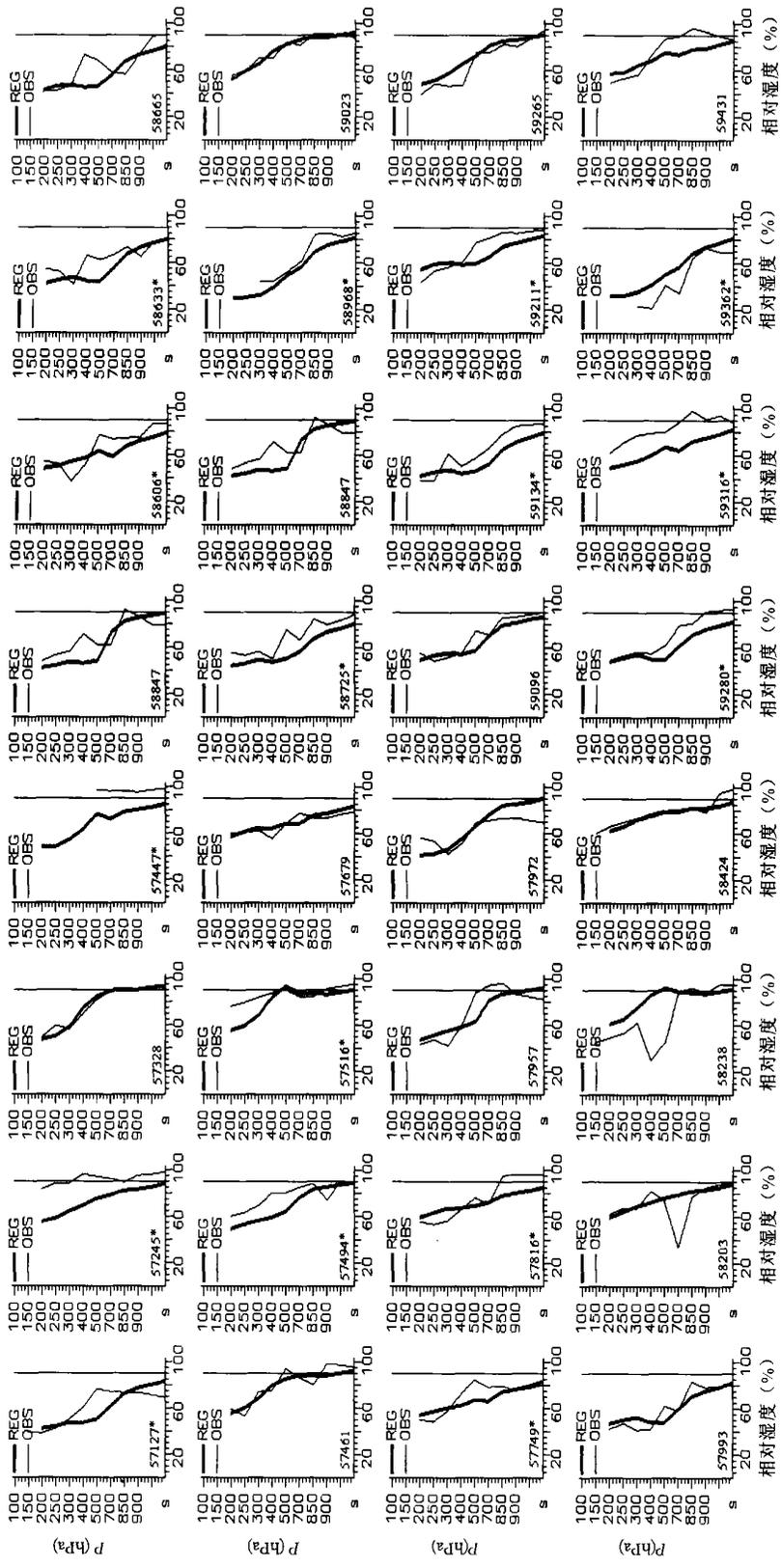


图 3 1996 年 6 月 28 日 08 时 (北京时间) 23~35°N, 106~122°E 内 32 个测点卫星反演与探空实测整层相对湿度结果对比

(OBS 是实测结果, REG 为反演结果, 垂直线是 90%相对湿度线)

从绝对均方误差的整体分析结果看,各层的绝对均方误差基本都在 0.15 以下。从层间绝对均方误差的变化看,几天的情况大致相似,下层绝对均方误差较小,中层绝对均方误差较大,300 hPa 以上又有改善,这基本反映了普遍的情况。虽然,在作回归分析时,下层相关系数相对较小,但由于下层通常普遍较湿,相对湿度的变化范围较小,保证了较小的绝对均方误差。在 500 hPa 上下,较大的绝对均方误差主要是由于某些测站在中层相对湿度很干,卫星反演的相对湿度偏湿,造成 $DEF (= OBS - REG)$ 过大所致。毕竟卫星是从上向下观测,且所用波段不具备穿透云的能力,因此这种方法对厚卷云下的中层干层和多层云下的中低层往往难以把握。

在进行结果对比分析时也应考虑到卫星观测与常规观测毕竟是两种完全不同的探测手段。卫星观测瞬时完成,而探空观测往往持续 1~2 h,且起始和终止时间也不一致;卫星观测是星下点视场的综合平均,探空观测是气球升空路径逐点数据采集,这些都限制了两种资料相互间的可比性。1996 年 6 月 28 日 00 时 58238 站(32.0°N, 118.8°E)的观测结果是一个与卫星反演有较大差别的极端个例,仔细分析一下,很能说明这个问题。

表 3 中 OBS 和 REG1 分别是探空实测和测站处卫星资料反演的相对湿度,DEF1 是两者的差。探空资料表明,从 700 hPa 到 500 hPa,相对湿度从 90% 剧减至 46%,从 500 hPa 到 400 hPa,相对湿度

又递减到 30%,表 5 可见,这与卫星反演结果有很大不同。卫星观测和探空观测这两种探测手段的不同,很可能是造成这种差别的主要原因。分析 08 时(北京时)的卫星图像,58238 测站处于大片云区的北界,测站处的红外图像云顶亮温为 -48.72°C ,水汽图像云顶亮温为 -49.44°C ,可见光反照率为 0.85,表现为一片浓密的积雨云。从 58238 测站 08 时的地面观测记录看,云类也为积雨云,低云云量为 75%,总云量为 100%,云底高度 300~600 m,观测时有雷暴发生并伴有阵性降水。所有观测记录均表明,当时测站处于对流活跃的积雨云的控制之下。为什么 500 hPa 层以上探空遭遇干层呢?从探空实测的风向和风速看,900 hPa 以上几乎各层均为西南风,而 58238 测站又正处于大片云区的北界,因此,探空气球达 500 hPa 高度后,很可能已经飘出了积雨云区。因为从卫星图像反演的湿度场具有很高的水平分辨率(分辨率与卫星图像相同),因此可以方便地逐个像素观测卫星反演各层相对湿度的结果,考虑到风向和风速,将观测点向西南略偏 0.1 左右(32.1°N, 118.86°E),用该点的卫星测值得到上表中 REG2 的反演结果,再向西南约偏 0.5(32.55°N, 119.35°E),又得到上表中 REG3 的反演结果。显然,考虑了风向和风速、天气系统移动造成探空仪器偏离测站的可能影响后,卫星反演的相对湿度在 500 hPa 以上均更接近于探空实测。

表 3 1996 年 6 月 28 日 00 时 58238 站的观测与回归结果对比

| | 风向(度) | 风速(m/s) | OBS | REG1 | DEF1 | REG2 | DEF2 | REG3 | DEF3 |
|---------|-------|---------|------|------|-------|------|-------|------|-------|
| 地面 | 180 | 2 | 0.96 | 0.93 | 0.03 | 0.89 | 0.07 | 0.89 | 0.07 |
| 900 hPa | 230 | 12 | 0.89 | 0.9 | -0.01 | 0.84 | 0.05 | 0.84 | 0.05 |
| 850 hPa | 250 | 14 | 0.92 | 0.91 | 0.01 | 0.83 | 0.09 | 0.82 | 0.10 |
| 700 hPa | 250 | 6 | 0.90 | 0.91 | -0.01 | 0.78 | 0.12 | 0.74 | 0.13 |
| 500 hPa | 225 | 10 | 0.46 | 0.95 | -0.49 | 0.75 | -0.29 | 0.59 | -0.13 |
| 400 hPa | 230 | 9 | 0.30 | 0.89 | -0.59 | 0.67 | -0.37 | 0.54 | -0.24 |
| 300 hPa | 255 | 22 | 0.63 | 0.78 | 0.15 | 0.59 | 0.03 | 0.52 | 0.11 |
| 250 hPa | 265 | 28 | 0.53 | 0.70 | 0.17 | 0.55 | -0.01 | 0.50 | 0.03 |
| 200 hPa | 280 | 33 | 0.49 | 0.66 | 0.17 | 0.51 | -0.02 | 0.47 | 0.02 |

图 4 是在考虑了风向、风速和天气系统移动因素后对同一分析区域内的部分测站反演和实测相对湿度有较大偏差的再分析结果,对比可见,卫星反演相对湿度均与实测值显著减小了偏差。

综合分析 1996 年 6 月 24, 25, 29 日和 7 月 3, 5, 9 日所有检验样本,归纳其结果,主要有以下 4 种情

况:(1)当探空测站处于较大范围均匀密实的云中时,反演结果与探空实测比较一致;(2)当探空测站处于云区边缘时,两种探测手段的区别会造成偏差。若考虑天气系统移动等因素,往往反演结果与探空实测明显趋近;(3)当上下层有云中无云造成探空曲线中层突然变干或多曲折时,某些中间层会有较

大偏差; (4) 在 35°N 附近的干区, 反演结果往往偏湿。前两种分析较好的情况约占全部检验样本的 75% 以上。

6 结 论

从以上讨论, 可以看出, 虽然经云分类后, 各类云样本的相对湿度统计中值垂直廓线比较客观地反映了各种云况相对湿度垂直分布的典型特征, 但几乎各种云况在各个标准等压面上相对湿度的动态变化范围都相当大, 因此不宜直接利用它按云类来简单地确定湿度场。综合样本的统计分析表明, 3 波段卫星测值及卫星图像导出的降水强度和降水概率是各等压面高度相对湿度的重要相关因子。但是, 任一波段的卫星测值都只能在某些层面上与实测相对湿度有较好的相关, 若简单地用某一波段的卫星测值去建立与各等压面相对湿度的关系显然是不合

适的。标准回归和逐步回归分析给出了较好的结果, 复相关系数从低层到高层在 0.63 到 0.85 之间。反映显著性水平的 F 值均远大于 $F_{0.01} = 2.86$, 故在 $\alpha = 0.01$ 水平上, 各层的回归方程是显著的。尤其逐步回归后, 剔除了不显著因子, 回归自变量减少到 2~4 个, F 值和调整复相关系数相比与标准回归几乎均有提高, 估计标准误差, 截距标准误差和各回归自变量的不相关概率大都有所改善。从回归方程反演湿度场的结果看, 大多数检验样本卫星反演和探空实测的结果基本吻合, 在积雨云云况下或在有降水发生时, 尤其如此(单站整层绝对均方差 $R_{AMSE} \leq 0.06$); 分析结果较差的情况 ($R_{AMSE} > 0.10$) 往往发生在无云、卷云或中层忽然很干以及各层间相对湿度变化较大时。区域单层绝对均方差 (R_{AMSEi})、下层和上层绝对均方差较小, 中层绝对均方差较大, 但各层的绝对均方差基本都在

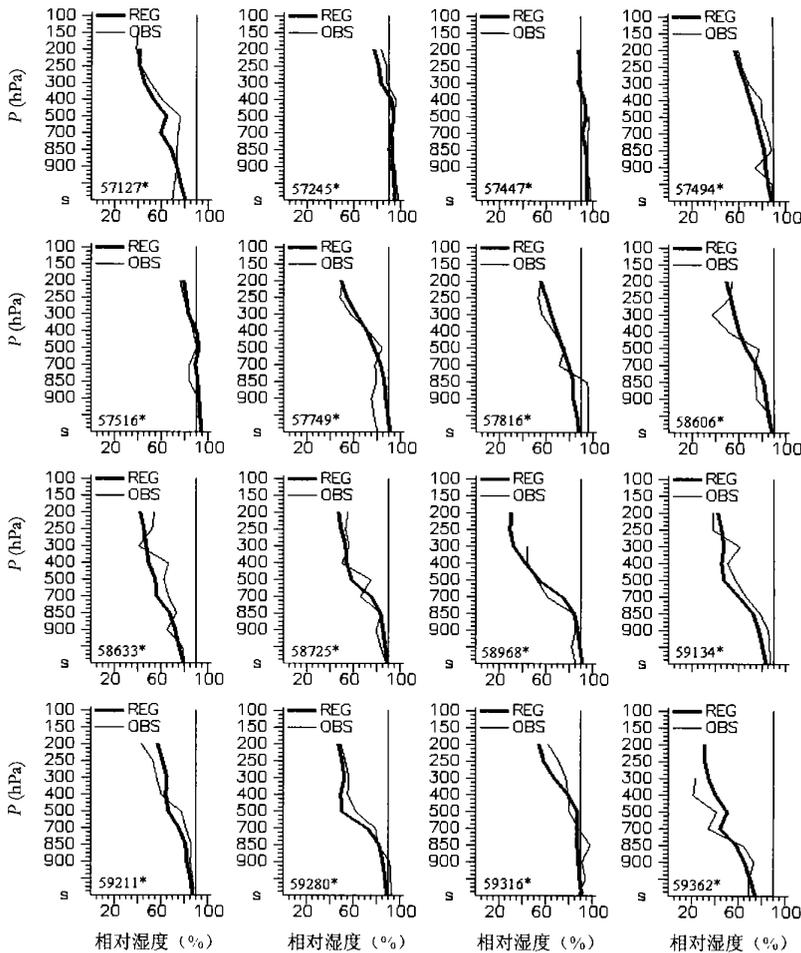


图 4 图 3 中部分站点(站号带*)的考虑风的影响和系统移动后的反演结果与实测值的对比 (OBS 为实测, REG 为反演; 垂直线为 90% 相对湿度线, S 为地面)

0.15 以下。一般而言,统计回归方法从卫星图像反演各层相对湿度,其效果湿区要优于干区,有云区(或有云层面)要优于无云区(或无云层面)。由此可见,用多波段卫星测值和卫星导出降水参量反演各标准等压面相对湿度是基本可行的。

综上所述表明,在进行卫星反演和探空实测湿度场的对比分析中也应注意到,卫星观测瞬时完成,而探空观测往往持续 1~2 h,且起始和终止时间也

不一致;卫星观测是星下点视场的综合平均,探空观测是气球升空路径逐点数据采集,这些都限制了两种资料相互间的可比性。另外,毕竟卫星是从上向下观测,且所用波段不具备穿透云的能力,因此这种方法对厚卷云下的中层干层和多层云下的低层往往难以把握。引入云分类的结果并融合探空和地面实测资料进行协同分析,将可能是一条改进的途径。

参考文献

- 1 Mills G A, Davidson N E. Tropospheric moisture profiles from digital IR satellite imagery: System description and analysis/forecast impact. *Aust Meteor Mag*, 1987, 35: 109~118
- 2 Garand L. A pattern recognition technique for retrieving humidity profiles from METEOSAT or GOES imagery. *J Appl Meteor*, 1993, 32: 1592~1607
- 3 Koch S, Aksakal A, Mcqueen J T. The influence of mesoscale humidity and evapotranspiration fields on a model forecast of a cold-squall line. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 384~409
- 4 Platt C M R. On the bispectral method for cloud parameter determination from satellite VSR data: separating broken cloud and semisparent cloud. *J Climat Appl Meteor*, 1983, 22(3): 429~439
- 5 郁凡. 多光谱卫星图象气象特征量的提取及其在中尺度数值预报模式中的应用:[学士论文]. 南京:南京大学大气科学系,1998
- 6 Yu Fan, Liu Changsheng, Chen Weimin. Man-computer interactive method on cloud classification based on bispectral satellite Imagery. *Adv Atmos Sci*, 1997, 14(3): 389~398
- 7 Yu Fan, Liu Changsheng. Improved Man-computer interactive classification of clouds on bispectral satellite imagery. *Acta Meteor Sinica*. 1998, 12(3): 361~375

HUMIDITY FIELDS ANALYSIS IN DAYTIME CLOUDY SKY WITH MULTI- SPECTRAL SATELLITE INFORMATION

Yu Fan Liu Changsheng Yu Zhihao

(*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093*)

Abstract

Despite that the retrieval study of humidity fields in clear sky with TOVS data has been many years, how to obtain the retrieved humidity fields in cloudy sky with satellite remote sensing information is also a problem. This paper addresses the relationship between multispectral satellite information and probed relative humidity in each of standard isobaric surfaces using correlation analysis, least-square fitting and multivariate linear regression separately. Complex correlation coefficient R (≈ 0.64) of the standard regression scheme is minimal at ground level and then grows with height, reaching > 0.7 above 700 hPa and > 0.8 above 250 hPa, with significance test results (F value) increasing from 30.71 at ground to 119.36 at 200 hPa. When a stepwise regression scheme is adopted, most of insignificant variables have been removed in such a way that only 2—4 variables remain, and F value showing significance level is raised quite considerably. Accordingly, we have established a system of multi-variant linear regression formulae that can be used in cloudy sky with the aim to determine standard-level RH fields of satellite imagery pixel resolution(8—10 km) directly from multispectral satellite information.

Key words: Multispectral satellite information, Humidity fields, Retrieval.