

用 GMS5 卫星反演水汽场 分析中国西北地区大气水汽分布的气候特征

陈添宇 李照荣 陈 乾 李宝梓

甘肃省人工影响天气办公室, 兰州 730020

摘 要 卫星遥感资料具有反演大气水汽含量的能力。由于山区降水一般随高度增加, 而海拔高的地区大气柱的厚度比海拔低的地区薄, 整层水汽含量少, 使得大气总水汽含量与降水的分布在复杂地形情况下不吻合。为此, 引入用卫星反演的单位大气柱水汽含量, 较好地反映了降水的空间分布特征。分析结果表明, 在云水条件上, 西北地区东部具备了较好的实施人工增雨(雪)的条件, 尤其在春、夏季, 实施人工增雨(雪)的云水条件更加优越。

关键词 卫星遥感 水汽场 中国西北地区 大气水汽分布 气候特征

文章编号 1006-9895(2005)06-0864-08 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

The Analysis of Climate Characteristics of Water Vapor Distribution over Northwest China with Water Vapor Field Retrieved from GMS5 Satellite Data

CHEN Tian-Yu, LI Zhao-Rong, CHEN Qian, and LI Bao-Zi

Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020

Abstract The water vapor in the atmosphere is essential to the precipitation, and the satellite remote sensing data can be used to retrieve the atmospheric water vapor content in a higher temporal and spatial resolution way than that obtained from radiosonde stations. Generally, the precipitation in the mountain areas of Northwest China increases with altitude, but the water vapor content is low in the high elevation region because of the thin atmosphere column, which make the total water vapor content in atmosphere inconsistent with the distribution of precipitation in complex mountain areas. Therefore, the water vapor content in unit atmospheric column derived from satellite data can be used to analyze the characteristics of water vapor and precipitation distribution.

Above all, the model of retrieving water vapor content of the whole atmospheric column combining radiosonde stations with GMS5 satellite thermal infrared 1 and 2 split window, visible light and water vapor four channels has been established, and the method how to calculate the water vapor content in unit atmospheric column in the troposphere based on the fact that water vapor mainly exists in the troposphere is proposed, and then the temporal and spatial distributions of water vapor and precipitation in the eastern part of Northwest China are analyzed.

The results show that: (1) the maximal water vapor content is between 850 - 500 hPa over Northwest China; (2) the water vapor content distribution in the whole atmospheric column is not only correlated with climate condition, terrain, and the type of surface cover, but also correlated with the thickness of atmospheric column; (3) the distribution of water vapor content in unit atmospheric column may reflect the precipitation distribution and highlight the distribution of terrain cloud to a certain extent, and it has instructive significance in retrieving precipitation with

satellite data; (4) the better condition of cloud and liquid water in the eastern part of Northwest China is favorable for artificially increasing precipitation (snow), especially in spring and summer.

Key words satellite remote sensing, water vapor field, Northwest China, water vapor distribution, climate characteristics

1 引言

大气中的水汽是产生降水的必要条件,其含量的多少以及分布状况对各种时空尺度的大气过程起了重要作用。利用探空手段获取的大气水汽资料,空间和时间分辨率均较低,而卫星反演的水汽场,不仅空间和时间分辨率高,而且在人烟稀少甚至人迹罕见地区,同样可得到翔实的监测资料。对此,许多学者进行了大量的研究。李成才等^[1]利用 GMS5 红外分裂窗数据进行反演水汽的应用研究,江吉喜等^[2]对青藏高原夏季 TBB (Black Body Temperature) 场与水汽分布关系进行初步研究,朱民等^[3]探讨利用 GMS5 卫星图像反演的高分辨率湿度场资料改进初始场,以提高暴雨中尺度数值预报水平的可能性。这些研究表明,卫星反演大气水汽是一种有效的监测大气水汽的手段,可用来监测、分析中小尺度天气过程的水汽时空分布特征。

我国西北地区气象、探空站稀少,用卫星资料反演大气水汽和分析云特征更具优势。刘洪利等^[4]和宜树华等^[5]用卫星资料对我国西北地区云的气候特征进行了分析,认为西北地区多云特征在 4~6 月最显著,总云量的分布形势与地形吻合得较好。陈勇航等^①的工作表明,在全球变暖,大部分地区云水资源减少的情况下,祁连山地区和青海省近 15 年来,总云水路径呈明显上升趋势。这些研究都表明,在云水条件上,西北地区大部分地方具备了实施人工增雨(雪)的条件。因此,充分利用该地区的云水资源,适时开展人工增雨(雪),对缓解西北水资源短缺很有意义。

2 资料

本文选用中国西北地区东部 2002 年 6 月~

2003 年 5 月的卫星、探空、地面降水等资料。探空资料选用陕、甘、宁、青、新以及内蒙古等省区 26 个探空站的温度、露点温度及气压等资料。卫星资料选用日本 GMS5 红外 1、红外 2 分裂窗和可见光、水汽四个通道资料。在资料发送时数据已定标,各通道数据用对照表进行转换。本文重点分析我国西北地区东部(32°N~43°N, 92°E~110°E),该区域地形复杂、地表覆盖类型繁多,几乎涵盖了我国所有的地表类型。同时,该区域的降水时空分布十分不均匀。因此,选择该区域进行大气水汽时空分布的分析很有意义。

3 水汽的反演方法

3.1 探空资料计算水汽方法

考虑水汽主要集中于 100 hPa 以下,因此按探空资料的标准层划分,先计算地面至 100 hPa 各层的水汽量,最后求和。

按水密度 $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ 计,整层气柱中 1 mm 的水量相当于截面为 1 m^2 的气柱中含水量 1000 g。换算成以 mm 为单位的整层水汽含量由下式计算:

$$C_{\text{water}} = \sum_{i=1}^{10} \frac{W_i}{1000}, \quad (1)$$

W 为各层间的截面为 1 m^2 气柱中的水汽含量(单位: g/m^2),

$$W = 0.5(V_t + V_b)(h_t - h_b), \quad (2)$$

其中, h_t 、 h_b 是层顶、层底的高度(单位: m), V_t 、 V_b 是层顶、层底的水汽密度(单位: g/m^3)。

水汽密度 V 的表达式为

$$V = 0.622e \frac{100000}{287.05(t + 273.15)}, \quad (3)$$

式中 e 为水汽压(单位: hPa), 其表达式为

$$e = 10^{10.79574 \left(1 - \frac{273.16}{t_d + 273.15}\right) - 5.028 \lg \left(\frac{t_d + 273.15}{273.16}\right) + 1.50475 \times 10^{-4} \left[1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{t_d + 273.15}{273.16} - 1\right)\right] + 4.2873 \times 10^{-4} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{t_d + 273.15}\right) - 1\right] + 0.78614}, \quad (4)$$

① 陈勇航, 黄建平, 陈长和, 等. 中国西北地区空中云水资源的时空分布特征. 高原气象, 待发表

式中, t 为标准层的温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), t_d 为露点温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)。

3.2 卫星反演空中水汽方法

一般认为, GMS5 卫星在 $6.7\ \mu\text{m}$ ($6.5\sim 7.0\ \mu\text{m}$) 的水汽通道处于水汽吸收带, 其亮温可反映 400 hPa 以上的水汽含量, 而对下层水汽则具有“掩盖”作用, 即与 400 hPa 以下水汽的关系很难确定。GMS5 卫星在 $11\ \mu\text{m}$ ($10.5\sim 11.5\ \mu\text{m}$) 和 $12\ \mu\text{m}$ ($11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$) 红外分裂窗通道, 对水汽的吸收有细微的差异, 这种差异与 400 hPa 以下水汽含量有较为密切的关系, 可用来反演低层水汽量。GMS5 卫星可见光通道的反照率反映了云层对太阳光线的反射, 其值与云层的水汽含量关系密切。因此, 可采用统计回归方法, 建立大气整层水汽含量与红外分裂窗的亮温差、 $6.7\ \mu\text{m}$ 水汽通道的亮温以及可见光通道的反照率的回归关系式来反演大气水汽含量。

本文用 2002 年 6 月~2003 年 5 月 08 时(北京时)的探空资料计算大气水汽含量与 GMS5 卫星的红外分裂窗的亮温、可见光通道的反照率以及水汽通道的亮温, 建立了大气水汽统计反演模式。本统计反演模式没有区分晴空区和云区, 其原因是不同的季节, 判别晴空和云的条件不一致, 由于资料所限, 分季节统计样本量不足, 另外, 山区的积雪和云较难区分, 因此, 将晴天和云天资料一起用于建立大气水汽反演模式, 表达式如下:

$$Q = 3.799(I_1 - I_2) + 57.332\alpha + 0.322I_w - 77.160, \quad (5)$$

式中, Q 为卫星反演的整层水汽含量, I_1 和 I_2 分别

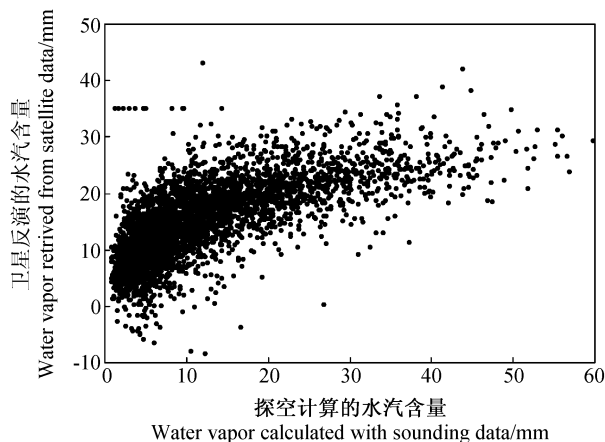


图1 卫星反演和探空计算的大气整层水汽点聚图

Fig. 1 The scatter diagram of atmospheric water vapor retrieved from satellite data and calculated with radiosonde station data

为卫星红外分裂窗通道的亮温, α 为卫星可见光通道的反照率, I_w 为卫星水汽通道的亮温。样本量为 3781, 复相关系数达到 0.70, 通过了信度 $\alpha = 0.0001$ 的 F 检验, 其检验值 $F = 1216$, 远大于 $F_{\alpha=0.0001}(33777) = 7.054$ 。卫星反演整层水汽与探空计算的水汽相比, 标准误差为 5.03, 其反演结果如图 1 所示。显然, 在整层水汽含量小时, 反演结果偏大, 而在整层水汽含量大时, 反演结果偏小, 但总体上看, 变化趋势较一致, 反演效果较好。

4 西北地区东部大气水汽分布的时空特征

4.1 气候背景

将 2002 年 6 月~2003 年 5 月的年降水量与西北地区东部 30 年平均年降水量(1971~2000)分布相比较, 降水分布趋势十分一致(图 2), 整个区域平均偏差为 30.8%。说明 2002 年 6 月~2003 年 5 月的降水与年平均降水状况基本相似, 本文选用 2002 年 6 月~2003 年 5 月期间, 基本可以反映该地区的气候特点。

4.2 大气水汽含量空间分布特征

4.2.1 垂直分布特征

从水汽垂直分布(图 3)分析表明, 西北地区东部, 850~500 hPa 层的水汽含量占了整层水汽的绝大部分。大气整层水汽含量在 2002 年 6 月~2003 年 5 月期间的平均值为 13.17 mm, 其中 850~500 hPa 层水汽含量为 11.07 mm, 占整层水汽的 84.1%。西北地区东部大气整层水汽含量还与测站的海拔高度密切相关(其实是与测站上空的大气厚度相关)。图 4 显示, 水汽随高度的分布呈指数递减, 相关系数达

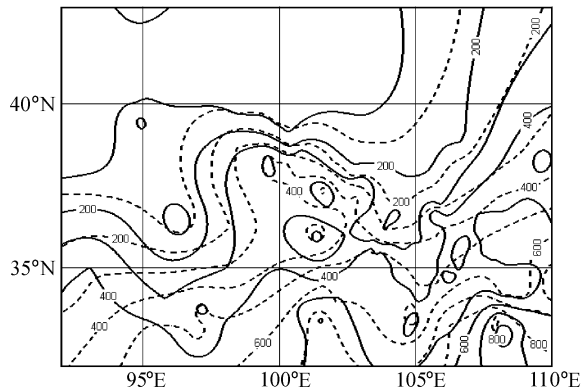


图2 西北区东部 2002 年 6 月~2003 年 5 月(实线)和 30 年(虚线)平均降水量(单位: mm)

Fig. 2 The precipitation from Jun 2002 to May 2003 (solid lines) and the 30-year average precipitation (dashed lines) over the eastern part of Northwest China (units: mm)

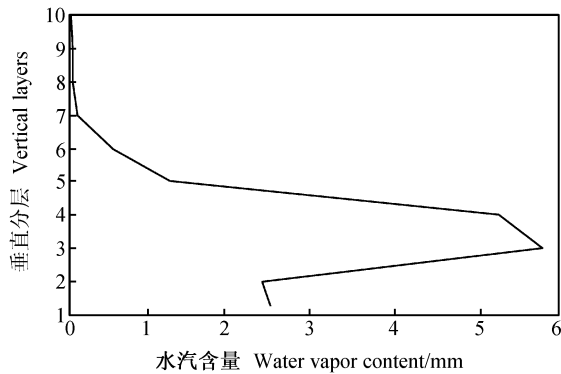


图 3 年平均水汽含量垂直分布(纵坐标 1~10 层分别为: 地面~925、925~850、850~700、700~500、500~400、400~300、300~250、250~200、200~150、150~100 hPa)
Fig. 3 The vertical profiles of annual average water vapor content. Layers 1~10 in the ordinate are respectively the ground~925, 925~850, 850~700, 700~500, 500~400, 400~300, 300~250, 250~200, 200~150, and 150~100 (units: hPa)

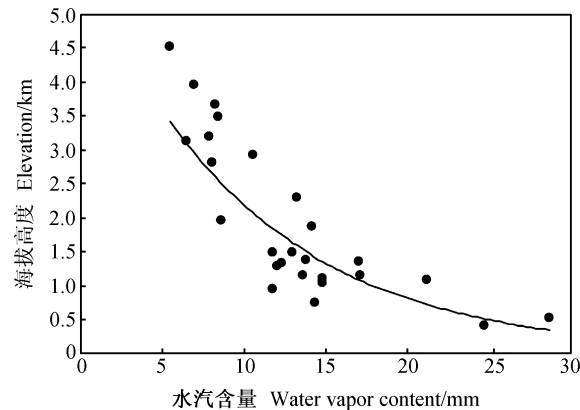


图 4 海拔高度与大气水汽含量分布关系
Fig. 4 The relationship between elevation and water vapor content of atmosphere

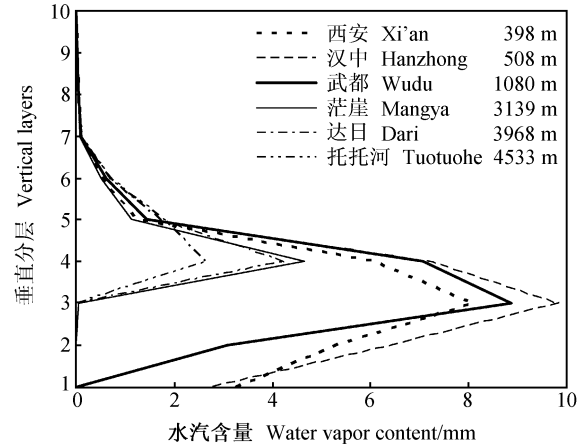


图 5 不同海拔测站年平均水汽含量垂直分布, 其余同图 3
Fig. 5 The vertical profiles of annual average water vapor content at the stations with different elevations (the vertical layers are the same as Fig. 3)

0.8637。显然, 大气层薄, 整层水汽含量自然就少。由于西北地区东部部分测站的海拔高度高, 其最大水汽含量的高度也相应抬高。分析表明(图 5), 西北地区东部海拔高度大于 1500 m 的地区, 最大水汽含量位于 700~500 hPa 层, 而低于 1500 m 的地区, 最大水汽含量位于 850~700 hPa 层。

4.2.2 水平分布特征

图 6、7 是用 GMS5 卫星反演的整层大气水汽含量。由前面的分析得知, 2002 年 6 月~2003 年 5 月的降水接近 30 年平均情况, 因此, 将图 7 的冬、夏季分布图与中华人民共和国气候图集^[6]中 1 月、7 月整层水汽含量图(图略)进行了比较, 其分布情况基本一致, 说明本反演方法可行。

卫星反演的整层大气水汽含量的分析表明, 无论是全年, 还是不同的季节, 西北地区东部大气平均含水量均呈由东南向西北方向减少的趋势, 而且分布的形状很为一致。显然, 整层大气水汽含量所呈现的这种分布特征与降水量的分布情况不是很一致, 尤其是气候干燥沙漠地区, 如巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠, 年平均大气水汽含量达 9 mm 和 12 mm, 与周边地区水汽含量相当, 但降水量却小得多。

夏季(6~8 月)大气含水量的分布(图 7)与王秀荣等^[7]的分析很一致。王秀荣等^[7]在分析西北地区夏季降水与大气水汽含量状况区域性特征时指出, 夏季西北地区东南部降水明显多于西北地区东北部, 而整层大气水汽含量则是从西北地区东北部向西南方向逐渐变小。他们根据水分平衡方程推测造成这种现象的原因是降水的大小不仅仅与本地的大气水汽含量有关, 还和水汽动力辐散辐合效应、区域性地表水汽蒸发量等因素有联系。确实, 由于西北地区东北部大部为沙漠地区, 气候干燥, 但海拔却很低, 大气柱的厚度较厚, 整层水汽含量相对就偏大。同样, 河西走廊的年平均大气水汽含量与祁连山的水汽相当, 甚至更大, 但降水量却小得多。

分析卫星反演的大气水汽含量与大气厚度的分布关系, 结果比较散乱, 显然, 不同的气候类型、不同的地表覆盖也是影响大气水汽含量的重要因素。因此, 可以认为大气水汽含量的分布, 不仅与气候条件相关(气候湿润地区大气水汽含量高), 与地形及地表覆盖类型相关(动力和热力条件不同),

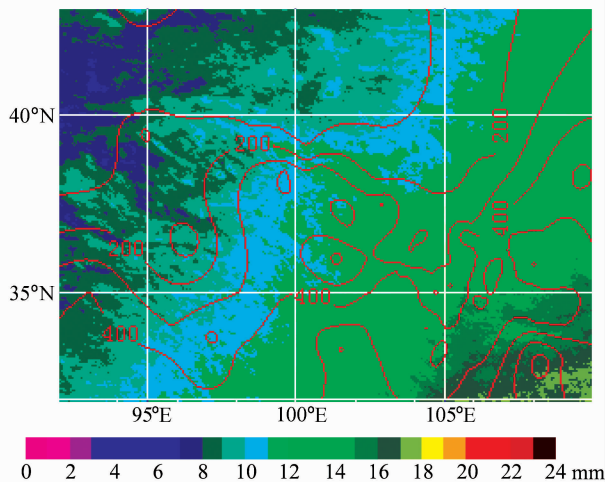


图 6 2002 年 6 月~2003 年 5 月 GMS5 卫星资料反演的平均整层大气水汽含量及同期降水量(等值线, 单位: mm)

Fig. 6 The average atmospheric water vapor content retrieved from GMS5 satellite data and precipitation (isoline, units: mm) during Jun 2002 to May 2003

还与大气厚度关联。

4.3 大气水汽含量季节分布特征

图 7 表明, 西北地区东部大气水汽含量也呈现出与降水一致的季节变化, 主要降水季节夏季的大气水汽含量最大, 达 12~24 mm, 而冬季大气水汽含量最小, 均小于 12 mm。春、秋季介于两者之间(图略), 大气水汽含量在 3~22 mm 之间。

5 2002 年 6 月~2003 年 5 月单位大气柱水汽含量时空分布特征

为考虑大气层厚度的影响, 引入单位大气柱水汽含量的概念是有益的。本文所采用的单位大气柱水汽含量, 是指对流层中单位厚度的大气柱(如 1 km)内水汽的含量(单位: mm)。从图 5 可看出, 不论测站的海拔高度多少, 大气水汽在对流层以上已减少到可忽略不计。为简便起见, 本文假定在西北地区东部对流层顶高度不随季节变化、不受地形海拔高度的影响, 按中国高空气候资料^①中西北地区东部[(32°N~43°N, 92°E~110°E) 区域内 23 个探空站]年平均对流层顶高 12790 m, 结合海拔高度资料和卫星反演的年平均大气水汽资料, 计算了 2002 年 6 月~2003 年 5 月西北地区东部年

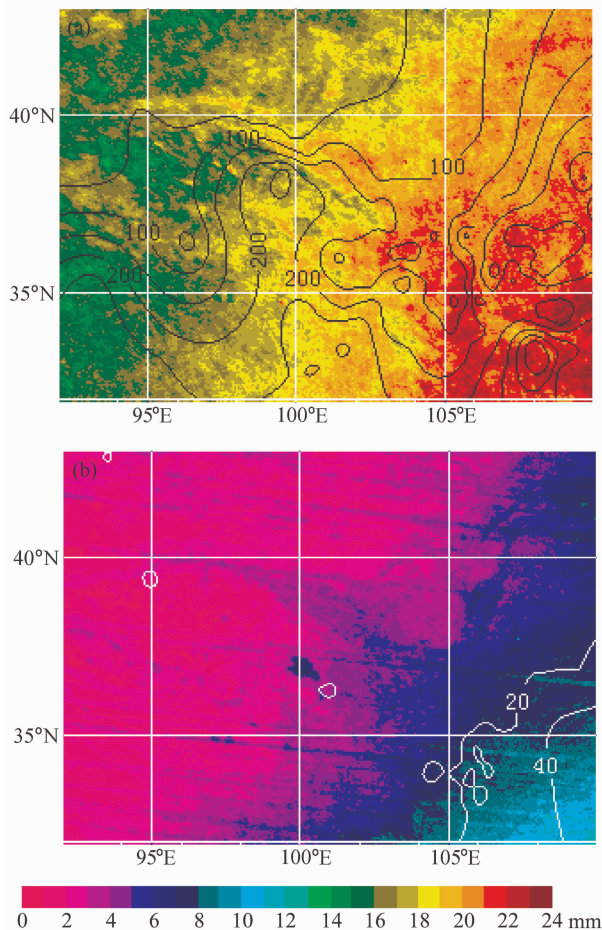


图 7 GMS5 卫星反演的夏季(6~8 月, a) 和冬季(12~2 月, b) 平均水汽含量及降水量(等值线, 单位: mm) 分布

Fig. 7 The average water vapor content retrieved from GMS5 satellite data and precipitation (isoline, units: mm) in summer (Jun-Aug, a) and winter (Dec-Feb, b)

平均单位大气柱水汽含量(图 8)。图 8 清楚显示, 单位大气柱水汽含量与同期降水量的空间分布吻合得较好。将图 8 与中华人民共和国气候图集^[6]中年降水量(图略)对比, 分布趋势比较一致, 说明平均单位大气柱水汽含量因考虑了大气层的厚度, 相对于整层水汽含量, 更能反映降水的空间分布情况。

5.1 单位大气柱水汽含量的空间分布特征

5.1.1 单位大气柱水汽含量反映降水量的分布

西北地区东部, 单位大气柱水汽含量最大的区域在青海湖南部的玛沁, 甘肃的玛曲, 四川的阿坝、松潘至陕甘交界的秦岭以南一带, 达 1.4~

① 中央气象局. 中国高空气候资料(1960~1969 年). 内部资料.

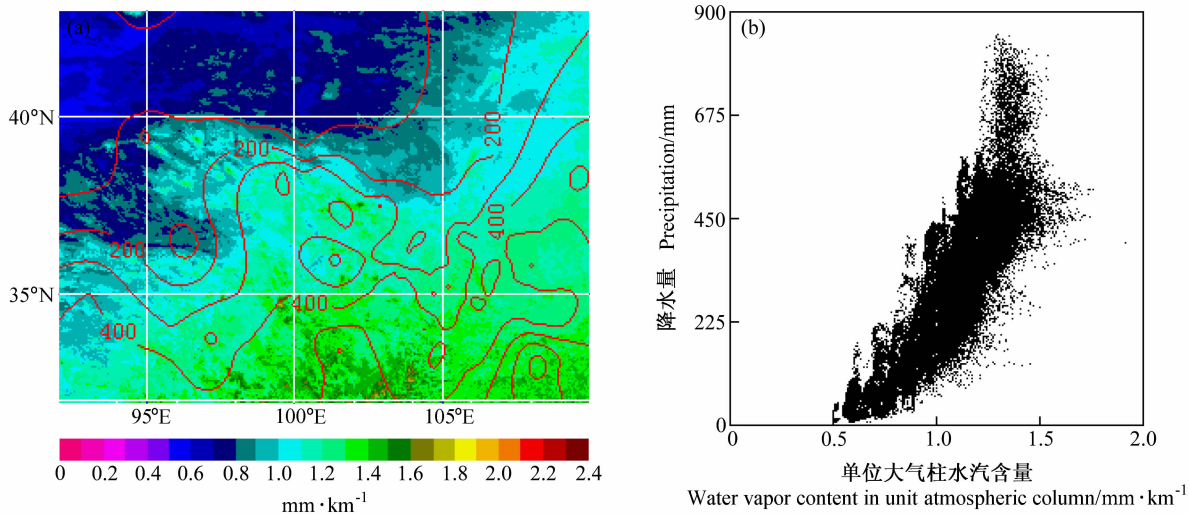


图 8 2002 年 6 月~2003 年 5 月平均单位大气柱水汽含量和降水量分布 (a, 等值线表示降水量, 单位: mm) 和点聚图 (b)
Fig. 8 The distribution (a) and the scatter diagram (b) of the average water vapor content in unit atmospheric column and precipitation during Jun 2002 to May 2003. Isolines show precipitation (units: mm) in (a)

1.6 mm/km, 该地区也是降水量较大的区域。这显然与该地区为湿地、水汽蒸发量大, 又是孟加拉湾水汽沿青藏高原东南边缘随西南气流北上的主要通道有关。气柱水汽含量较小的地区在新疆与甘肃交界的哈密至敦煌一带, 仅 0.5~0.6 mm/km, 降水量相应也较小, 该地区正好是亚洲大陆腹地降水最少的地区之一, 单位大气柱水汽含量与降水的分布较一致, 说明单位大气柱水汽含量有反映降水分布的能力。

对比图 6 和图 8, 明显看出在反映降水分布趋势方面, 单位大气柱水汽含量较整层水汽含量有一定的改进。如东部青藏高原地区 (32°N~35°N, 98°E~105°E) 与乌兰布和沙漠至库布齐沙漠一带 (39°N~43°N, 105°E~110°E) 的整层水汽含量大小相当, 但东部青藏高原地区的降水比后者大得多, 单位大气柱水汽含量的分布则与降水分布较为吻合。另外, 在祁连山中段的北坡地区, 山区的降水比河西走廊地区要大得多, 整层水汽含量在这一带变化却比较小, 单位大气柱水汽含量的分布则不然, 呈现出较大的水平梯度, 祁连山区达 1.1~1.6 mm/km, 比河西走廊地区 (普遍小于 1 mm/km) 大得多, 能更好地反映山区降水的分布情况。柴达木盆地的情况也如此, 与降水量相当的地区比较, 这一地区的整层水汽含量偏大, 而单位大气柱水汽含量的分布趋势得到了改进。

统计分析也表明, 单位大气柱水汽含量与降水量的关系较整层水汽含量与降水量的关系有所改善。2002 年 6 月~2003 年 5 月西北地区东部年平均单位大气柱水汽含量与同期降水量的相关系数为 0.88, 而整层水汽含量与降水量的相关系数仅为 0.75, 明显得到了改进。

5.1.2 单位大气柱水汽含量突出云的特性

由于单位大气柱水汽含量反映水汽的密度, 在相当程度上也反映了云的分布特性。图 9 非常清楚地显示, 在 2002 年春季, 祁连山区、昆仑山区以及

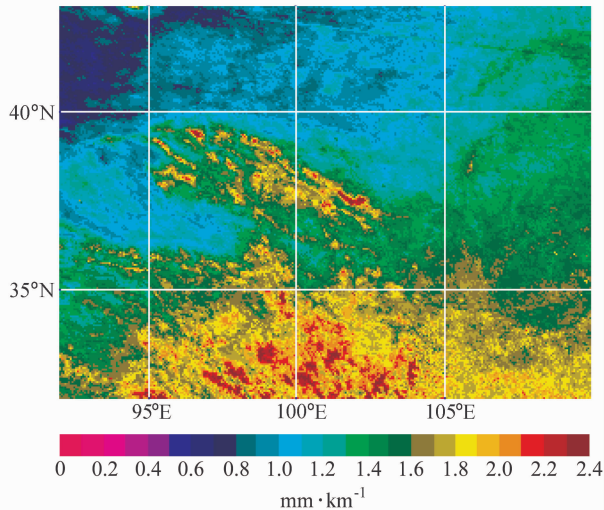


图 9 2002 年春季 (4~6 月) 单位大气柱水汽含量
Fig. 9 The water vapor content in unit atmospheric column in spring (Apr-Jun) 2002

青藏高原上,单位大气柱水汽含量较其周围地区明显偏大,说明这些地区,由于地形的作用,其云量比周围地区要多。刘洪利等^[4]和宜树华等^[5]的分析也表明,西北地区总云量的分布形势与地形吻合得较好,沿着天山-昆仑山-祁连山一线是云量的高值区,并且在天山、昆仑山、祁连山的山区,云层较厚的层云、雨层云、深对流云的总量在春、夏季比周围地区高 1 倍左右。

5.2 单位大气柱水汽含量的季节变化特征

2002 年 6 月~2003 年 5 月期间,西北地区东部单位大气柱水汽含量与降水量的变化基本一致(表 1、图 10),夏季单位大气柱水汽含量最大,降水量也最大;冬季水汽含量最小,降水量也最少;春、秋季单位大气柱水汽含量和降水量介于冬、夏季之间,其中,春季单位大气柱水汽含量相对于降水量来说偏高。刘洪利等^[4]、宜树华等^[5]和陈勇航等^①的工作也表明,西北地区多云特征在 4~6 月最显著,总的云水路径春季大于秋季,祁连山地区 6 月最大,11 月最小。这些研究说明在云水条件上,西北地区东部在春、夏季较其他季节具备更加优越的人工增雨(雪)条件。

表 1 西北地区东部单位大气柱水汽含量与降水量的季节变化

Table 1 The seasonal variations of the water vapor content in unit atmospheric column and precipitation over the eastern part of Northwest China

季节 Season	单位大气柱水汽含量 Water vapor content in unit atmospheric column / mm · km ⁻¹	降水量 Precipitation / mm
春(3~5 月) Spring (Mar - may)	1.3816695	57.731231
夏(6~8 月) Summer (Jun - Aug)	1.4407889	151.062583
秋(9~11 月) Autumn (Sep - Nov)	0.7837387	85.191687
冬(12~2 月) Winter (Dec - Feb)	0.4313395	9.824663

6 结论与讨论

(1) 西北地区东部最大大气水汽含量位于 850~500 hPa 层,其中海拔高度大于 1500 m 地区,最大水汽含量位于 700~500 hPa 层,而低于

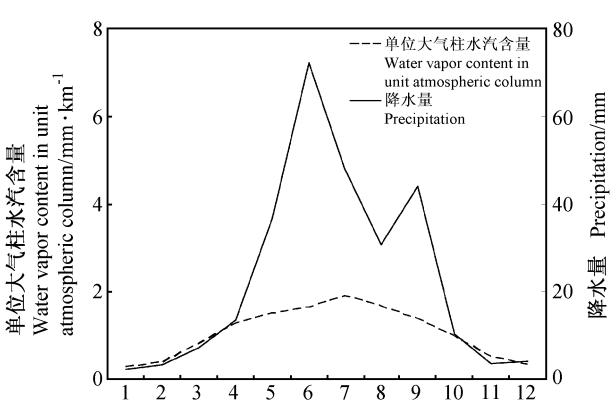


图 10 西北地区东部单位大气柱水汽含量与降水的季节变化
Fig. 10 The seasonal variations of the water vapor content in unit atmospheric column and precipitation over the eastern part of Northwest China

1500 m 地区,最大水汽含量位于 850~700 hPa 层。

(2) 整层大气水汽含量的分布,不仅与气候条件(气候湿润地区大气水汽含量高)和地形及地表覆盖类型有关(动力和热力条件不同),还与大气厚度相关联。

(3) 单位大气柱水汽含量的分布可反映降水量的分布,在一定程度上还突出了地形云的分布,对卫星资料反演降水有指示意义。

(4) 在云水条件上,西北地区东部具备了较好的实施人工增雨(雪)的条件,尤其在春、夏季,实施人工增雨(雪)的云水条件更加优越。

(5) 由于资料所限,本文在建立大气水汽的反演模式时没有区分晴空区和云区,也没有按季节分别建立卫星反演大气水汽模式。今后的研究将考虑这些因素,以提高反演精度。

参考文献 (References)

[1] 李成才,朱元竞. 利用 GMS5 红外分裂窗数据反演水汽的应用研究. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(1): 33~39
Li Chengcai, Zhu Yuanjing. The applied study on retrievals of precipitable water from the GMS-5 "Split Window". *Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 1998, 34(1): 33~39

[2] 江吉喜,范梅珠. 青藏高原夏季 TBB 场与水汽分布关系的初步研究. 高原气象, 2002, 21(1): 20~24
Jiang Jixi, Fan Meizhu. A primary study of the relationship

① 陈勇航,黄建平,陈长和,等. 中国西北地区空中云水资源的时空分布特征. 高原气象,待发表

between TBB fields and water vapor distribution over Qinghai-Xizang Plateau in summer. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2002, **21**(1): 20~24

[3] 朱民, 郁凡, 郑维忠, 等. 卫星反演湿度场及其在暴雨预报中的初步应用分析. *气象学报*, 2002, **58**(4): 470~478
Zhu Min, Yu Fan, Zheng Weizhong, et al. The study of preliminary application of satellite-derived relative humidity in rainstorm forecast. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **58**(4): 470~478

[4] 刘洪利, 朱文琴, 宜树华, 等. 中国地区云的气候特征分析. *气象学报*, 2003, **61**(4): 466~473
Liu Hongli, Zhu Wenqin, Yi Shuhua, et al. Climatic analysis of the cloud over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61**(4): 466~473

[5] 宜树华, 刘洪利, 李维亮, 等. 中国西北地区云时空分布特征的初步分析. *气象*, 2003, **29**(1): 7~11

Yi Shuhua, Liu Hongli, Li Weiliang, et al. Spatial and temporal distributions of cloud over northwest of China. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2003, **29**(1): 7~11

[6] 《中华人民共和国气候图集》编委会. 中华人民共和国气候图集. 北京: 气象出版社, 2002. 148pp
Editorial Committee for Climatological Atlas of the People's Republic of China. *Climatological Atlas of the People's Republic of China* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2002. 148pp

[7] 王秀荣, 徐祥德, 苗秋菊. 西北地区夏季降水与大气水汽含量状况区域性特征. *气候与环境研究*, 2003, **8**(1): 35~42
Wang Xiurong, Xu Xiangde, Miao Qiuju. Regional characteristics of summer precipitation and water vapor amount in Northwest China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8**(1): 35~42