

文章编号:1671-5942(2014)05-0139-05

北极黄河站区 GPS 可降水量的特征分析^{* 1}

赵 云^{1,2)} 张胜凯¹⁾ 鄂栋臣¹⁾ 徐优伟¹⁾ 雷锦韬¹⁾ 左耀文¹⁾

(1) 武汉大学中国南极测绘研究中心, 武汉 430079)
(2) 济南市勘察测绘研究院, 济南 250013

摘 要 利用 GPS 遥感的可降水量、气象数据、探空数据及降雪资料, 分析中国北极黄河站区的可降水量特征, 得出可降水量与地面水汽压的转换模型; 分析可降水量、露点温度差、水汽压在强降雪天气中的变化特征, 研究强降雪天气过程中的探空层结构, 有助于利用 GPS 可降水量预报雨雪天气。

关键词 黄河站; 可降水量; 气象元素; 降雪; 探空层

中图分类号: P228.42

文献标识码: A

ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF GPS PRECIPITABLE WATER VAPOR IN ARCTIC YELLOW RIVER STATION

Zhao Yun^{1,2)}, Zhang Shengkai¹⁾, E Dongchen¹⁾, Xu Youwei¹⁾, Lei Jintao¹⁾ and Zuo Yaowen¹⁾

(1) Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan 430079)
(2) City Exploring and Surveying Institute of Jinan, Jinan 250013

Abstract The precipitable water vapor(PWV) reflects the total amount of water vapor of the atmosphere along the zenith direction, it is closely related to meteorological factors. The change of PWV shows a kind of regularity in the process of snowfall weather. Based on the consideration, a conversion model of PWV and ground water vapor pressure was established to analyze characteristics of PWV in Arctic Yellow River station of China with the data of GPS remote sensing PWV, meteorological data, sounding data and snowfall data. The results show that the PWV from GPS technique can be used to precast snowstorm process.

Key words: Yellow River station; precipitable water vapor; meteorological elements; snowfall; sounding layer

水汽在大气中含量很少, 却扮演着十分重要的角色^[1]。在地基 GPS 气象学理论的支撑下, 国外学者开展了 GPS/PWV 对数值天气预报的同化应用研究^[2-3], 也分析了下坡风可降水的变化情况^[4]; 国内学者对不同地域、不同时间的中小尺度可降水量特征进行了揭示^[5-11], 并对长时间序列不同气候类型的 GPS 可降水量进行了比较分析^[12-13], 得出一系列

研究成果。

北极黄河站位于挪威斯匹次卑尔群岛的新奥尔松地区, 是我国在北极地区建立的唯一的科学考察站。由于受流经群岛的北大西洋暖流影响, 考察站区全年的降雨降雪较为频繁, 给科考活动带来很大不便。为进一步研究可降水量的时变特性及其在雨雪天气中的变化特征, 本文选取黄河站 2010 年的气

* 收稿日期: 2013-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41176173, 41274011); 国家重大科学研究计划项目(2012CB957701; 2013CBA01804); 南北极环境综合考察及资源潜力评估项目(CHINARE2013, 2014)。

作者简介: 赵云, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为 GPS 气象学。E-mail: zy189418@163.com。

通讯作者: 张胜凯, 男, 1977 年生, 副教授, 主要研究方向为极地大地测量学与冰川动力学。E-mail: zskai@whu.edu.cn。

象数据、实际降水降雪数据及 GPS 可降水量,从三者的对比分析中得出可降水量与地面气象元素及实际降水、降雪的关系,从而为短时天气预报和户外科学考察提供必要的参考。

1 GPS 遥感可降水量的计算

采用黄河站 GPS 常年跟踪站 2010 年所测得的 GPS 数据与周边 9 个 IGS 站进行联测解算。9 个 IGS 站的详细信息见表 1。

表 1 参与 GPS 解算的 9 个 IGS 站详细信息
Tab.1 The detail information of 9 IGS stations used in GPS calculation

站点名称	纬度	经度	国家	建站日期
RESO	74°41'27"N	94°53'37"W	加拿大	2000-08-05
THU3	76°32'13"N	68°49'30"W	丹麦	2001-09-01
SCOR	70°29'7"N	21°57'1"W	丹麦	2004-09-07
HOFN	64°16'2"N	15°11'53"W	冰岛	1997-05-27
MORP	55°12'46"N	1°41'8"W	英国	1996-10-31
NYAL	78°55'47"N	11°51'54"E	挪威	1993-01-01
TRO1	69°39'46"N	18°56'23"E	挪威	1997-05-31
NRIL	69°21'43"N	88°21'35"E	俄罗斯	2000-09-17
TIXI	71°38'4"N	128°51'59"E	俄罗斯	1998-10-08

使用的数据处理软件为 GAMIT/GLOBK,其参数设置见表 2。

表 3 2010 年基线重复性统计结果
Tab.3 Statistical results of baseline repeatability in the year of 2010

时间	南北方向精度	东西方向精度	垂直方向精度	基线长精度
2010	5.2 mm + 0.818 9 × 10 ⁻⁹	7.1 mm + 0.258 1 × 10 ⁻⁹	7.2 mm + 3.139 7 × 10 ⁻⁹	2.6 mm + 0.815 6 × 10 ⁻⁹

若将无线电探空计算的可降水值视为真值,则本文实验中 GPS 反演的可降水量精度能够优于 2 mm。2010 年 7~9 月黄河站、NYAL 和 NYA 气象站的可降水值(由于黄河站缺少数天观测数据,因此有效样本数为 85 个;而探空观测每天只进行一次,因此将 GPS 计算值与探空值进行插值处理)见图 1。

从整体趋势上看,三者的走势保持一致,但黄河站计算的可降水量总体上大于探空计算值,而 NYAL 站计算的可降水量则小于探空计算值。

将无线电探空计算的可降水值视为真值,则黄河站和 NYAL 与探空值的误差统计结果见表 4。从统计结果可知,CNYR 与 NYAL 计算 PWV 值均达到了较高的精度,其标准差优于 2 mm。

2 可降水量与地面气象元素的关系

可降水量 PWV 反映的是大气天顶方向的水汽总量,它与测站的气象元素之间有着紧密的联系。

表 2 GAMIT 解算参数设置 Tab.2 Parameter setting of GAMIT calculation	
参 数	取 值
模糊度解算	LC_ANTCLN
基线解类型	BASELINE
截止高度角	15°
数据采样间隔	30 s
卫星轨道	IGS 精密星历
参考框架	ITRF2008
对流层参数估计	分段线性,间隔 0.5 h
对流层改正模型	Saastamoinen
映射函数	VMF1
固体潮	IERS2003
大洋载荷	FES2004

基线解算完成之后,2010 年全年基线解算结果 O 文件中的均方根误差集中在 0.18 左右,继而以基线重复性为观测值,用线性拟合求出重复性的固定误差和比例误差,见表 3。由统计结果可知,基线重复性均达到 10⁻⁹ 量级,满足高精度 GPS 数据处理的要求。

为了验证黄河站(CNYR)可降水量解算结果的可靠性,本文计算了距离黄河站 1 700 m 的 IGS 站 NYAL 的可降水量,同时也收集了距离黄河站 414 m 处的 Koldwey 气象站的数据,计算无线电探空的可降水值。

在自动气象站所获取的气象元素中,与可降水量关系最为密切的就是水汽压和相对湿度。水汽压表示的是大气压强中水汽的分压强,其数值大小表征着

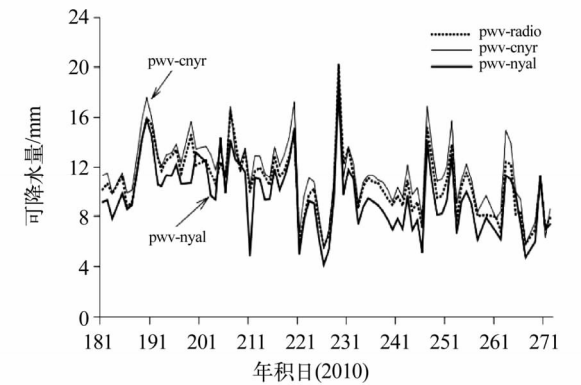


图 1 2010 年 7~9 月 CNYR、Koldwey 气象站和 NYAL 可降水量的比较

Fig. 1 Comparison of PWV in CNYR, Koldwey weather station and NYAL during 7-9, 2010

表 4 CNYR、NYAL 和探空计算 PWV 值的对比

Fig. 4 Comparison of PWV calculated with CNYR、NYAL and radiosonde method

	样本数	平均绝对 误差/mm	标准差 /mm	相关系数
PWV_CNYR-Radio	85	0.865 5	1.025 2	0.969 8
PWV_NYAL-Radio	85	1.282 4	1.497 8	0.936 3

蒸发的快慢。在一定温度下,空气中的水汽压增大到某一数值时就会有水汽凝结成液态水,这一极限值称为该温度下的饱和水汽压。相对湿度表示的是空气接近饱和的程度,数值上等于水汽压与该温度下饱和水汽压的比值。相对湿度不仅是温度的函数,同时也与大气中的水汽含量相关。

Koldwey 自动气象站位于黄河站附近,由德国 AWI 于 1991 年 8 月建立,除进行常规地面气象元素和近地面辐射的有线遥测外,还进行无线电探空观测,其气象观测数据和探空数据可从全球气候变化组织的 ftp 服务器上下载(ftp.bsmn.awi.de)。

选取 2010 年全年黄河站可降水量、地面水汽压和相对湿度的结果绘制成图 2。从图 2 可知,纵观全年统计结果,可降水量和地面水汽压变化较大,谷值和峰值较为明显,而相对湿度的变化则较为平缓,在 70% 上下波动。从曲线特征看,可降水量与地面水汽压符合得很好,整体走势相同,且高低值依时间序列而相互对应,因此可以通过水汽压的变化来判断可降水量的变化情况;而可降水量与相对湿度的匹配程度稍差,主要体现在相对湿度接近

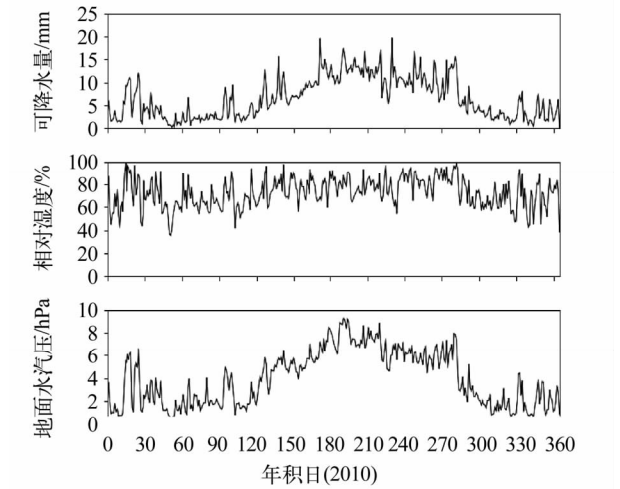


图 2 2010 年黄河站可降水量与相对湿度、地面水汽压的关系

Fig. 2 The relationship of PWV with relative humidity and ground water vapor pressure in Yellow River station in 2010

100% 时变化不明显,只在峰值附近小幅波动,此时与可降水量的符合程度较差,相对湿度数值较小时与可降水量符合较好。

为进一步分析可降水量与地面水汽压、相对湿度的定量关系,绘制出可降水量与地面水汽压、相对湿度的散点图(图 3、4)。

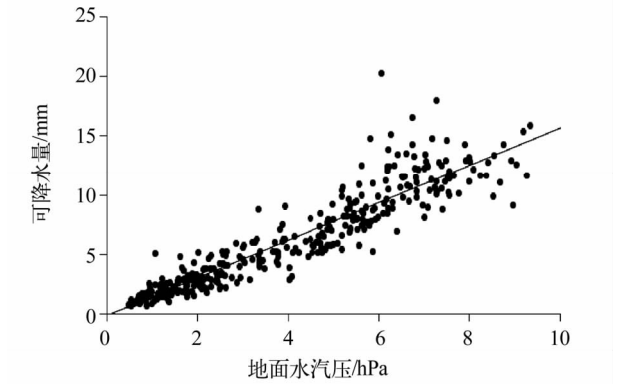


图 3 黄河站可降水量与地面水汽压的散点图

Fig. 3 The scatter of PWV and ground water vapor pressure in Yellow River station

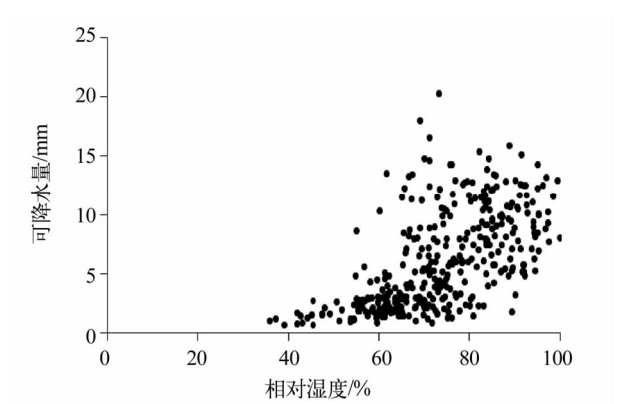


图 4 黄河站可降水量与相对湿度的散点图

Fig. 4 The scatter of PWV and relative humidity in Yellow River station

由图 3 可知,可降水量与地面水汽压的散点大致集中在一条直线附近,呈现较好的线性关系;由图 4 可知,可降水量与相对湿度的散点分布不均匀,无明显的线性关系。

为求出可降水量(PW)与地面水汽压(ES)的线性关系式,分别将两组数据导入 MATLAB,用线性回归方法得出两者的线性表达式为: $PW = -0.164\ 8 + 1.583\ 1\ ES$ 。以地面水汽压(ES)数值为自变量代入线性表达式,将求得的结果与探空计算的可降水量进行对比,得到两者的统计结果见表 5。

从统计结果可知,两者差值较小,相关性较强,从而验证了此线性表达式的精度。在缺少探空数据或者 GPS 观测值的情况下,利用地面水汽压就可以估算出整层大气可降水量,故此方法可以作为 GPS

遥感水汽缺测时的有益补充。

表 5 PWES 线性表达式与 PWV 真值的对比
Tab.5 Comparison of the linear formula of PWES and PWV true values

	样本数	平均绝对 误差/mm	标准差 /mm	相关系数
PWES 线性 表达式-PWV	365	1.032 1	1.531 6	0.927 0

3 可降水量对实际降雪的指导意义

为了便于分析,选取 2010 年黄河站 2 次强降雪天气过程(定义标准为 24 h 降雪量≥5 mm 或者 12 h 降雪量≥3 mm),此外还包括气象观测资料、逐时对应的 GPS 可降水量及探空资料等。2 次降雪过程的详细信息见表 6。

表 6 2010 年黄河站 2 次强降雪天气过程
Tab.6 2 severe snowfall weather process in Yellow River station in 2010

时间	过程降雪 量/mm	降雪时间
2010-01-19 ~ 01-22	18	19 日清晨 ~ 20 日中午, 21 日傍晚 ~ 22 日清晨
2010-03-06 ~ 03-07	26.7	6 日清晨 ~ 7 日清晨

由 § 2 可知,可降水量与水汽压变化趋势呈良好的正相关,而降雪与水汽压之间有何关联,是需要探讨的问题。露点温度是空气在水汽含量和气压都不变的条件下冷却到饱和时的温度,形象地说,就是空气中的水蒸气变为露珠时候的温度。由图 3 可知,降水发生时相对湿度保持在较高数值且变化不明显,因此露点温度差可以更好地用来表征空气距离饱和的程度。

首先分析 2010-01-19 ~ 22 的强降雪过程。根据 GPS 反演的可降水量、实际降水和气象观测数据,得到可降水量与月平均可降水量、水汽压、露点温度差的关系,见图 5。

从实际降雪资料可知,最早的降雪发生在 19 日清晨,此时可降水量刚刚达到一个峰值并迅速下降;降雪过程从 19 日清晨一直持续到 20 日中午,此时可降水量从峰值下降到月平均可降水量附近,稳定一段时间后继续下降到最低值;20 日中午到 21 日傍晚降雪出现空歇期,此时可降水量在最低值附近稳定,并开始缓慢上升;21 日傍晚又有一次降雪过程,并持续到 22 日清晨,此时可降水量从月平均值附近开始上升直到峰值。

露点温度差和水汽压对强降雪天气也有明显的

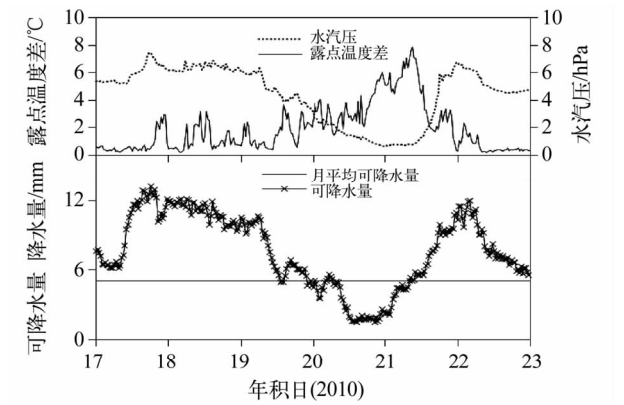


图 5 2010-01-17 ~ 22 黄河站可降水量与月平均可降水量、水汽压、露点温度差变化曲线
Fig. 5 The curve of PWV、monthly average PWV、ground water vapor pressure and dew point temperature difference in Yellow River station during January 17th ~ 22th, 2010

反映。19 日清晨降雪发生之前,露点温度差出现了多次小幅波动,但数值维持在 4℃ 以下,此时可以理解为强降雪发生之前湿度变化较大,有明显的水汽输送过程;20 日中午降雪结束之后,露点温度差迅速上升并达到峰值;20 日中午到 21 日中午的降雪间隙期间,露点温度差保持在 4 ~ 8℃ 的较高数值;21 日傍晚降雪开始,此时露点温度差已经降到谷值;21 日傍晚到 22 日清晨的降雪过程中,露点温度差有小幅波动,并持续下降到 1℃ 以下。强降雪过程中,水汽压的变化趋势与露点温度差正好相反,19 日清晨降雪发生之前水汽压一直维持在较高数值,降雪开始后水汽压迅速下降;20 日中午到 21 日中午的降雪间隙,水汽压始终维持在较低的数值;21 日傍晚降雪开始,水汽压迅速上升并达到峰值;22 日清晨降雪结束,水汽压缓慢下降并维持在较高数值。

再分析 2010-03-06 ~ 07 的强降雪过程,可降水量与月平均可降水量、水汽压、露点温度差的关系见图 6。

从实际降雪知,降雪发生于 3 月 6 日清晨(年积日 65),持续到 3 月 7 日(年积日 66)清晨,降雪开始时可降水量迅速上升,到达峰值后出现小幅波动,3 月 7 日清晨降雪结束之后可降水量迅速下降;露点温度差在降雪开始时已经处于一个较低值,降雪过程中还在缓慢下降,3 月 7 日清晨降雪结束之后开始小幅波动并上升;水汽压的变化与露点温度差的变化相反,与可降水量的变化趋势相似,差别只在于 3 月 7 日清晨降雪结束之后水汽压的下降幅度稍小。

为了研究强降雪天气过程中的探空层结构,选

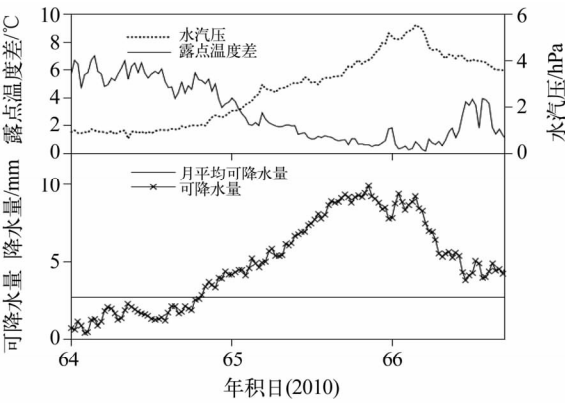


图 6 2010-03-05 ~07 黄河站可降水量与月平均可降水量、水汽压、露点温度差变化曲线

Fig. 6 The curve of PWV, monthly average PWV, ground water vapor pressure and dew point temperature difference in Yellow River station during Mar 5th ~ 7th, 2010

择 2010-01-20、03-06 和 11-28 的探空数据进行对比研究,这 3 d 的降雪量分别为 6、20、13.3 mm,图 7 为 3 次强降雪天气过程中的露点温度差和水汽压随高度变化的探空层曲线图。

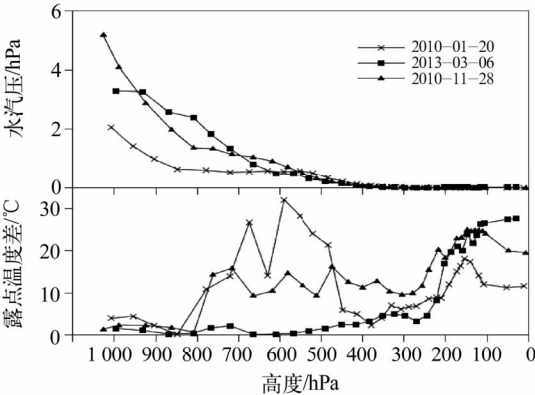


图 7 2010 年黄河站 3 次强降雪天气过程的探空层曲线

Fig. 7 The curve of sounding layer of process in severe snowfall weather in Yellow River station during Mar 5th ~ 7th, 2010

由图 7 可知,3 次强降雪过程中探空层结构有共同点:降雪过程中水汽压 85% 集中在高度为 600 hPa 以下的大气中,高层大气中水汽压近乎为 0;露点温度差低层小、高层大,低层露点温度差大多 < 5 °C。3 次强降雪过程中的探空层结构的不同之处体现在露点温度差的数值在大气中层的区别,从降雪量的大小来看,雪量最大的为 2010-03-06,其露点温度差曲线表现为中低层很小,高层较大;而雪量最小的为 2010-01-28,其露点温度差曲线表现为低层很小、中层最大、高层较大;2010-10-28 的降雪量介于两者之间,而露点温度差曲线在大气中层的数值

也是介于两者之间。露点温度差越小,表明空气越接近饱和、空气湿度越大,越容易凝结成水汽或者降雪。因此我们可以得出,中低层湿度越大、湿层大气的层顶越高,越有利于强降雪天气的出现。

4 结 论

- 1) 通过分析可降水量与水汽压、相对湿度的关系,得出了可降水量与地面水汽压的线性关系式为 $PW = -0.1648 + 1.5831 ES$,可降水量与相对湿度之间无对应的线性关系。
 - 2) 利用黄河站 2010 年 2 次强降雪天气过程的气象资料,并结合探空数据和 GPS 数据,分析得到了可降水量、露点温度差、水汽压在强降雪天气中的变化特征。结果显示,强降雪天气中水汽压与可降水量变化趋势相同,与露点温度差变化趋势相反,水汽压在强降雪天气中数值较高,而此时露点温度差的数值低,在谷值附近波动,强降雪天气结束后,可降水量有一个回落过程。
 - 3) 分析强降雪天气过程中的探空层结构,结果表明,中低层湿度越大,湿层大气的层顶越高,越有利于强降雪天气的出现。
- 由于水汽变化的复杂性,目前尚不能单独使用 GPS 可降水量对雨雪天气作出准确预测,必须将 GPS 可降水量同化到数值天气预报中。

参 考 文 献

- 1 李国平. 地基 GPS 遥感大气可降水量及其在气象中的应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2007. (Li Guoping. On the remote sensing of precipitable water vapor using ground-based GPS technique and applications in meteorology[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2007)
- 2 Boniface K, Champollion C, Chery J, et al. Potential of shipborne GPS atmospheric delay data for prediction fo Mediterranean intense weather events[J]. Atmos Sci Let, 2012, 13 (4): 250 – 256.
- 3 Cucurull L. Sensitivity of NWP model skill to the obliquity of the GPS radio occultation soundings[J]. Atmospheric Science Letters, 2012, 13 (1): 55 – 60.
- 4 Suparta W. Detection of a katabatic wind event with GPS meteorology measurements at Scott Base Antarctica[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2012, 115 (3 – 4): 153 – 162.
- 5 Sui X, Wu F, Zhao Y. Extreme weather monitoring using GPS radio occultation technique preliminary result from 2010 Yunnan drought analysis[C]. Advances in Computational Environment Science, 2012.