

Atmospheric Vapor Transportation Using GPS

CHANG Liang¹, HE Xiufeng²

Institute of Satellite Navigation and Spatial Information System of Hohai University, Nanjing, China

e-mail: 1. changliang@hhu.edu.cn, 2. xfhe@hhu.edu.cn

Abstract: Atmospheric vapor transportation, which is one of the most important steps of the hydrological cycle, is the flow of water from an area with transportation to another area or from low altitude to high altitude. It can be evaluated by Radiosonde. However, the atmospheric vapor transportation of mesoscale and small scale systems, the spatial scales of which is less than 100km, can't be detected by Radiosonde due to its sparse distribution. To avoid this limitation, the ground GPS technique is used to study the atmospheric vapor transportation. The methods to remote sense the Precipitable Water Vapor (*PWV*) and Slant Water Vapor (*SWV*) are discussed respectively. At the juncture of Kansas State and Oklahoma State of the United States, the atmospheric vapor is analysed with the data of SuomiNet, which is funded by National Science Foundation (NSF). In order to remove the influence of satellite elevation and different paths, Vertical Slant-path Water Vapor (*VSWV*) is obtained by mapping *SWV* into the zenith direction. The temporal distribution of *VSWV* is analyzed and compared with the horizontal distribution of *PWV*. And the gradient of *PWV* and the water vapor flux are analyzed to discuss their coherence during the windless weather. The results reveal that *PWV* can help to the research in atmospheric vapor transportation, and *SWV* can reflect the distribution of the atmospheric vapor better than *PWV*. Furthermore, compared with sparse Radiosonde site, ground GPS can depict the atmospheric vapor transportation of mesoscale and small scale systems more clearly.

Keywords: ground GPS; atmospheric vapor transportation; *PWV*; *SWV*

基于GPS的大气水汽输送特征研究^{*}

常亮¹, 何秀凤²

河海大学卫星空间及信息应用研究所, 江苏南京, 210098

e-mail: 1. changliang@hhu.edu.cn, 2. xfhe@hhu.edu.cn

摘要: 水汽输送是大气中的水分随着气流从一个地区输送到另一个地区或由低空输送到高空的现象, 是水文循环的一个重要环节。探空网可以用来探测水汽输送特征, 然而, 传统的探空站网点稀疏, 不能捕捉空间尺度小于 100km 的中小尺度天气的水汽输送变化。针对这一缺陷, 本文利用地基 GPS 技术来探讨大气水汽输送特征。介绍了地基 GPS 遥感可降水量 (Precipitable Water Vapor, *PWV*) 和倾斜路径方向大气水汽总量 (Slant Water Vapor, *SWV*) 的方法。利用美国国家科学基金会 (National Science Foundation, NSF) 资助的 SuomiNet 网的部分站点资料, 计算了美国 Kansas 州和 Oklahoma 州交界处不同空间方位上的水汽观测结果。结合美国环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 和美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 联合发布的 6 h 再分析资料集计算本文试验区域内的水汽通量, 并与 *PWV* 梯度场进行比较。最后把 *SWV* 映射到天顶方向, 得到了消除卫星仰角或路径影响的分量 *VSWV* (Vertical Slant Water Vapor), 分析了各 GPS 站点对不同卫星方向的 *VSWV* 随时间的变化情况, 并与不同时段的 *PWV* 水平分布进行比较。结果表明, *PWV* 对水汽输送的研究有一定的参考价值; 与 *PWV* 相比, *SWV* 更能反映真实大气水汽分布; 相对于稀疏的探空网, 地基 GPS 更能反映中小尺度天气的水汽输送特征。

关键字: 地基GPS; 水汽输送; *PWV*; *SWV*;

1 引言

随着全球气候变暖, 各种极端天气频繁出现, 严重影响着人类的生产生活。大气的输送造成海洋和陆

地不同区域之间大量的水汽交换, 且水汽输送及其辐合、辐散的变化直接影响到区域旱涝的发生。因此, 探讨大气水分循环中的水汽输送, 对研究区域旱涝异常具有重要意义^[1]。常规的大气观测手段的时空分辨率较低, 使得我们对全球水汽场和水汽能量循环还缺乏详尽的了解。目前水汽输送的研究主要依靠常规的

^{*}基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50539110); 河海大学自然科学基金资助项目(2008428111).

探空网来提供, 而探空站之间的间距在 200-300km 以上, 且观测间隔达 12 小时, 远不能满足监测和预报中小尺度灾害天气的需要^[2]。

近年来, 随着 GPS 观测精度的提高及相关技术的发展, 人们着手于研究利用 GPS 的观测来探测地球大气的方法^[3]。1992 年, Bevis^[4]等提出了用地面 GPS 测量水汽的一种方法, 使得这一技术迅速得到广泛关注, 逐渐形成一门新的交叉学科——GPS 气象学 (GPS Meteorology, GPS/MET)。

地基GPS/MET可以获得高时间分辨率的 *PWV*, 从而可以监测大气水汽的输送和研究水汽在干湿季节及过渡性季节的日变化周期^[5]。但是, *PWV*时间序列只能反映站点上空的一维气柱总量的水汽变化信息, 而大气水汽输送更多需要水汽的三维分布。Davis^[6]等人发现测站上空的仰角为 30° 时, 微波辐射计 (Water Vapor Radiometer, WVR) 观测到的水汽分布在不同方位上存在着 20% 的变化, 显然, GPS *PWV*不能给出水汽的这种空间变化信息。利用地基 GPS/MET 还可以遥感 *SWV*, *SWV* 表示接收机和可见卫星之间倾斜路径上的可降水量, 利用它可进一步通过层析获得水汽空间分布^[7]。

SuomiNet 是由 NSF 和合作高校资助, 致力于大气研究和教育的实时 GPS 网络。其得出的 GPS 水汽数据将有助于推进对中尺度模式、数据同化、恶劣天气、降水、云动力学、区域气候和水文学的研究^[8]。

本文将介绍地基 GPS 遥感 *PWV* 的基本原理, 利用 *SuomiNet* 部分站点的数据进行试验研究, 并结合测站附近的 Radiosonde 的数据, 探讨 *PWV* 的遥感精度。宋淑丽^[2]提出了基于非差估计的直接计算 *SWV* 的方法, 这种方法的优点是时空分辨率高, 可获得的水汽分辨率与 GPS 数据采样频率相当, 但这种方法需要精确的接收机钟和卫星钟估算, 实时处理困难, 而时效性在气象上又是非常重要的^[9]。本文采用双差相对定位原理, 以梯度项和后处理的残差项模拟大气非均匀成分, 进而反演出倾斜路径方向的水汽总量。为消除卫星仰角或路径对 *SWV* 的影响, 把 *SWV* 映射到天顶方向, 得到的分量称为 *VSWV*^[10]。分析了各 GPS 站点对不同卫星方向的 *VSWV* 随时间的变化情况, 并与不同时段的 *PWV* 水平分布进行比较。结果表明, *SWV* 比 *PWV* 更能反映真实大气水汽分布, *SWV* 能表征大气水汽在水平方向的输送方向, 在大气输送的研究上具有一定的参考价值。

2 地基 GPS 遥感水汽的原理

2.1 地基 GPS 遥感 *PWV* 的原理

GPS 信号在地球大气的传播过程中会受到中性大

气层和电离层的延迟影响, 而电离层延迟部分可以利用电离层的弥散特性通过双频接收机来消除 99% 的影响^[11]。1997 年, Ware 等^[12]在研究削弱信号延迟对 GPS 定位的影响时发现, 利用 GPS 探测的对流层水汽含量结果与 WVR 观测到的水汽含量结果相当。因此, 可以用 GPS 对中性大气层所含水汽含量进行探测。

GPS 信号传播路径的中性大气层延迟可以表示如下:

$$\begin{aligned}\Delta s &= 10^{-6} \int_s N ds \\ &= 10^{-6} \int_s N_h(P) ds + 10^{-6} \int_s N_w(T, e) ds \\ &= SHD + SWD\end{aligned}\quad (1)$$

式(1)中, 中性大气折射率 *N* 可分为静力学大气折射率 *N_h* 和湿大气折射率 *N_w* 两部分, *N_h* 为地表大气压强 *P* 的函数, *N_w* 为地表温度 *T* 和水汽压 *e* 的函数。SHD 为静力学延迟, SWD 为湿延迟, 它们与天顶静力学延迟 (Zenith Hydrostatic Delay, *ZHD*) 和天顶湿延迟 (Zenith Wet Delay, *ZWD*) 的关系为:

$$SHD = ZHD m_h(\theta) \quad (2)$$

$$SWD = ZWD m_w(\theta) \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, *m_h(θ)* 和 *m_w(θ)* 分别为静力学投影函数、湿投影函数, *θ* 为高度角。常用的投影函数有 GMF, Niell, Ifadis, Herring 等。

当地面气压精确已知时, *ZHD* 可以用下式精确测定^[13]:

$$ZHD = (2.2779 \pm 0.0024) \frac{P_s}{f(\Phi, h)} \quad (4)$$

$$f(\Phi, h) = 1 - 0.00266 \cos(2\Phi) - 0.00028h \quad (5)$$

式(4)和式(5)中, *Φ* 为地理纬度, *h* 为测站海拔高度 (km), 地面气压 *P_s* 的单位为 hpa, *ZHD*、*ZWD* 的单位为 mm。

求出 *ZHD* 后, 剩下的 *ZWD* 虽然是很小一部分, 但是它变化显著, 难以模型化。*ZWD* 和可降水量 *PWV* 的关系为:

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (6)$$

Π 为转换系数, 数值一般较小, 大约在 0.15 左右。其计算公式为:

$$1/\Pi = 10^{-6} (K_2 + K_3/T_m) R_v \quad (7)$$

式(7)中, T_m 为大气加权平均温度, K_2' 、 K_3' 、 R_v 均为常数。

$$R_v = 461.495 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (8)$$

$$K_2' = 22.13 \pm 2.2 \text{ K/Pa} \quad (9)$$

$$K_3' = (3.739 \times 10^5 \pm 0.012) \times 10^5 \text{ K}^2 / \text{hPa} \quad (10)$$

$$T_m = \frac{\int (e/T) dh}{\int (e/T^2) dh} \quad (11)$$

Bevis 等^[4]利用多年的探空仪数据推出了适合中纬度地区 T_m 与地表温度 T_s 的线性回归公式:

$$T_m = 70.2 + 0.72T_s. \quad (12)$$

2.2 地基 GPS 遥感斜路径方向水汽含量(Slant Water Vapor, SWV)的原理

本文采用双差相对定位原理, 以梯度项和后处理的残差项模拟大气非均匀成分, 进而反演出倾斜路径方向的水汽总量。

SWV 可以认为由两部分组成^[14], 一是各向同性部分, 即天顶方向总水汽量 PWV; 另一部分则是各向异性部分的水汽, 即 SWV 对各向同性部分的偏离。故 SWV 可以表示为:

$$SWV_i^m = m(\theta_i^m) PWV_i + S_i^m \quad (13)$$

$m(\theta_i^m)$ 为投影函数, S_i^m 为观测站点 i 与卫星 m 之间大气水汽的各向异性部分。因此, 计算 SWV 的关键即为求出 S_i^m 。

而斜径方向对流层总延迟 STD 可以表示为^[15]:

$$\begin{aligned} STD &= SHD + SWD \\ &= m_h(\theta) ZHD + m_w(\theta) ZWD \\ &\quad + M_\Delta(\theta)(G_N \cos \phi + G_E \sin \phi) + R_e \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)中, ϕ 为方位角, G_N 、 G_E 分别为南北、东西方向的大气延迟梯度, R_e 为水汽的残差项, $M_\Delta(\theta)$ 为梯度映射函数:

$$M_\Delta(e) = 1 / (\sin \phi \tan \phi + 0.003) \quad (15)$$

式(14)消除干延迟后, 加上后处理的残差项, 即可得到 S_i^m :

$$S_i^m = \Pi \times [M_\Delta(\theta)(G_N \cos \phi + G_E \sin \phi) + R_e] \quad (16)$$

3 实例分析

3.1 资料介绍

本文选取 SuomiNet 位于美国 Kansas 州和 Oklahoma 州的 10 个测站 2009 年年积日 058 到 067 的 10 天的数据进行分析, 测站的空间分布见图 1, 由这些点组成的区域网平均距离为 121.873 km, 最小距离为 61.734 km, 最长距离为 182.632 km。其中 TOP、DDC、LMN、OUN 为布设有无线电探空仪 (Radiosonde) 的探空站。Duan^[16] 等人认为在局部网解算时加入一些 IGS 基准站即可直接利用 GPS 方法绝对测定各测站上的 PWV 值, 而无需 WVR 仪器进行定标, 但这些基准站必须远离局部网在 500 km 以上。对于 IGS 跟踪站的个数问题, 宋淑丽^[2]指出, 一般选择 2~3 个即可。因此, 本文选取了 MDO1 和 JPLM 两个 IGS 跟踪站, 来获取该区域的绝对 PWV。

3.2 GPS 遥感 PWV

首先对 PWV 的遥感方法进行试验, 根据 1.1 介绍的地基 GPS 遥感 PWV 的原理, 本文得到了所有 GPS 测站的 PWV 含量的变化。假定测站上空 30 min 间隔的天顶延迟参数为一定值, 连续估计了测站上空 10 天的 PWV 含量, 如图 2 所示。为节省篇幅, 这里仅列出 SG01 以及 SG20 对应的结果。

从图 1 可以看出, SG01 站附近也同时有一个探空站 LMN, 而在探空站 DDC 和 OUN 周围亦有距离较近的 GPS 站点。因此可以将探空站 LMN 和 SG01 站, 探空站 OUN 和邻近 GPS 站点, 以及探空站 DDC

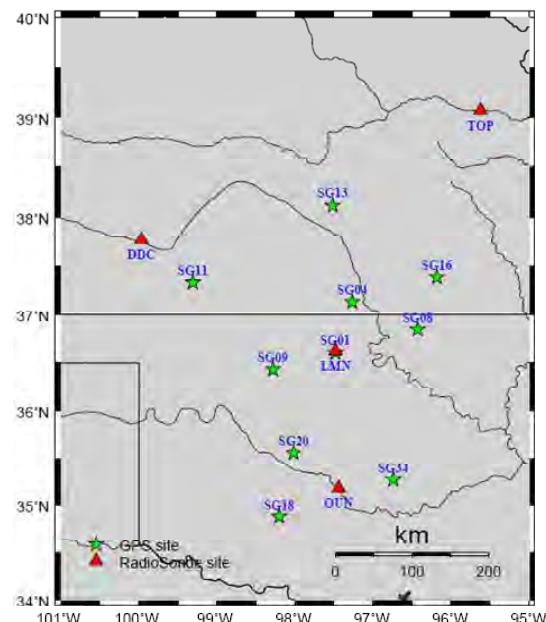


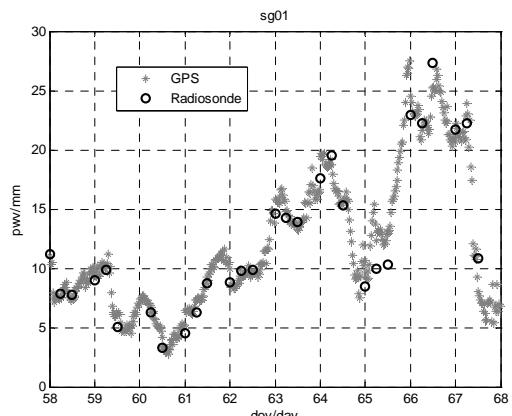
图 1. SuomiNet 部分站点及邻近的 Radiosonde 站点分布图

和邻近 GPS 站点所得出的结果进行对比, 来分析地基 GPS 遥感 PWV 的精度。这里仅列出 LMN 和 SG01、OUN 和 SG20 的对比结果, 如图 2 所示。从图 2 可以看出: SG01 站 GPS 遥感的 PWV 结果与 Radiosonde 探测的 PWV 吻合的较好。而对 OUN 和 SG20 的对比结果可以看出, GPS 遥感的 PWV 与 Radiosonde 探测 PWV 有一定的偏离, 可能原因是 OUN 与 SG20 相隔约 67 km 所致, 但在小范围区域内, 天气具有相关性, 因此它们总体的趋势仍有一致性。

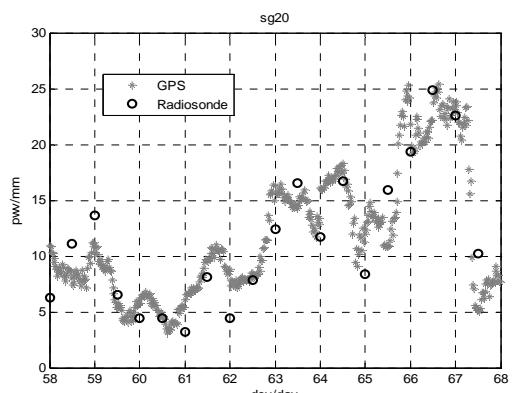
为了分析地基 GPS 遥感 PWV 的精度, 图 3 给出了 GPS 遥感出的 PWV 与 Radiosonde 探测的 PWV 的散点图, 以及均方差 RMS, pearson 相关系数。pearson 相关系数 r 的计算公式为:

$$r = \frac{\sum (PWV_i - \bar{PWV})(RSPWV_i - \bar{RSPWV})}{\sqrt{\sum (PWV_i - \bar{PWV})^2 \sum (RSPWV_i - \bar{RSPWV})^2}} \quad (17)$$

式(17)中, PWV 为 GPS 遥感的 PWV, \bar{PWV} 为 GPS 遥感的 PWV 的平均值, $RSPWV$ 为 Radiosonde 探测的 PWV, \bar{RSPWV} 为 Radiosonde 探测的 PWV 的平均值。

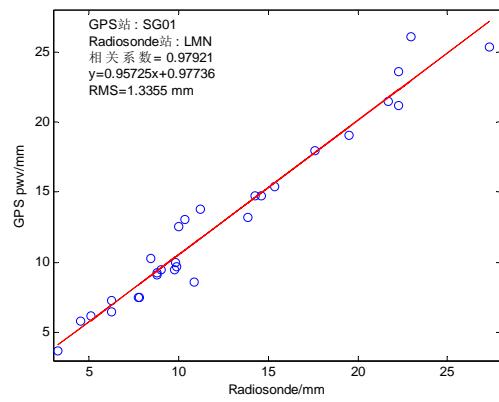


(a) SG01 与 LMN

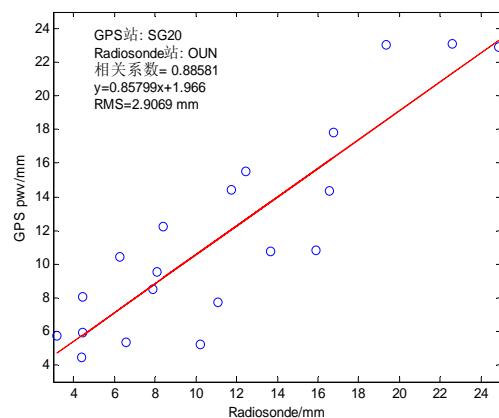


(b) SG20 与 OUN

图 2. GPS 遥感的 PWV 与 Radiosonde 探测的 PWV 比较



(a) SG01 与 LMN



(b) SG20 与 OUN

图 3. GPS 遥感的 PWV 与 Radiosonde 探测的 PWV 的散点图

可以看出, 图 3 所得出的结果与图 2 具有一致性, SG01 由于与探空站 LMN 相距很近(约 1.8km), 这两种方法所得的 PWV 间的 pearson 相关系数为 0.97921, 均方差 RMS 为 1.3355 mm, 而 SG20 与探空站 OUN 之间相距 67 km, 随着距离的增大, GPS 遥感的 PWV 与 Radiosonde 探测的 PWV 的 pearson 相关性下降为 0.88581, 而均方差 RMS 亦增大到 2.9069 mm。

3.3 GPS 遥感 SWV

对于大气水汽输送的研究需要得到 GPS 信号斜路径方向的水汽含量 SWV, 因此本文也利用 SuomiNet 的站点进行了 GPS 探测 SWV 的相关计算, 选取的卫星截止角为 10°, 并利用 GAMIT 10.34 对天顶延迟、梯度等对对流层大气参数进行估计。

图 4 综合给出了 2009 年 3 月 7 日 SG01 站上午 7:15~下午 1:45(注: 如不特殊说明, 本文的时间均为 UTC 时间)在 PRN17 方向获得的 SWV 时间序列图及卫星的仰角变化。GPS 遥感的 SWV 的精度一般用 WVR 来进行评定, 由于缺乏试验区域的 WVR 资料, 因此本

文仅从定性方面来对SWV的精度进行分析。从图4可知

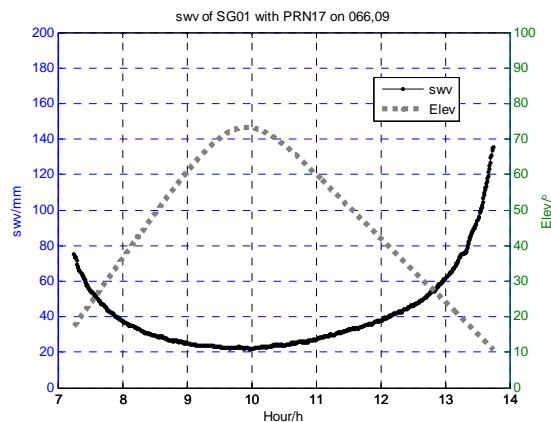


图4. SWV在SG01至PRN017方向的时间序列及卫星高度角变化

以看出，在卫星进入视野时，卫星高度角较低，SWV比PWV要大得多。随着卫星上升，高度角Elev的增加，SWV开始逐渐减小，当高度角接近天顶方向时，SWV降至最小，此时与PWV相当。最后，随着卫星下降，SWV又开始增加。SWV随着Elev变化的原因是，Elev较小时，测站与卫星之间的连线穿过的大气层的距离长，因此SWV较大；反之，当Elev较大时，即卫星接近天顶方向时，测站与卫星之间的连线几乎已最短的距离穿过的大气层，因此SWV降至最小。

3.4 水汽通量与PWV梯度场的比较

水汽通量是描述水汽输送的物理量之一，它指的是单位时间流经单位垂直面积的水汽量，方向与风向相同，单位为克每百帕厘米秒，可分解为经向输送和纬向输送两个分量。水汽通量 Q 的计算公式如下：

$$Q = -\frac{1}{g} \int_{P_t}^{P_s} V q dp \quad (18)$$

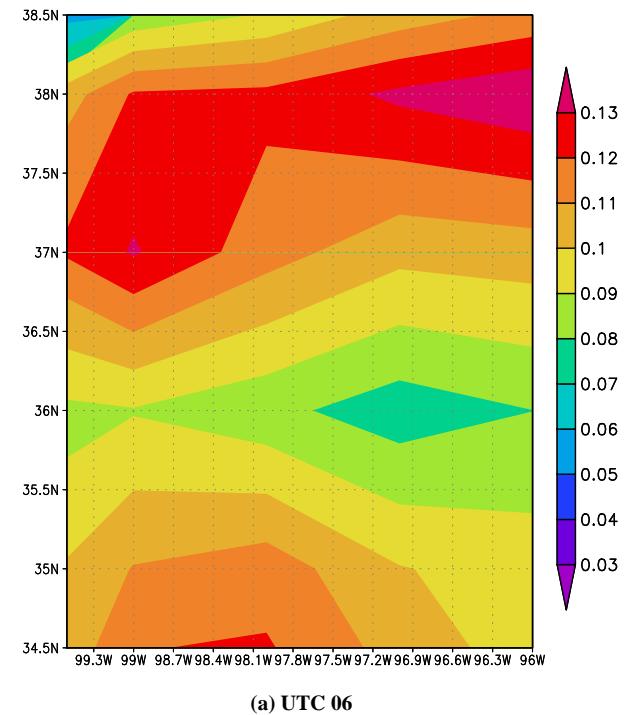
式(18)中， V 为该单位气柱内各层大气的风速矢量， q 是各层大气的比湿， P_s 、 P_t 分别为大气柱下界气压(即地面气压)和上界气压， g 是重力加速度。

对于大气可降水量PWV，除了利用来进行GPS遥感外，利用传统方法(如探空气球)探测PWV的计算方法可以表述为：

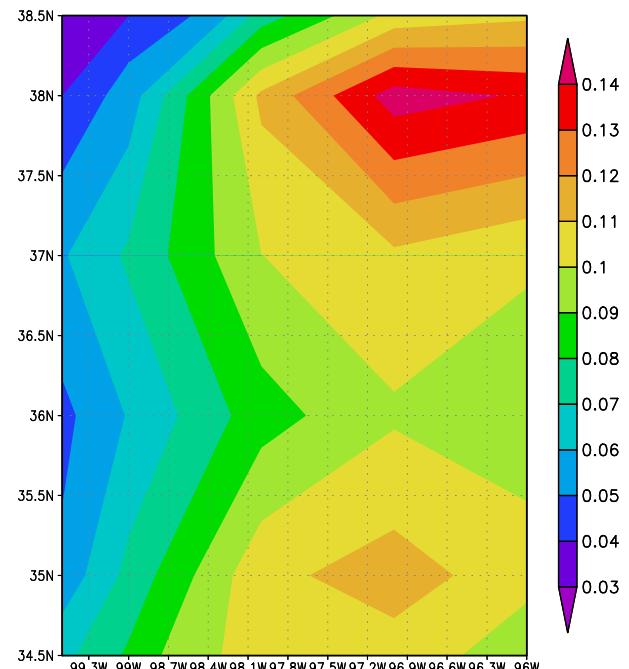
$$PWV = -\frac{1}{g} \int_{P_t}^{P_s} q dp \quad (19)$$

比较式(18)和式(19)可以看出，当某区域内的风速变化不显著时，大气可降水量PWV可以看成水汽通量 Q 的一种相关近似，即它们大小存在差异，但在整体变化趋势上应具有相似性。针对这一特点，本文利用美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和美国国家大气研

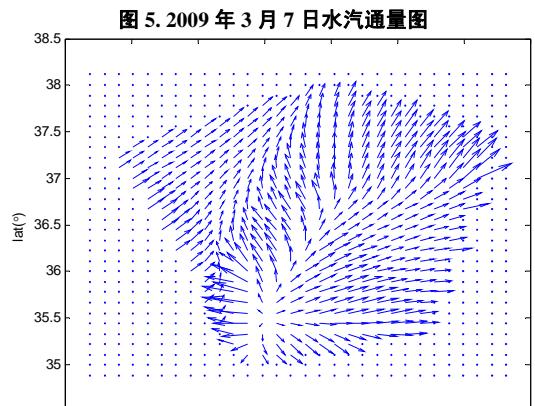
究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)联合发布的6h再分析资料集计算本文试验区域内的水汽通量，如图5所示。同时利用GPS遥感的PWV得出对应时刻的PWV梯度场，如图6所示。可以看出，图5和图6在水汽分布比较密集的区域具有一定的一致性，在水汽通量值较大的地方，PWV梯度场变化也相对显著。但由于本文在利用GPS遥感PWV的过程中没有考虑风速影响，因此在某些区域之间还存在差异。



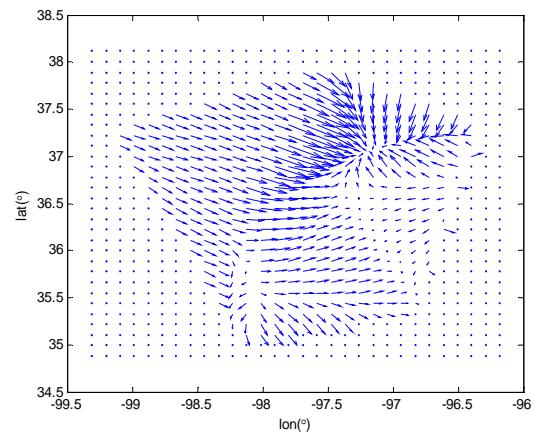
(a) UTC 06



(b) UTC12



(a) UTC 06



(b) UTC12

图 6. 2009 年 3 月 7 日 PWV 梯度场

3.4 GPS 探测水汽输送

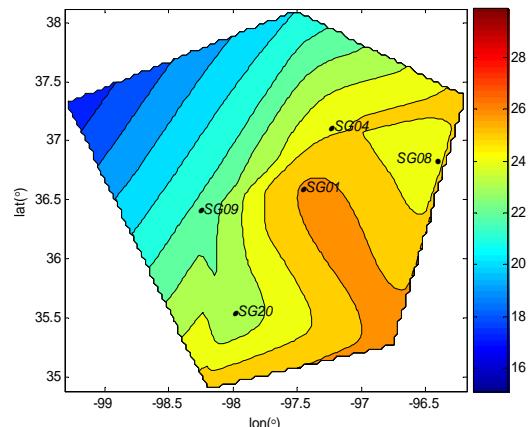
为了探测水汽输送的情况, 图 5 给出了某区域的 2009 年 3 月 7 日 14 时 15 至 16 时 15 分 PWV 的水平分布图。由图 5 可以看出, 在 14: 15 水汽含量较低, 随后水汽有个积累的过程, 与图 5(a)相比, 图 5(b)的水汽含量普遍要大, 而从图 5(c)可以看出, 随后水汽含量有减少的过程。在这个过程中, 水汽含量先增后减, 可以预测此过程中很可能伴随有降雨的发生。同时, 还可发现, 东南方向的水汽含量比西北方向的水汽含量普遍要高, 因此可以推断, 水汽有东南方向向西北方向输送的趋势。

为了便于比较同一站点对不同卫星的 SWV 观测, 应该消除卫星仰角或路径对的影响, 因此我们用湿映射函数 $m_w(\theta)$ 将 SWV 映射到天顶方向, 得到 VSWV^[17]:

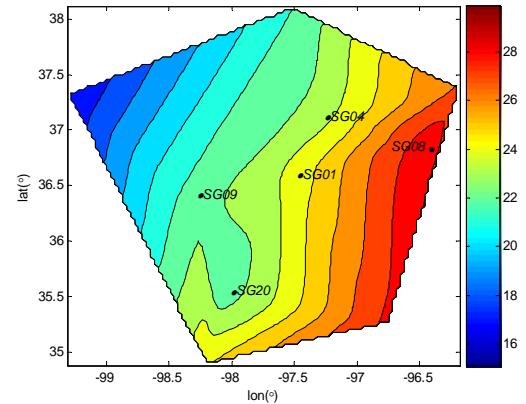
$$VSWV = \frac{SWV}{m_w(\theta)} \quad (18)$$

图 6 给出了测站 SG01 在这段时间内的可见卫星

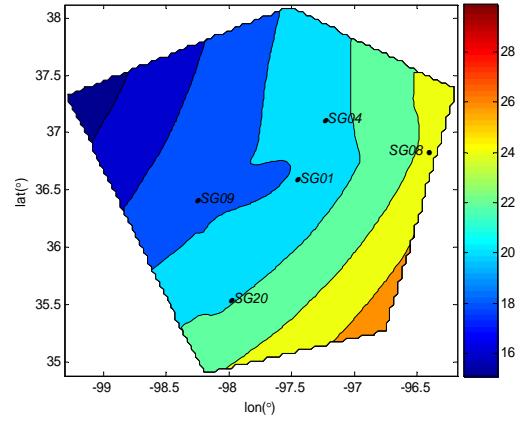
的分布情况, 图 7 为 SG01 站 2009 年 3 月 7 日 14 时至



(a) 14:15



(b) 15:45



(c) 16:15

图 5. PWV 水平分布

17 时的 PWV 和 VSWV 时间变化序列。从图 7 可以看出, SG01 站至 PRN02 方向的 VSWV 值有波动趋势, 但整体要大于该站的 PWV 值, 因此推断 PRN02 所处位置应为水汽的高值区。从图 6 可以看出, PRN02 位于 SG01 的东北方向, 再结合图 5, 亦可以证实 SG01 站至 PRN02 方向的 VSWV 的这种变化趋势; 同样地, SG01 站至 PRN12 方向的 VSWV 值整体要小于该站的

PWV值, PRN12 在SG01 站的西南方向, 这与图 5 的

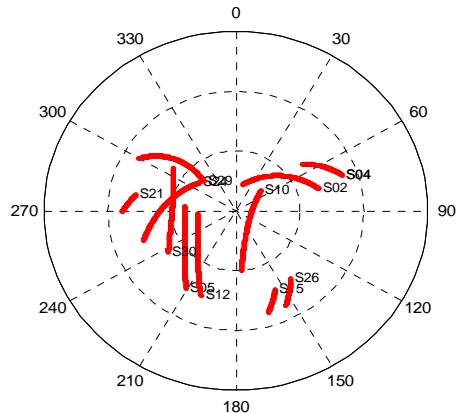


图 6. SG01 站的可见星分布(2009.3.6 14:15-16:15)

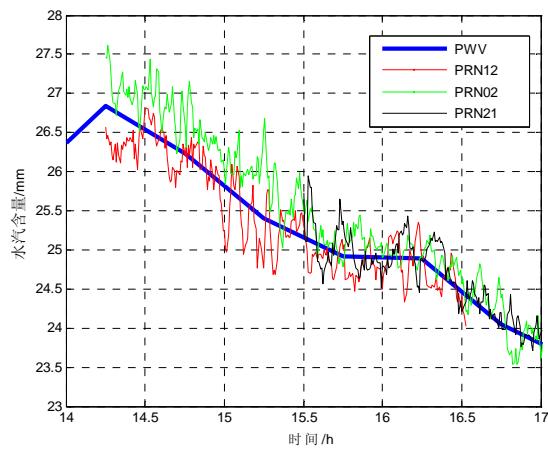


图 7. SG01 站PWV和VSWV时间变化序列

结果也是一致的; PRN21 位于SG01 站的西部, 其 VSWV围绕PWV在变化, 图 5 也很好的体现了这一结果。因此, 可以看出, SWV及其投影到天顶方向后的 VSWV与PWV相比, 包含了更多的信息, 能更好地反映水汽的真实分布。

4 结论与展望

本文通过对 SuomiNet 位于 Kansas 州和 Oklahoma 州的 10 个站点 10 天的数据进行试验, 试验结果表明, (1) 利用地基 GPS 遥感该地区大气水汽含量 PWV, 其精度与 Radiosonde 探测 PWV 的精度相当, 可达 $1 \sim 2 \text{ mm}$, 因此, 可以利用 GPS 替代传统的 Radiosonde 监测大气 PWV; (2) 使用大气梯度以及残差项共同模拟计算大气的各向异性成分, 并与 PWV 组合可以计算出斜路径方向水汽含量 SWV, 能用于近实时遥感 SWV; (3) PWV 是所有 SWV 观测的时空平均, 与 PWV 相比, SWV 包含更多信息, 更能代表大气水汽的真实分布。因此, SWV 可以用于水汽输送的相应研究中去; (4) 在区域风速变化不大时,

通过比较 PWV 梯度与水汽通量的变化趋势, 得出 PWV 梯度场的变化与水汽通量值的高低具有一定的一致性, PWV 对于水汽输送有一定的参考价值; (5) 将 GPS 站点至不同卫星方向上的 SWV 消除卫星仰角或路径影响, 得到的 VSWV 能很好的体现水汽的空间变化, 有助于监测水汽输送方向。

虽然倾斜路径观测的 SWV 可以较全面地探测不同空间方位上的水汽变化, 但它仍然不能给出水汽垂直分布信息。而水汽输送是大气中的水分随着气流从一个地区输送到另一个地区或由低空输送到高空的现象, 要深入展开大气水汽输送等相关研究, 知道水汽的三维空间分布情况, 以及风向变化等是有必要的。应用区域的 GPS 观测网进行水汽层析解决了 SWV 观测的不足, 可获得区域上空的水汽垂直分布状况, 时间分辨率可达 30 min 或更低。这将是后一步要进行的工作。

致 谢

感谢美国MIT授权使用GAMIT/GLOBK软件, 美国MIT 地球大气和行星科学系的Bob King和Tom Herring博士等人给予的帮助。

References (参考文献)

- [1] Si Xiaoying, Regional Climate Meridional and Zonal Feature in China[D], Chinese academy of sciences, 2007 (Ch). 施小英. 中低纬关键区水汽输送结构特征及其对长江流域夏季降水异常的影响[D]. 中国科学院研究生院博士论文, 2007.
- [2] Song Shuli, Sensing Three Dimensional Water Vapor Structure with Ground-based GPS Network and the Application in Meteorology[D], Shanghai Astronomical Observatory,CAS,2004 (Ch). 宋淑丽. 地基 GPS 网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用[D]. 上海天文台博士论文, 2004.
- [3] Yan Haojian, Fu Yang, Hong Zhenjie and Guo Peng, Space-based GPS meteorology and inversion technique [M], beijing: Science and Technology of China Press,2007(Ch). 严豪健, 符养, 洪振杰, 郭鹏. 天基 GPS 气象学与反演技术 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [4] Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System[J]. Journal of Geophysical Research, 1992,97 (D14):15787-15801.
- [5] Luiz Fernando Sapucci, João Francisco Galera Monico, Artemio Plana-Fattori et al., GPS Performance in the Quantification of Integrated Water Vapor in Amazonian Regions[C]. ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division. Long Beach, CA, 2004: 2362~2369.
- [6] Davis J , Elgered G, Niell A, et al., Ground-based measurement of gradients in the“wet”radio refractivity of air[J]. Rad. Sci., 1993,28: 1003-1018.
- [7] Flores A , de Arellano J V G, Grdinarsky L P. Tomography of the lower troposphere using a small dense network of GPS

- receivers. *I EEE Trans . Geosci. Remote Sens .*, 2001 , 39(2) : 439~447
- [8] Randolph H. Ware, David W. Fulker, Seth A. Stein, et al. SuomiNet: A Real-Time National GPS Network for Atmospheric Research and Education[J]. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2000, 81: 677-694.
- [9] Bi YM, Mao J T, Liu X Y, et al. Remote sensing of the amount of water vapor along the slant path using the ground-base GPS. *Chinese J .Geophys.*, 2006 , 49 (2) :335~342 (Ch).
毕研盟, 毛节泰, 刘晓阳等. 应用地基 GPS 遥感倾斜路径方向大气水汽总量[J].*地球物理学报*, 2006, 49(2): 335-342.
- [10] MAO Hui, MAO Jietai, BI YanMeng, LI Chengcai and LIU Xiaoyang, Constructing temporal and spatial water vapor figures by GPS remote sensing along slant rays[J], *SCIENCE IN CHINA(EARTH SCIENCES)*, 2006, 36(12): 1177~1186.
- [11] Brunner, F. K. , M. Gu. An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations[J]. *Manuscripta Geodetica*,1991:205-214.
- [12] Ware, R., C. Alber, C. Rocken , F. Solheim. Sensing integrated water vapor along GPS ray paths[J].*Geophysical Research Letters*,1997,24: 417-420.
- [13] N. A. Nicholson, V. A. Hoyle, S. Skone, M.E. Cannon. Validation of a Tropospheric Voxel Tomography Model in a Regional GPS Network[C]. *ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division*. Long Beach, CA, 2004: 2386-2395.
- [14] Braun J, Rocken C, Ware R. Validation of line-of- sight water vapor measurements with GPS[J]. *Radio Sci.*, 2001, 36: 459-472.
- [15] Yoaz E Ikir-Sever, Peter M. Kroger, Jorgett A. Borjesson. Estimating Horizontal Gradients of Tropospheric Path Delay with a Single GPS Receiver[J]. *Journal of Geophysical Research*.1997.
- [16] Duan, J., M. Bevis, P. Fang, et al. GPS Meteorology: Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1996,35, 830~838.
- [17] BI Yanmeng , MAO Jietai , LI Chengcai , and FU Yang, Spatial Distribution of Water Vapor Observed with GPS Along Slant Path in a Storm System[J], *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(6):1169~1176 (Ch).
毕研盟, 毛节泰, 李成才, 符养. 利用 GPS 的倾斜路径观测暴雨过程中的水汽空间分布 [J].*大气科学* , 2006, 30(6):1169~1176.