

利用境内气象站观测数据的激光测高仪大气延迟改进算法

张文豪, 李松, 马跃, 周辉, 张智宇

(武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430060)

摘要:由大气层折射率分布不均匀引起的大气折射延迟是星载激光测高仪测距误差的主要来源之一,其主要受地表气压的影响。目前计算地表气压方法仅有美国 GLAS 系统使用的基于 NCEP 气象数据和时间空间的内插方法, GLAS 系统观测相对平坦的南北极冰盖区域的精度足够,但观测地表起伏复杂的陆地目标的精度较低。文中利用国内气象站的观测数据,基于改进的反距离加权内插算法对大气折射延迟修正方法进行改进,并与传统 GLAS 方法的修正结果进行精度对比。在高原地区以及高纬度地区,采用国内气象数据和新的内插算法可以将修正残差由超过 2 cm 降低至小于 0.5 cm, 相对 GLAS 系统整体 15 cm 的测量精度,相当于整体精度提高 10%,对于未来国产卫星激光测高仪测量精度的提高将有一定参考价值。

关键词:激光测高仪; 大气折射延迟; 地表气压; 反距离加权内插

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0206004

Improved method of atmospheric delay correction using China meteorological station data for a laser altimeter

Zhang Wenhao, Li Song, Ma Yue, Zhou Hui, Zhang Zhiyu

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430060, China)

Abstract: The atmospheric refraction delay caused by the uneven distribution of the refractive index of the atmosphere, is one of the main sources of the ranging error for a space-borne laser altimeter and mainly influenced by the surface pressure. At present, the method of calculating surface pressure is based on NCEP meteorological data and the time-space interpolation method derived by GLAS research team. For the GLAS system, the correction precision is sufficient (<1 cm) for its core observing target in the relatively flat ice-sheet region; however, the correction precision is low for a complex land target. Based on the observation data of China domestic meteorological stations, a modified inverse-distance weighted interpolation algorithm was derived to improve the correction precision of the atmospheric refraction delay; then, the correction precision was compared with traditional GLAS method. In the highland and high latitudes area, the correction error was reduced from more than 2 cm to less than 0.5 cm using the new interpolation algorithm with domestic meteorological data, which was equivalent to improve the

收稿日期: 2017-08-15; 修订日期: 2017-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(41506210, 11574240); 测绘公益性行业科研专项经费(201512016); 对地高分辨率观测系统国家科技重大专项(AH1601-8); 中国博士后科学基金项目(2016M600612); 中央高校基本科研业务费专项资金(2042017kf0016, 2015212020201)

作者简介: 张文豪(1992-), 男, 硕士生, 主要从事激光遥感与光电检测方面的研究。Email: wenhao@whu.edu.cn

导师简介: 李松(1965-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光遥感与光电检测方面的研究。Email: ls@whu.edu.cn

overall accuracy of 10% compared to the whole 15 cm measurement accuracy of GLAS system. This research will be reference to improve the measurement accuracy for future domestic space-borne laser altimeter.

Key words: laser altimeter; atmospheric refraction delay; surface pressure; IDW

0 引言

星载激光测高仪是一种主动式遥感设备,通过处理发射和接收系统分别记录的激光发射和回波脉冲数据精确计算激光的渡越时间,进而获取高精度的激光测距值。星载激光测高仪发射的激光脉冲在经过地球大气层时,会发生折射以及散射现象,引入测距误差^[1-4]。为了修正大气折射效应引入的测距误差,Marini 和 Murray 通过推导静力学方程得到星载激光测高仪大气延迟误差等于天顶方向延迟乘以与激光指向角有关的映射函数^[5],Niell 给出了映射函数的模型^[6],而天顶方向的大气延迟由干项延迟和湿项延迟组成,分别由地表气压以及地表可降水量解算。地面每 1 hPa 大气压将导致 2.30 mm 的误差,而地表气压平均值达到 1 000 hPa,由此带来大气延迟约为 2.3 m,而可降水量带来的湿项延迟在 1~4 mm 之间,因此干项延迟矫正是大气延迟校正的主要内容^[7]。

目前对地观测十几厘米量级高程精度的卫星激光测高仪仅有 GLAS 系统,为保障 GLAS 系统达到其设计的精度要求,麻省理工学院 Herring 设计了利用美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 提供的全球气象数据进行时间线性内插、空间水平方向双线性内插、垂直方向梯度数值积分内插获取每个测量脚点位置和时刻的气压数据^[8],这也是截止目前全球范围唯一的针对大气延迟修正的气压计算方法。Herring 方法获得的气压内插结果与位于极地 GPS 观测站以及位于南极大陆和格陵兰岛的气象观测仪器所获取的实地气象数据对比结果显示,气压内插 RMSE 为 5 hPa(对应干项延迟 12 mm),并且误差主要集中在 3 hPa 以内(对应干项延迟 7 mm)。

星载激光测高仪同时也可以进行陆地地形测绘、森林植被反演等研究。依据目前 NCEP 提供的空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格、时间分辨率 6 h 的气象数据,以及 GLAS 项目组气压内插的解决方案,数据时间分辨率较低,且内插过程仅考虑激光脚点与相邻气

象数据的距离因素,不考虑海拔高度因素;这对于表面地形起伏复杂多变的陆地目标,海拔高度将直接影响地表气压,因此该方法修正精度相对于平坦的南北极冰盖区域必然有一定程度的降低。

文中利用国内超过 2 000 个气象站的 1 h 间隔的观测数据,基于改进的反距离加权内插算法对大气折射延迟修正方法进行改进,选取中国境内不同地形地物的典型地区,并将新方法与传统 GLAS 方法的修正结果进行精度对比。论文研究的内容对于未来国产卫星激光测高仪测量精度的提高将有一定参考价值。

1 改进的大气折射修正方法

中国气象数据网提供全国 2 169 个气象站的地面气象资料,气象资料的时间间隔为一小时,且中国气象站在全国的分布及其不均匀,规律为东部地区密集,西部地区稀疏;国内气象站公布的气象数据包含:时间、气象站的经纬度、气象站所在地海拔、气象站所在地平均海平面气压、气象站高于地表 1.5 m 处的测量气压。利用国内气象站观测数据进行星载激光大气延迟修正时,由于激光脚点的空间分辨率远远高于气象站空间分辨率,因此为了获取激光脚点所在位置的气压值,需要将气象站观测的气压值进行空间内插。根据理想气体状态方程推导的通用压高方程为^[9]:

$$P=P_0 \exp \left[- \int_{z_0}^z (g/TR) dz \right] \quad (1)$$

式中: P_0 为海平面气压; P 为海拔高度 z 处的气压值; R 为干空气气体常数; g 为重力加速度; T 为温度。取 $z_0=0$, 气象站所在海拔高度气压与平均海平面高度的气压满足指数衰减变化:

$$P=P_0 e^{\alpha z} \quad (2)$$

根据公式(2)可以求得 $\alpha=1/z \cdot \ln(P/P_0)$ 为气象站所在位置的气压衰减系数。根据公式(1)可知,衰减系数是重力加速度、温度积分得到的,因此衰减系数随高度发生变化,根据气象站公布的平均海平面气

压以及气象站所在海拔高度 z 处的气压可以计算得到 z 处的衰减系数。假设重力加速度 g 以及气温在以海拔高度 z 为中心的一段高度范围内保持不变, 则可认为衰减系数在该段范围内保持不变。第 i 个采样点与插值点同高度处的气压满足公式:

$$P_i = P_{0i} e^{\alpha_i h} \quad (3)$$

式中: P_{0i} 为采样点海平面高度气压值; α_i 为采样点的衰减系数; h 为待插值点的海拔高度。反距离加权内插是根据采样点与插值点之间的距离计算采样点的权重值, 并且距离插值点越近的采样点, 其权重越大。采样点权重计算公式为:

$$w_i = \frac{\left(\frac{1}{d_i}\right)^u}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{d_j}\right)^u} \quad (4)$$

式中: w_i 为第 i 个采样点的权重; d_i 为第 i 个采样点与插值点的距离; u 为权指数, 通常取 2 或 3, 文中令 $u=2$ 。则插值点是采样点的权重之和, 可以表示为:

$$P = \sum_{i=1}^n w_i P_i \quad (5)$$

式中: P_i 为第 i 个采样点在插值点海拔高度处的气压值; P 为计算得到的插值点气压值; n 为选取的采样点数。

GLAS 项目组线性内插方法针对地表相对平坦的极地区域, 高度变化不大, 因此内插时仅考虑距离因素。文中的方法主要针对中国境内复杂多变的地形区域, 因此在进行反距离加权内插时, 需要考虑距离和高度两个因素。在进行空间内插时, 首先将待插值点周围气象站按照气象站海拔高度分成 m 个区间; 其次根据待插值点海拔高度确定其所属区间; 计算待插值点与所属区间内气象站的距离, 并选取距离待插值点最近的 6 个气象站; 根据公式(2)确定这 6 个气象站气压的衰减系数, 根据公式(3)计算气象站在待插值点海拔高度处的气压值; 根据公式(4)、(5)计算待插值点处的气压值。

分别以河南省境内和四川省境内气象站公布的 2016 年 9 月 24 日 2 时气压值作为研究对象, 根据待插值点 $P_i (i=1,2)$ 的经度、纬度和高程值计算确定采样点 $p_{ij} (i=1,2; j=1,2,\dots,6)$ (气象站) 的位置, 结果如表 1 所示, 其中 P_1 位于河南省境内, P_2 位于四川省境内。

将表 1 中待插值点与搜索结果在图形中显示如

表 1 用于气压内插的气象站选取结果

Tab.1 Selected meteorological station for pressure interpolation

	Lat/(°)	Lon/(°)	Elevation/m	Pressure/hPa	Error/hPa
P_1	36.03	114.08	195.70	989.30	
P_{11}	35.16	113.40	78.80	1 003.20	
P_{12}	35.55	114.20	93.90	1 001.20	
P_{13}	35.19	113.53	74.20	1 004.30	
P_{14}	35.56	114.55	52.40	1 006.10	-0.55
P_{15}	35.06	113.21	95.50	1 001.20	
P_{16}	35.02	114.25	70.80	1 004.30	

图 1 所示。图中点的位置为气象站位置, 其中方块表示待内插点, 浅色点为选取的样本点, 深色点为没有参与内插的气象站点。

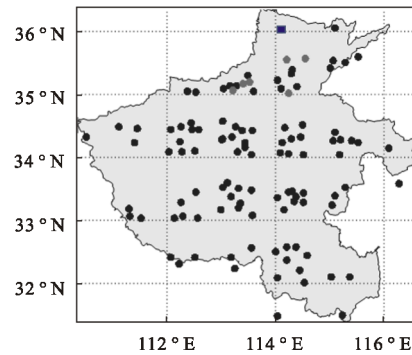


图 1 用于气压内插气象站的地理位置分布

Fig.1 Selected meteorological station position distribution for pressure interpolation

对于海拔较高、地势变化较大的四川地区, 结果如表 2 所示。

表 2 用于气压内插的气象站选取结果

Tab.2 Selected meteorological station for pressure interpolation

	Lat/(°)	Lon/(°)	Elevation/m	Pressure/hPa	Error/hPa
P_2	29.03	100.18	3 728.60	649.30	
P_{21}	28.56	99.48	2 843.10	722.80	
P_{22}	30.00	100.16	3 950.50	632.50	
P_{23}	29.00	101.30	2 931.40	715.90	
P_{24}	28.43	99.17	2 424.10	760.60	-2.41
P_{25}	30.02	101.01	2 602.20	740.20	
P_{26}	30.00	99.06	2 590.20	744.00	

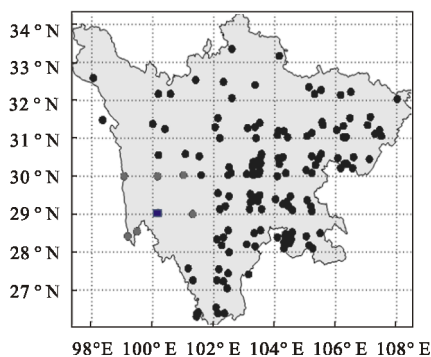


图 2 用于气压内插气象站的地理位置分布

Fig.2 Selected meteorological station position distribution for pressure interpolation

2 改进大气延迟方法的精度验证

2.1 基于国内气象数据和反距离加权的插值结果

文中通过交叉验证方法计算每个气象站在不同时刻的气压值,即选取一个气象站位置作为气压内插位置,其余气象站位置处的测量气压为样本点,计算内插位置的气压值,重复以上过程,计算每一个气象站位置的气压值。内插计算得到的气压值与气象站实测气压值相减即为每个气象站位置处的气压内插误差。

文中以中国气象数据网提供的河北省、内蒙古自治区、河南省、湖北省、四川省、新疆维吾尔自治区 6 个区域的气象站提供的 2016 年 9 月 24 日到 2016 年 9 月 28 日,每日 2 时、8 时、14 时、20 时的气压作为研究对象,通过交叉验证计算反距离的加权内插误差。其中河南省地区 2016 年 9 月 24 日 4 个时刻的气压内插误差如图 3 所示。根据国家气象局标准,每个气象站都有唯一的区站号,因气象站数目太多,不方便使用区站号表示,文中用简单的数字索引标号表示,即图 3 中横坐标代表气象站编号。

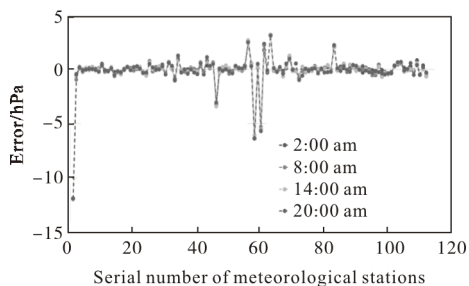


图 3 河南省区域新方法计算的气压内插误差

Fig.3 Interpolation errors of pressure in Henan province using the new method

对以上 6 个地区 20 个不同时刻内插误差结果进行统计,得到表 3 所示的结果。

表 3 不同省份区域新方法计算的地表气压误差对比

Tab.3 Comparison of pressure interpolation errors calculated by the new method in different provinces

Province	Max/hPa	Min/hPa	Mean/hPa	RMSE/hPa
Hebei	10.17	0.04	0.71	1.67
Inner Mongolia	6.10	0.18	0.83	0.84
Henan	11.73	0.06	0.64	1.42
Hubei	6.25	0.12	1.13	1.33
Sichuan	12.55	0.04	1.71	2.30
Xinjiang	13.72	0.10	1.70	2.70

从表 3 结果可知,所选的 6 个区域内,综合考虑高度和距离因素的反距离加权内插法,内插数据误差均值小于 2 hPa。河南省和内蒙古自治区的地势较为平坦,气象站高度在较小区间变化,因此计算得到的结果误差较小,误差绝对值集中于 2 hPa 之内对应大气修正误差小于 5 mm。统计分析误差较大的气象站位置发现,产生误差较大的气象站大多四周环山或者位于山脚之下,地形变化对反距离加权内插存在很大影响。四川省境内多山地,因此通过内插计算得到的气压值与实际值之间的误差均值和 RMSE 都较地势平坦地区大。

在气象站稀疏的地区,气压内插位置与气象站的距离增大会影响气压内插精度。以内蒙古自治区气象站采集的气象数据为研究对象,探究气象站稀疏对气压内插的影响,结果表明,当内插点与最近采样点距离约为 110 km 的情况下,气压内插的均方根误差为 1.52 hPa,对应大气延迟为 3.4 mm,反距离加权内插方法仍然有较高的改正精度。

2.2 基于 GLAS 和 NCEP 再分析资料时空内插比较分析

NCEP 对来源于地面、船舶、无线电探空、探空气球、飞机、卫星等的气象观测资料进行同化处理,提供全球数值分析数据集。数据集更新时间为格林尼治时间 0 时、6 时、12 时、18 时,空间分辨率为 1°。NCEP 数据集的气象要素在中国境内的精度得到广泛的讨论,结果表明,气象数据与实际地面实测数据

存在一定的误差。文中根据参考文献[7]中提到的 NCEP 空间内插方法, 以中国境内气象站实测值为真值, 验证采用 NCEP 气压空间内插精度。

选取河南省境内气象站公布的 2016 年 9 月 24 日 2 时气压作为真值, 以气象站所在经纬度以及高程值作为 NCEP 空间内插点, 得到如图 4 所示的结果。

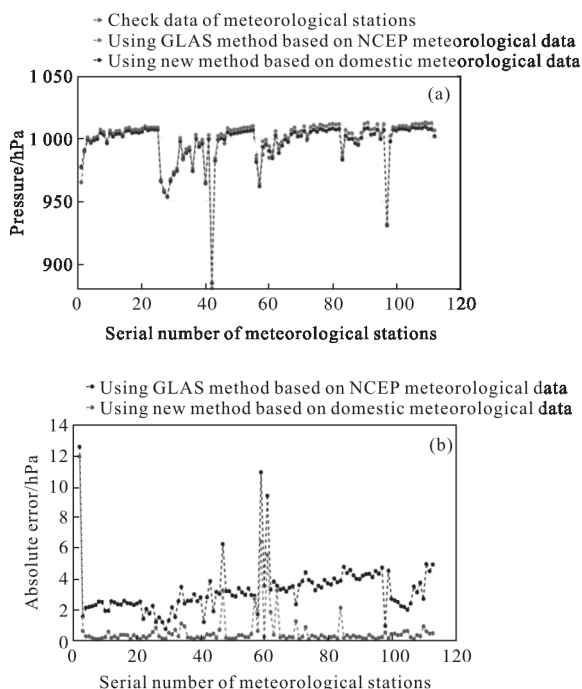


图 4 两种数据和内插方法计算的气压内插误差对比
Fig.4 Comparison of pressure interpolation errors using two kinds of data and interpolation methods

通过以上结果可知, 基于 NCEP 公布的气象数据利用 GLAS 进行时间线性内插、空间双线性内插计算, 得到的误差大于利用地面观测气压空间内插误差。

根据河南省 112 个气象站提供的 2016 年 9 月 24 日到 2016 年 9 月 28 日, 每日 2 时、8 时、14 时、20 时的气压作为实测数据, 分别采用交叉验证以及 NCEP 气压内插, 将每个气象站 20 次的误差求取均值, 并根据气压误计算大气延迟修正误差, 结果如图 5 所示。

星载激光大气延迟修正误差取决于空间内插误差, 图 5 表明在对星载激光测高数据进行大气修正时, 针对河南境内区域, 选择地面气象站实测数据进行空间内插可以取得更为精确的修正值。

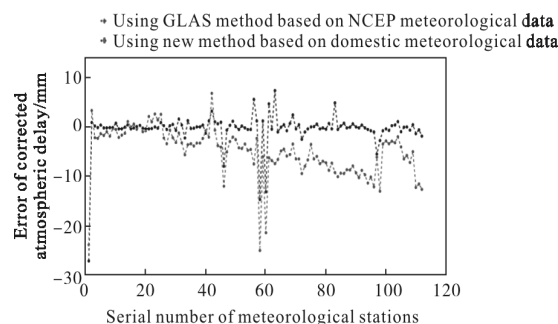


图 5 两种数据和内插方法对应的大气延迟修正误差对比
Fig.5 Error comparison of hydrostatic delay correction with two kinds of data and interpolation methods

分别统计 2016 年 9 月 24 日 2 时中国境内的不同区域, NCEP 修正误差以及地面数据修正误差, 得到表 4 所示结果。

表 4 两种数据和内插方法在不同省份对应的大气延迟修正误差对比

Tab.4 Comparison of hydrostatic delays errors with two kinds of data and interpolation methods in different provinces

Province	NCEP pressure		Modified pressure	
	Mean/hPa	Errors/mm	Mean/hPa	Errors/mm
Hebei	2.11	4.86	0.69	1.58
Inner Mongolia	8.04	18.52	0.81	1.86
Henan	3.16	7.28	0.54	1.25
Hubei	5.11	11.77	0.99	2.29
Sichuan	5.82	13.41	1.71	3.93
Xinjiang	8.79	20.23	0.83	1.90

表 4 结果表明, 采用 NCEP 气压数据进行空间内插时, 内蒙古自治区、新疆维吾尔自治区误差均值较大, 误差均值分别达到 18.52 mm 和 20.23 mm, 而采用国内气象站数据进行气压内插时, 可以将这两个地区的误差均值分别降低到 1.86 mm 和 1.90 mm, 有效地降低高纬度以及高海拔带来的大气修正误差。同时, 在中部河南地区, 采用 NCEP 数据进行空间内插修正大气误差时, 大气修正误差优于 10 mm, 但是采用国内气象数据可以更有效地提高平原地区的大气延迟修正精度。根据四川省区域计算结果可知, 大气气压内插受地形影响较大, 采用国内气象数据进行空间内插计算, 在山地区域误差最大, 但是相

对 NCEP 数据内插误差也存在明显的提高。

3 结 论

文中针对空间气压变化规律,利用国内气象站观测的气压数据,改进反距离加权内插方法,并与 NCEP 气压数据空间内插精度进行比较。

(1) 利用 NCEP 气象数据进行时空线性内插计算,结果误差较大,并且同一位置不同时刻误差值存在较大的差异,这将对激光测距精度产生影响。

(2) 相对于 NCEP 气象数据,国内气象站提供的观测数据时间密度和空间密度都更高,并且论文在内插过程中综合考虑距离和高度两个因素,采用更为复杂的反距离加权法,对国内境内的激光测高数据进行大气延迟修正,可以得到更高的精度。在高原地区以及高纬度地区,采用国内气象数据和新的内插算法可以将修正残差由超过 2 cm 降低至小于 0.5 cm,相对 GLAS 系统整体 15 cm 的测量精度,相当于整体精度提高 10%。

(3) 国内已经成功发射带有激光测高仪的资源 3 号 02 星,后续还会有更多对地观测的星载激光测高载荷,文中提出的采用国内气象数据进行大气折射延迟修正的方法可以为针对国内的激光测高数据的大气修正提供参考。

参考文献:

- [1] Zhao Xin, Zhang Yi, Zhao Pingjian, et al. Influence of atmospheric transmission delay of satellite laser altimeter on ranging precision [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2011, 40(3): 438-442. (in Chinese)
赵欣, 张毅, 赵平建, 等. 星载激光测高仪大气传输延迟对测距精度的影响[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 438-442.
- [2] Yang Y, Marshak A, Varnai T, et al. Uncertainties in ice-sheet altimetry from a spaceborne 1064-nm single-channel lidar due to undetected thin clouds [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(1): 250-259.
- [3] Duda D P, Spinhirne J D, Eloranta E W. Atmospheric multiple scattering effects on GLAS altimetry. I. Calculations of single pulse bias [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2001, 39(1): 92-101.
- [4] Chen Shuhang, Li Zile, Chen Mengzhu, et al. Influence of atmospheric multiple scattering effects on the range bias for satellite laser altimeter [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2522-2526. (in Chinese)
陈舒杭, 李子乐, 陈梦竹, 等. 大气多次散射效应对星载激光测高仪测距偏差值的影响 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2522-2526.
- [5] Marini J W, Murray C W. Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees, NASA-TM-X-70555[R]. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center, 1973.
- [6] Niell A E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(B2): 3227-3246.
- [7] Ma Yue, Li Song, Weng Yinkan, et al. Hydrostatic delay correction for satellite laser altimeter [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2013, 42(4): 909-914. (in Chinese)
马跃, 李松, 翁寅侃, 等. 星载激光测高仪大气干项延迟校正[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 909-914.
- [8] Herring T A, Quinn K. Atmospheric delay correction to GLAS laser altimeter ranges. GLAS Algorithm Theoretical Basis Document Version 2.1[R]. MA: Massachusetts Institute of Technology Cambridge, 2001.
- [9] Duthie W D. Numerical integration of the hydrostatic equation [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 3(3): 89.