

# ERA-Interim 应用于中国地区地基 GPS/PWV 计算的精度评估

赵静旻<sup>1,2</sup> 宋淑丽<sup>1</sup> 朱文耀<sup>1</sup>

1 中国科学院上海天文台,上海,200030

2 中国科学院大学,北京,100039

**摘要:**由于中国绝大多数地基 GPS 网观测时未作气象观测,致使已积累的大量 GPS 观测数据无法在气象领域发挥作用。针对这一情况,研究和分析了利用 ERA-Interim 再分析产品获取中国地区气象资料和计算 GPS/PWV 的方法。以全国分布的 24 个气象观测站 2006、2007 年的气压、温度和相对湿度的实测资料为标准,评估了中国地区 ERA-Interim 再分析资料提取这三个参数和计算 GPS/PWV 所能达到的精度,并进行了精度评估。

**关键词:**ERA-Interim;气象参数;GPS/PWV;精度评估  
中图分类号:P228.42 文献标志码:A

地基 GPS 作为一种新兴的大气探测技术,具有高时空分辨率、高覆盖率网络、全天候连续观测等特性,可以提供高精度的大气可降水汽量 PWV(precipitable water vapor),是传统大气探测手段的有力补充。1992 年 Bevis 等<sup>[1]</sup>首次提出将 GPS 应用于气象研究,在此过程中,需将台站的气象参数作为模型的输入。近二十年来,中国建立了多个区域性的 GPS 观测网络,但由于这些观测网络绝大多数建设时没有配备气象传感器,致使这些资料无法应用于气象变化研究。为了更好地利用已有的 GPS 观测资料,很多学者将数值天气模型(numerical weather models)再分析资料作为补充数据源来获得所需的气象参数,并且证明了这种方法的可行性和可靠性<sup>[2-6]</sup>。中国学者对多种再分析资料在中国地区的适用性进行了检验<sup>[7-12]</sup>,研究表明,在中国地区,欧洲中尺度天气预报中心发布的再分析资料与实测数据的符合程度在多个方面均优于其他资料,但不同气象要素的可信度不同,再分析资料在中国的可信度总体上东部地区高于西部地区,低纬度地区高于高纬度地区。

ERA-Interim<sup>[13]</sup>是欧洲中尺度天气预报中心提供的最新的全球大气再分析产品,较之前的产品精度更高。本文分别针对 ERA-Interim 地面

(surface parameters)和高空(upper-air parameters)再分析资料,提出了将其应用于中国地区气象参数提取和 GPS/PWV 计算的方法。

## 1 数据简介

ERA-Interim 提供多种全球均匀分布的网格化数值产品,时间范围为 1979 年 1 月至今,并且仍在不断实时更新。本文使用的是 2006~2007 年平面分辨率为  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  的地面和高空气象资料。其中地面气象资料的时间分辨率为 3 h,包括位势、气压、2 m 温度、2 m 露点温度等;高空气象资料的时间分辨率为 6 h,根据气压分层,在每个网格点上有 37 层数据,包括位势、气压、温度、比湿、相对湿度等。地面气压、温度、相对湿度三个气象要素是本文关注的重点。

实测气象资料来自地面气象观测,台站分布图如图 1 所示,提供气压、温度和相对湿度三个气象要素,时间分辨率为 1 h。其中气压的准确度为 0.3 hpa,温度的准确度为 0.2 °C。相对湿度小于等于 80%时准确度为 4%,大于 80%时准确度为 8%,时间跨度同样选取 2006~2007 年。

收稿日期:2013-01-15

项目来源:国家自然科学基金资助项目(10603011,11273048);国家 863 计划资助项目(2009AA12Z307)。

第一作者:赵静旻,博士生,主要从事空间大地测量以及 GNSS 气象学研究。E-mail: jyzhao7@gmail.com

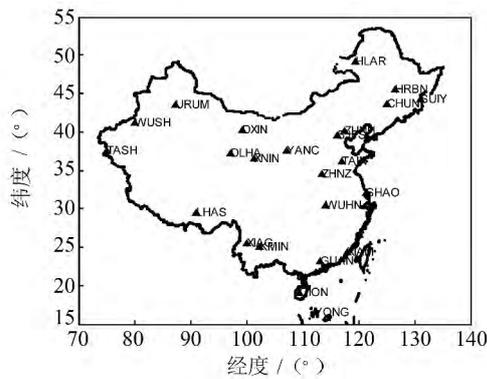


图1 测站分布示意图  
Fig. 1 Distribution of Sites

## 2 ERA-Interim 测站气象参数估计

由于我国地势复杂,从 ERA-Interim 资料中提取测站气象参数的过程需考虑水平方向插值和垂直方向插值。水平方向插值采用观测站所在网格 4 个网格点反距离加权的方法。垂直方向的插值根据不同数据来源选取。

### 1) 地面气象资料。

地面气象资料仅提供网格点上单层的气象参数信息,垂直方向插值中气象参数随高程的变化规律依赖于经验关系式。对于气压,考虑其随高度呈指数变化,使用式(1)计算测站高度处的气压:

$$P = P_0 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{8.419 \times 10^{-5} \cdot (H_0 - H)}{P_0^{0.190284}} \right) \right]^{5.255303} \quad (1)$$

式中,  $P$  为测站高度处的气压;  $P_0$  为已知点处的气压,单位为 hpa;  $H_0$  为已知点处的高程;  $H$  为测站的高程,单位为 m。对于温度,认为其随高度呈线性变化,取垂直下降率为  $-6.5$  K/km,根据已知点的温度计算测站高度处的温度。ERA-Interim 地面气象资料没有直接提供相对湿度这一气象要素,可通过温度和露点温度计算获取。可以认为露点温度随高度的变化也是线性的,取  $-6.5$  K/km 作为垂直下降率,计算测站高度处的露点温度,再分别由温度和露点温度计算饱和水汽压,最终得到相对湿度<sup>[14]</sup>。

### 2) 高空气象资料。

ERA-Interim 高空气象资料按等压面分层选择气象参数,同一层网格点对应的气压相等,高程不同。为了避免高差过大引起的误差累计,在进行垂直方向插值时,首先根据目标高程判断出与气象观测站位置临近的上下两层,再在两层之间

进行各气象参数的插值计算。对于气压,ERA-Interim 高空气象资料提供了比湿,通过比湿计算虚温之后,可以计算测站高度的气压值。分别将上下两层网格点的气压插值到测站高度之后,加权计算即可求得最终的测站高度处的气压值:

$$P = P_0 \left[ 1 - \frac{\Gamma(H - H_0)}{T_{v0}} \right]^{\frac{g_0}{R_d \Gamma}} \quad (2)$$

式中,  $g_0 = 9.80665$  J/(kg · gpm);  $T_{v0}$  表示已知点的虚温(K);  $R_d = 287.05$  J/(kg · K) 为干空气的比气体常数;  $\Gamma$  为虚温下降率(K/m)。温度和相对湿度在垂直方向上线性递减,因此,在相邻两层之间采用线性插值的方式获取测站高度处的参数值。

## 3 精度分析

分别从 ERA-Interim 地面和高空气象资料中采用 §2 中方法提取了 2006~2007 年全国 24 个气象观测站的气压、温度和相对湿度。以实测的气象参数为标准,统计和分析了提取的各站气象参数的平均 bias 和 RMSD,进而利用提取的气象参数进行 GPS/PWV 计算,与实测气象参数的计算值进行了比较和分析。

### 3.1 气象参数精度统计分析

#### 1) 气压

图 2(a)给出了利用 ERA-Interim 地面和高空气象资料提取 24 个气象观测站的气压相比于实测气压的年平均 bias 和 RMSD。由图 2(a)可知,和实测气压值相比,由 ERA-Interim 高空气象资料提取的气压年均 bias 和 RMSD 均明显好于由地面气象资料提取的对应值。由地面气象资料提取的气压 24 个测站平均年均 bias 为  $-11.64$  hpa(最大值 TAIN 站 86.34 hpa,最小值 TASH 站  $-60.99$  hpa),平均 RMSD 为 20.90 hpa(最大值 TAIN 站 86.57 hpa,最小值 YONG 站 0.82 hpa);由高空气象资料提取的气压 24 个测站的平均年均 bias 为 0.08 hpa(最大值 LHAS 站 1.18 hpa,最小值 URUM 站  $-0.74$  hpa),平均 RMSD 为 0.85 hpa(最大站 TASH 站 1.71 hpa,最小值 WUHN 站 0.43 hpa)。

#### 2) 温度

图 2(b)给出了利用 ERA-Interim 地面和高空气象资料提取的 24 个气象观测站的温度相比于实测气温的年平均 bias 和 RMSD。由图 2(b)可知,对于绝大多数测站,和实测温度相比,由 ERA-Interim 地面气象资料提取的温度年平均

bias 和 RMSD 均小于由 ERA-Interim 高空气象资料提取的对应值。数值统计显示两者的差异在绝大多数测站上小于 2 K,由地面气象资料提取的 24 个测站温度平均年均 bias 为 0.05 K(最大值 DXIN 站 1.81 K,最小值 LHAS 站 -2.03 K),平均 RMSD 为 2.45 K(最大值 TASH 站 5.32 K,最小值 YONG 站 1.23 K);由高空气象资料提取的 24 个测站年平均温度 bias 为 0.82 K(最大值 DXIN 站 3.74 K,最小值 LHAS 站 -3.65 K),平均 RMSD 为 3.44 K(最大值 TASH 站 7.20 K,最小值 YONG 站 1.52 K)。

3) 相对湿度

图 2(c) 给出了利用 ERA-Interim 地面和高空气象资料提取的 24 个气象观测站的相对湿度值相比于实测相对湿度的年均 bias 和 RMSD。由图 2(c) 可知,相较于之前两个气象参数,无论是取自 ERA-Interim 地面气象资料还是高空气象资料,相对湿度与实测值的偏差均比较大,且两个数据源提取参数的精度相近。数值统计显示,地面气象资料 24 个测站的平均年均 bias 为 2.82%(最大值 LHAS 站 26.95%,最小值 DXIN 站 -8.82%),平均 RMSD 为 14.75%(最大值 LHAS 站 32.51%,最小值 YONG 站 6.66%);高空气象资料 24 个测站的平均年均 bias 为 0.13%(最大值 LHAS 站 26.35%,最小值 TAIN -16.25%),平均 RMSD 为 15.04%(最大值 LHAS 站 32.27%,最小值 YONG 站 7.09%)。

3.2 气象参数精度时空分布特征

为了分析 ERA-Interim 再分析资料在中国地区精度的时空分布特征,将 24 个气象观测站上由高空资料提取的气压,由地面资料提取的温度和相对湿度的年精度统计值,按照测站的纬度、经度和高度排列,考察了精度空间变化的特征。同时计算 24 个测站气象参数提取精度的月平均统计值,考察精度的季节性变化特征。

1) 随着测站纬度的增大,各参数精度的趋势性变化不明显。测站经度增大,3 个气象参数的精度均有提高;测站高度增加,3 个气象参数的精度均有下降。由于中国区域内地势西高东低,由以上分析可知,ERA-Interim 再分析资料在中国地区的精度东部高于西部。

2) 气压的 RMSD 在 1 a 中有波状起伏,峰值发生在 3 月,谷值发生在 9 月。温度的 bias 和 RMSD 在夏季达到最低而冬季的值相对较高。相对湿度的 bias 和温度精度的季节性变化相反,5~8 月份的值达到最高。

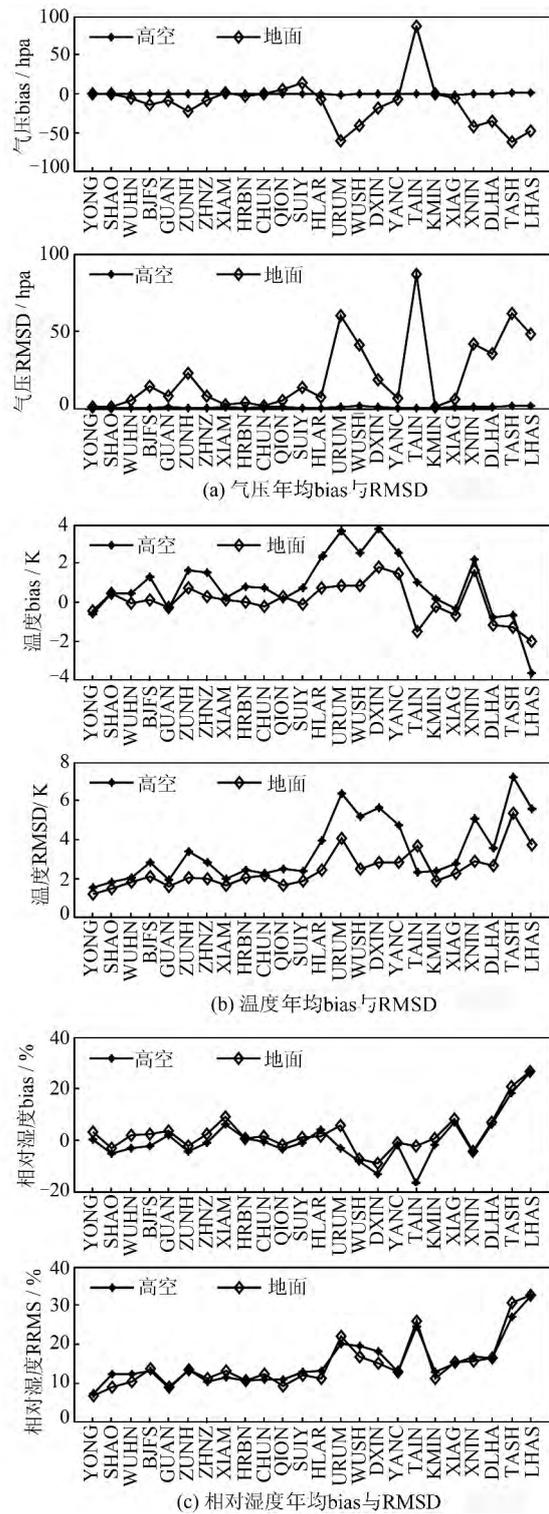


图 2 气压、温度、相对湿度年均统计

Fig. 2 Yearly Bias and RMSD Statistic of Atmosphere Pressure, Temperature and Relative Humidity

3.3 基于 ERA-Interim 的 GPS/PWV 精度分析

GPS/PWV 的计算过程如下:① 由 GPS 观测资料计算对流层天顶延迟 ZTD;② 由气象资料通过模型计算天顶干延迟 ZHD;③ 从 ZTD 扣除 ZHD,得到天顶湿延迟 ZWD;④ 根据  $PWV = \Pi \times ZWD$  可得 PWV,其中  $\Pi$  是一个与温度有关

的无量纲系数。

利用 ERA-Interim 再分析产品计算 GPS/PWV 的误差主要包括:①由气压计算 ZHD 的误差。根据误差传播定律,每 1 hpa 气压误差引起的 ZHD 误差最大约 2 mm。ERA-Interim 再分析资料计算的测站的气压与实测气压相比,最大偏差不超过 2 hpa,相应的 ZHD 误差为 4 mm,它对 PWV 的影响不超过 1 mm。②由温度计算转换因子  $\Pi$  的误差。由 ERA-Interim 再分析资料提取温度的精度平均约为 3 K,由误差传播定律可知,由此产生的  $\Pi$  的相对误差约为 1%,它对计算 GPS/PWV 的影响也不会超过 1 mm。

对 2006~2007 年中国地区 24 个测站的对流层天顶延迟 ZTD,分别用 ERA-Interim 再分析资料提取的参数和实测的气象参数计算了各自的 GPS/PWV。表 1 给出了 PWV 的年平均 bias 和 RMSD,其中气压均提取自高空气象资料,温度分别取自高空和地面气象资料。

表 1 GPS/PWV 年均 bias 和 RMSD 统计/mm

Tab.1 Yearly Bias and RMSD Statistic of GPS/PWV/mm

测站	高空资料		地面资料	
	bias	RMSD	bias	RMSD
YONG	-0.01	0.29	0.04	0.25
SHAO	0.15	0.25	0.18	0.26
WUHN	0.00	0.25	0.00	0.23
BJFS	-0.01	0.23	-0.03	0.22
GUAN	0.16	0.36	0.22	0.33
ZUNH	0.03	0.27	0.01	0.25
ZHNZ	0.05	0.30	0.01	0.27
XIAM	0.23	0.39	0.24	0.37
HRBN	-0.12	0.26	-0.14	0.25
CHUN	-0.17	0.27	-0.18	0.27
QION	0.17	0.52	0.20	0.43
SUIY	-0.02	0.22	-0.05	0.20
HLAR	-0.08	0.21	-0.11	0.21
URUM	0.32	0.53	0.23	0.51
WUSH	-0.18	0.63	-0.23	0.62
DXIN	0.24	0.37	0.20	0.33
YANC	0.05	0.29	0.03	0.27
TAIN	-0.09	0.21	-0.16	0.26
KMIN	0.02	0.29	0.06	0.28
XIAG	0.20	0.38	0.28	0.41
XNIN	-0.18	0.43	-0.15	0.39
DLHA	-0.20	0.37	-0.17	0.35
TASH	-0.40	0.7	-0.39	0.67
LHAS	-0.55	0.73	-0.44	0.64

由表 1 可知,除高空资料温度计算的 LHAS 站的年平均 bias,其余各站年平均 bias 均在 0.5 mm 以内,各站 RMSD 均在 1 mm 以内。两种温度来源计算的 PWV 差异在 0.01 mm 级。以上

分析说明对中国区域大量缺少实测气象参数的 GPS 测站来说,完全可借助 ERA-Interim 求得相应的 GPS/PWV 时间序列,且 ERA-Interim 高空再分析资料可作为唯一数据源满足精度要求。这对我国气象变化的研究具有重要的意义。

## 4 结 语

利用 2006~2007 年的 ERA-Interim 再分析资料 and 全国分布的 24 个气象观测站的实测气象资料,研究和评估了 ERA-Interim 再分析资料在中国地区获取气象参数和计算 GPS/PWV 的方法以及所能达到的精度。

1) 与实测气压相比,ERA-Interim 高空气象资料提取的气压精度较高,24 个测站平均年均 bias 为 0.08 hpa,RMSD 为 0.85 hpa。与实测温度和相对湿度相比,ERA-Interim 地面气象资料提取的参数精度较高,其中 24 个测站温度平均年均 bias 为 0.05K,RMSD 为 2.45 K,相对湿度平均年均 bias 为 2.82%,RMSD 为 14.75%。3 个参数中相对湿度的可靠性相对较低。

2) 总体上利用 ERA-Interim 提取气象参数的精度在中国东部好于西部。温度的精度夏季高于冬季,而相对湿度的偏差在夏季大于冬季。

3) 中国区域内由 ERA-Interim 再分析资料计算 GPS/PWV,和实测气象资料的计算值相比,绝大部分测站年平均 bias 小于 0.5 mm,RMSD 小于 1 mm。ERA-Interim 高空资料与地面资料提取的温度引起的 PWV 的差异很小。

致谢:感谢欧洲中尺度天气预报中心以及中国国家气象局提供相关数据资料。

## 参 考 文 献

- [1] Bevis M, Businger S, Heming T A, et al. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(D14): 15 787-15 801
- [2] Schueler T. On Ground-based GPS Tropospheric Delay Estimation[D]. Munich:Bundeswehr University Munich, 2001
- [3] Bai Zhengdong, Feng Yanming. GPS Water Vapor Estimation Using Interpolated Surface Meteorological Data from Australian Automatic Weather Stations[J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2003, 2:83-89

- [4] Wang Junhong, Zhang Liangying, Dai Aiguo, et al. A Near-global, 2-hourly Data Set of Atmospheric Precipitable Water from Ground-based GPS Measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D11107
- [5] Jade S, Vijayan M. GPS-based Atmospheric Precipitable Water Vapor Estimation Using Meteorological Parameters Interpolated from NCEP Global Reanalysis Data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: D03106
- [6] Andrei C O, Chen Ruizhi. Assessment of Time-series of Troposphere Zenith Delays Derived from the Global Data Assimilation System Numerical Weather Model[J]. *GPS Solutions*, 2009, 13: 109-117
- [7] Li Chuan, Zhang Yanjun, Chen Jing. Climatic Change of Qinghai-Xizang Plateau Region in Recent 40-year Reanalysis and Surface Observation Data—Contrast of Observational Data and NCEP, ECMWF Surface Air Temperature and Precipitation[J]. *Plateau Meteorology*, 2004, 23: 98-103(李川, 张廷军, 陈静. 近 40 年青藏高原地区的气候变化—NCEP 和 ECMWF 地面气温及降水再分析和实测资料对比分析[J]. 高原气象, 2004, 23: 98-103)
- [8] He Lang, Wu Hongbao, Zhao Xiaochuan. A Comparison of Basic Statistics Derived from NCEP/NCAR, ECMWF Reanalysis Data and CMA Data[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2009, 31(1): 54-63(何浪, 吴洪宝, 赵晓川. 三种再分析资料基本统计量比较[J]. 南京气象学院学报, 2009, 31(1): 54-63)
- [9] Zhao Tianbao, Fu Congbin. Applicability Evaluation for Several Reanalysis Datasets Using the Upper-air Observations over China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(3): 634-648 (赵天保, 符凉斌. 应用探空观测资料评估几类再分析资料在中国区域的适用性[J]. 大气科学, 2009, 33(3): 634-648)
- [10] Zhu Yanliang, Ling Chao, Chen Hongbin, et al. Comparison of Two Reanalysis Data with the RS92 Radiosonde Data[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2012, 17(3): 381-391(朱彦良, 凌超, 陈洪滨, 等. 两种再分析资料与 RS92 探空资料的比较分析[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(3): 381-391)
- [11] Li Ruiqing, Lv Shihua, Han Bo, et al. Preliminary Comparison and Analyses of Air Temperature at 2 m Height Between Three Reanalysis Datasets and Observation in the East of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(6): 1 488-1 502(李瑞青, 吕世华, 韩博, 等. 青藏高原东部三种再分析资料与地面气温观测资料的对比分析[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1 488-1 502)
- [12] Chen Qinming, Song Shuli, Stefan H, et al. Assessment of ZTD Derived from ECMWF/NCEP Data over China[J]. *GPS Solutions*, 2011, 15(4): 415-425
- [13] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137: 553-597
- [14] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Beijing University Press, 2003(盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003)

## Accuracy Assessment of Applying ERA-Interim Reanalysis Data to Calculate Ground-based GPS/PWV over China

ZHAO Jingyang<sup>1,2</sup> SONG Shuli<sup>1</sup> ZHU Wenyao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract:** Meteorological parameters are needed when ground-based GPS is used for the detection of PWV (precipitable water vapor). However, a large amount of GPS data has not been sufficiently used because of the lack of related meteorological data. In this paper, the methods and feasibility of deriving meteorological parameters from ERA-Interim reanalysis data and calculating GPS/PWV with the extracted parameters in China are assessed. The atmospheric pressure, temperature and relative humidity derived from ERA-Interim are compared with meteorological observation data at 24 meteorological stations.

(下转第 1008 页)

## An Improved Non-linear Masking Algorithm for HDR Image Tone Reproduction

ZHU Ming<sup>1</sup> LIU Zhen<sup>2</sup> LI Xiaochun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Materials and Chemical Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China

<sup>2</sup> College of Communication and Art Design, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract:** A new tone-reproduction algorithm for high-dynamic-range (HDR) images is proposed in this paper. The image color appearance model is good at predicting color appearance of images, so the calculation frame of the new algorithm is based on the latest image color appearance model iCAM06. The tone-compression function of iCAM06 was improved significantly. The Hyperbola tone-compression function of iCAM06 was replaced by the tone-compression function based on the improved non-linear masking, and the new tone-compression function was used for tone-compression of the base layer image. In addition, in the rendering process of the HDR images, the new algorithm introduced the "Hunt effect" and "Stevens effect" predicting model proposed previously. Finally, the subjective evaluation test and DRI model were used to evaluate preference and scene-reproduction accuracy of the new algorithm respectively. The result of the evaluation test shows that the new algorithm has a very good effect on preference and scene-reproduction accuracy.

**Key words:** high dynamic range images; tone reproduction; non-linear masking; image color appearance model

**First author:** ZHU Ming, PhD, specializes in the theory and application of color reproduction. E-mail: 115457719@qq.com

**Corresponding author:** LI Xiaochun, PhD, professor. E-mail: lxc888@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 61301231; the Doctoral Science Foundation of Henan Institute of Engineering, No. D2012027.

.....  
(上接第 939 页)

logical stations from 2006 to 2007, and the GPS/PWV calculated from the two data sets are also contrasted. Results are as follows: ① Atmospheric pressure derived from upper-air reanalysis data, temperature and relative humidity derived from surface reanalysis data, has relatively high precision. ② The reanalysis parameters and meteorological observation data comparisons at 24 stations show a mean bias of 0.08 hpa and a RMSD of 0.85 hpa with atmospheric pressure, a mean bias of 0.05 K and a RMSD of 2.45 K with temperature, a mean bias of 2.82% and a RMSD of 14.75% with relative humidity. ③ The ERA-Interim reanalysis data is more reliable in the east of China than in the west. The precision of temperature and relative humidity data show seasonal variation. ④ As compared with GPS/PWV calculated by the meteorological observation data, the GPS/PWV calculated by the ERA-Interim data give a mean difference of less than 0.5 mm and a RMSD of less than 1 mm.

**Key words:** ERA-Interim; meteorological parameter; GPS/PWV; accuracy assessment

**First author:** ZHAO Jingyang, PhD candidate, specializes in space geodesy and GNSS meteorology. E-mail: jyzhao7@gmail.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 10603011, 11273048; the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 2009AA12Z307.