



# 黄土高原地区PWV影响因素分析及精度评定

杨鹏飞<sup>1</sup> 赵庆志<sup>1</sup> 苏 静<sup>1</sup> 姚宜斌<sup>2</sup>

1 西安科技大学测绘科学与技术学院,陕西 西安,710054

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

**摘 要:**大气水汽是对流层的重要组成部分之一,研究影响水汽的因素及精度具有重要意义。主要研究黄土高原地区大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)的影响因素,并对其实际精度进行评估。首先,对ERA5(the fifth-generation atmospheric reanalysis data of ECMWF)的气压、气温数据和全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)获取的天顶对流层延迟(zenith troposphere delay, ZTD)进行评定;然后,依据ERA5的气压、气温数据和GNSS的ZTD数据计算1 h分辨率的PWV,并利用误差传播理论推导PWV的理论误差;最后,与PWV实际计算误差进行对比,分析黄土高原地区PWV的精度。结果表明,基于GAMIT/GLOBK软件获得的GNSS ZTD与PANDA软件解算的GNSS ZTD差值的均方根(root mean square, RMS)和Bias分别为4.05 mm和-0.46 mm;ERA5气压和气温的平均RMS和Bias分别为3.36 hPa/1.97 K和-0.01 hPa/0.04 K;黄土高原地区PWV的理论误差为1.51 mm,实际误差为1.94 mm。计算得到的PWV精度较高,对水汽分布以及气候监测的研究具有重要意义。

**关键词:**大气可降水量;精度评定;黄土高原;全球导航卫星系统

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

大气水汽是对流层的重要组成部分,它影响着全球的能量、水循环以及气候变化等相关活动<sup>[1-2]</sup>。及时准确地了解大气水汽在全球范围的高时空分布已经逐渐成为全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)气象学领域的研究热点之一,大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)是研究大气水汽含量的一项重要指标。PWV是指从地表至对流层顶部单位截面积空气柱中包含的总水汽含量,通常用来反映大气水汽在对流层中的分布和变化,快速了解大气可降水量的变化对于分析水汽分布具有重要意义<sup>[3]</sup>。由于传统水汽监测技术的不足,因此往往难以获得高时空分辨率的PWV来实现水汽分布监测<sup>[4]</sup>。自20世纪90年代Bevis等<sup>[5-6]</sup>、Rocken等<sup>[7]</sup>和Tregoning等<sup>[8]</sup>提出了GNSS气象学以来,基于全球导航卫星系统反演PWV逐渐成为获取大气水汽的主要手段。由于GNSS具有全天候、高精度、高时空分辨率和低成本的优点,因此被广泛用于PWV的计算<sup>[9]</sup>。如Zhao

等<sup>[10]</sup>、Zhang等<sup>[11]</sup>分别计算了全球与中国范围内的GNSS PWV。

为了更好地应用GNSS PWV,对其精度评定及其影响因素进行分析变得极其重要。李成才等<sup>[12]</sup>计算了上海和武汉地区在暴雨期间的GPS PWV,并将获取的数据与无线电探空获取的数据进行对比,计算得到的均方根(root mean square, RMS)值为5 mm。陈俊平等<sup>[13]</sup>比较了水汽辐射计观测数据和GPS观测数据得到的PWV,发现两者差值平均值为0.03 mm,均方差为0.02 mm。Ning等<sup>[14]</sup>分析了GNSS PWV中的所有相关误差源。提出统计分析和理论分析两种方法去评估PWV的不确定度,结果表明,天顶对流层延迟(zenith troposphere delay, ZTD)对PWV的影响占PWV总不确定度的75%以上。Zhao等<sup>[10]</sup>依据国际GNSS服务组织(International Global Navigation Satellite System Service, IGS)的ZTD数据计算获得了全球范围内精度为1.30 mm的PWV时间序列,其中,ZTD、气压和大气加权平

收稿日期:2020-07-29

项目资助:国家自然科学基金(41904036);中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司科技项目(XBY-2016-10, XBY-KJ-2019-06, XBY-KJ-2021-14)。

第一作者:杨鹏飞,硕士,主要从事GNSS空间环境与气候变化相关研究。ypf0323@163.com

通讯作者:赵庆志,博士,副教授。zhaoqingzhia@163.com

均温度误差引起的 PWV 误差约为 1~1.50 mm, 表明 PWV 精度主要受到 ZTD、气压和大气平均温度的影响。Zhao 等<sup>[15]</sup>依据 ERA5 中的气象数据和中国大陆构造环境监测网络 (crustal movement observation network of China, CMONOC) 的 ZTD 数据计算了中国区域的 PWV 时间序列, 通过对其评估发现中国四大地理区域 PWV 的平均 RMS 值小于 3 mm。尽管许多学者评估了 PWV 的精度, 但是对影响 PWV 的各项因子的不确定研究相对较少。

为了探究各项因子对 PWV 精度的影响程度, 本文以黄土高原地区为例, 研究该地区 PWV 影响因素及其精度。首先, 对 ERA5 的气象因子进行精度评定, 依据 ERA5 气象因子与 GNSS ZTD 数据计算 1 h 分辨率的 PWV; 然后, 依据误差传播定理公式计算 PWV 理论误差, 并分析影响 PWV 精度的各项因子的不确定度; 最后, 分析 PWV 在黄土高原区域的实际精度。该研究可为黄土高原地区水资源可持续利用、短期天气预报和灾害预警与防治提供高精度的数据参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据描述

GNSS 观测资料来自 CMONOC 并使用 GAMIT/GLOBK (10.4 版本) 软件进行处理<sup>[16]</sup>。中国地壳运动观测网络建于 1997—2000 年, 为 GNSS 气象学等领域提供高精度的观测资料。在此基础上 CMONOC 也于 2011 年投入观测, 包含大量卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR)、甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI)、重力及 GNSS 测站, 其中 GNSS 测站中包含 260 个基准站以及约 2 000 个非连续观测站<sup>[17]</sup>。本文中使用的 ZTD 数据为 1 h 分辨率, 由于时间序列的残缺, 最终选择黄土高原地区 33 个 GNSS 站点处的 2014—2017 年数据进行使用。

ERA-Interim 与 ERA5 数据分别为 ECMWF 中的第 4 代与第 5 代数据集, 包含 1979 年至今 2~3 个月的数据集, 原始数据可通过 <https://www.ecmwf.int/> 免费下载, ECMWF 的这两类产品均提供了不同时空分辨率的气压、气温与 PWV 等格网气象数据, 其中, ERA-Interim 数据集时间分辨率为 6 h<sup>[18]</sup>, ERA5 数据集时间分辨率为 1 h。

本文选择无线电探空数据来验证 ERA5 中的  $P$  和  $T$  与 GNSS PWV 的精度。无线电探空仪数

据来自集成的全球无线电探空仪存档版本 2 (IGRA2) 数据集。IGRA2 是由美国国家气候数据中心于 2016 年生成, 它比之前的数据集 (IGRA1) 包含更多的无线电探空站。该数据集包括气压、气温、相对湿度和其他参数, 时间分辨率为每天 2 次或 4 次 (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/igra>)。本实验选取黄土高原地区的 8 个探空站点, 黄土高原地区 GNSS 站与无线电探空 (radio sonde, RS) 站分布如图 1 所示。

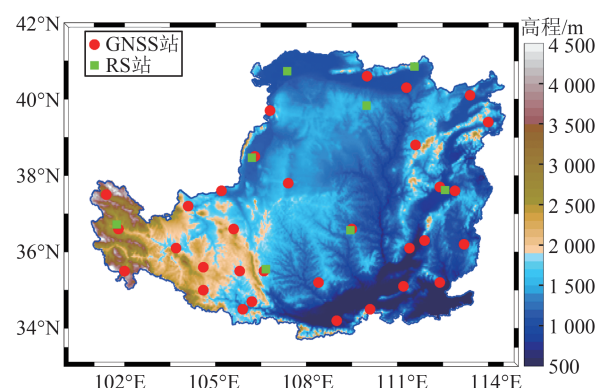


图 1 黄土高原地区 GNSS 和 RS 站点分布图

Fig.1 Distribution of GNSS and RS Stations in Loess Plateau

### 1.2 研究方法

ERA5 的地形高度为位势, 首先, 参照 Wang 等<sup>[19]</sup>和 Zhao 等<sup>[20]</sup>的方法将 ERA5 的位势转换为位势高; 其次, 将位势高转换为正高; 然后, 对 ERA5 格网的气压与气温数据利用双线性插值获取 GNSS 站点的气压、气温数据, 并对其进行高程改正<sup>[21]</sup>:

$$\begin{cases} P = P_0 (1 - 0.000\,022\,6(h - h_0))^{5.225} \\ dT/dh = -0.006\,5\,^{\circ}\text{C}/\text{m} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $P$  为站点的气压数据;  $P_0$  为格网点的气压数据;  $h$  为站点高;  $h_0$  为格网高;  $dT$  为站点温度与格网温度的差值;  $dh$  为站点高与格网高的差值。

利用高程改正后的 GNSS 站点处的气压, 依据 Saastamoinen 模型计算出 GNSS 站点的天顶静力延迟 (zenith hydrostatic delay, ZHD)<sup>[22]</sup>, 利用 ZTD 与 ZHD 可获得天顶湿延迟 (zenith wet delay, ZWD)。在获得 ZWD 后, 进行 PWV 的计算:

$$\begin{cases} \text{ZHD} = \frac{0.002\,277P}{1 - 0.002\,66 \cos(2\varphi) - 0.000\,28H} \\ \text{ZWD} = \text{ZTD} - \text{ZHD} \\ \text{PWV} = \frac{10^6}{(K_2' + K_3/T_m) R_v \rho} \text{ZWD} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $P$  为地表气压;  $\varphi$  为纬度;  $H$  为大地高;  $\rho$  为

水汽的密度; $K_3=(3.776 \pm 0.014) \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$ ;  $K'_2=16.48 \text{ K/hPa}$ ;  $R_v=461 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T_m$ 是大气加权平均温度,本文依据Huang等<sup>[23]</sup>改进的中国 $T_m$ 模型IGPT2w(improved global pressure and temperature 2 wet)获得。

## 2 PWV理论影响因素分析

### 2.1 基于CMONOC的GNSS ZTD数据分析

为了验证基于GAMIT/GLOBK(version 10.4)软件得到的GNSS ZTD与其他软件处理的一致性,本文还与基于PANDA软件采用精密单点定位技术计算得到的ZTD<sup>[24-25]</sup>进行了对比。PANDA软件自2001年起由武汉大学卫星导航定位技术研究中心自主开发,并被国际多家著名

研究机构采用,其目标是实现对GNSS/SLR/DORIS/VLBI等各类观测数据的后处理和实时处理分析<sup>[26]</sup>。本文中基于PANDA软件得到的ZTD数据采用Zhang等<sup>[27]</sup>依据PANDA软件计算得到的中国区域内的ZTD产品,其通过与IGS的ZTD对比发现,RMS为3.90 mm,最小值和最大值分别为2.70 mm和6.40 mm。本文选择黄土高原地区33个GNSS站点处的两种软件获得的ZTD进行对比,将ZTD时间序列中大于3倍中误差的数据进行剔除。图2给出了使用GAMIT/GLOBK和PANDA软件计算的2014—2017年GNSS的ZTD差值的RMS和Bias分布。从图2可以看出,两种软件所获得的GNSS的ZTD相差较小,据统计33个站点处的平均RMS和Bias分别为4.05 mm和-0.46 mm。

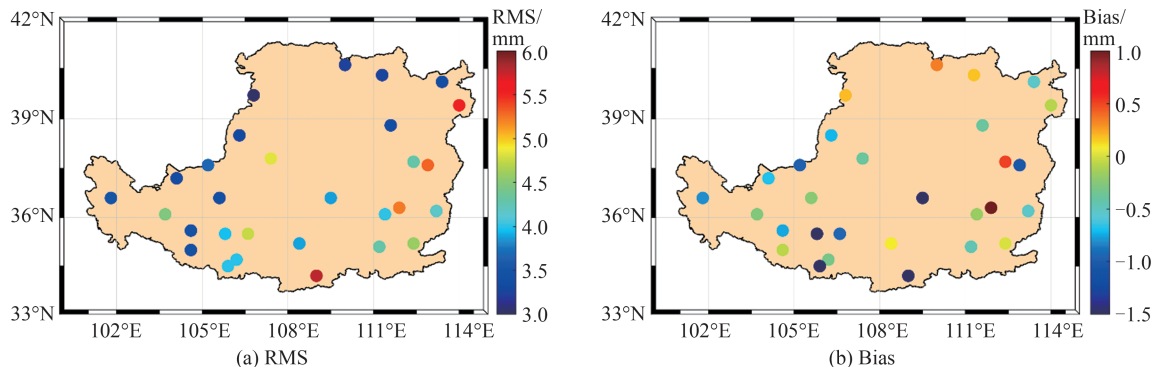


图2 2014—2017年两类软件解算的GNSS ZTD差值的RMS和Bias分布

Fig.2 RMS and Bias Distribution of GNSS ZTD Difference Calculated by Two Types of Softwares from 2014 to 2017

### 2.2 ECMWF气象参数的对比分析

#### 2.2.1 格网间气象参数对比

为分析ERA5数据集中气压与气温的精度,本文对比了ERA5与ERA-Interim格网间的气压与气温,由于两种数据集均属于再分析数据资料,因此本节主要讨论二者之间的差异。图3给出了ERA5与ERA-Interim格网间气压与气温的标准差(standard deviation, STD)与Bias。从图3可以看出,两种数据集的气压与气温的STD相对较小,气压的Bias较大,说明两种数据集中的气压相差较大,出现这一现象的可能原因是由于该地区高程差异及两类数据集的格网高不同所导致。据统计,两种数据集的气压差值的STD为0.51 hPa,气温差值的STD为1.29 K;气压差值的Bias为-2.12 hPa,气温差值的Bias为0.08 K。由于ERA5的时间分辨率高于ERA-Interim,因此后续使用ERA5进行研究。

#### 2.2.2 站点间气象参数对比

依据3倍中误差法对数据进行粗差剔除并保证站点的数据利用率大于85%,选择黄土高原地区8个RS站点处的气压与气温数据对基于ERA5获得的气压、气温数据进行精度评定。

8个站点所对应的站点经纬度及高程信息见表1。图4给出了黄土高原地区8个站点处气压与气温的RMS和Bias分布图。从图4可以看出,气压与气温的对比结果整体较好,气压的结果差于气温,导致这一现象的主要原因是高程变化对气压的影响高于气温。在部分站点处气压与气温的RMS值和Bias值均较大,出现这一现象的主要原因是这些站点对应的原始格网数据质量相对较差。据统计,8个站点处的气压的平均RMS为3.36 hPa,气温的平均RMS为1.97 K;气压的平均Bias为-0.01 hPa,气温的平均Bias为0.04 K。由此可知,基于ERA5的气压、气温数据的精度相对较好,可应用于1 h分辨率PWV的计算。



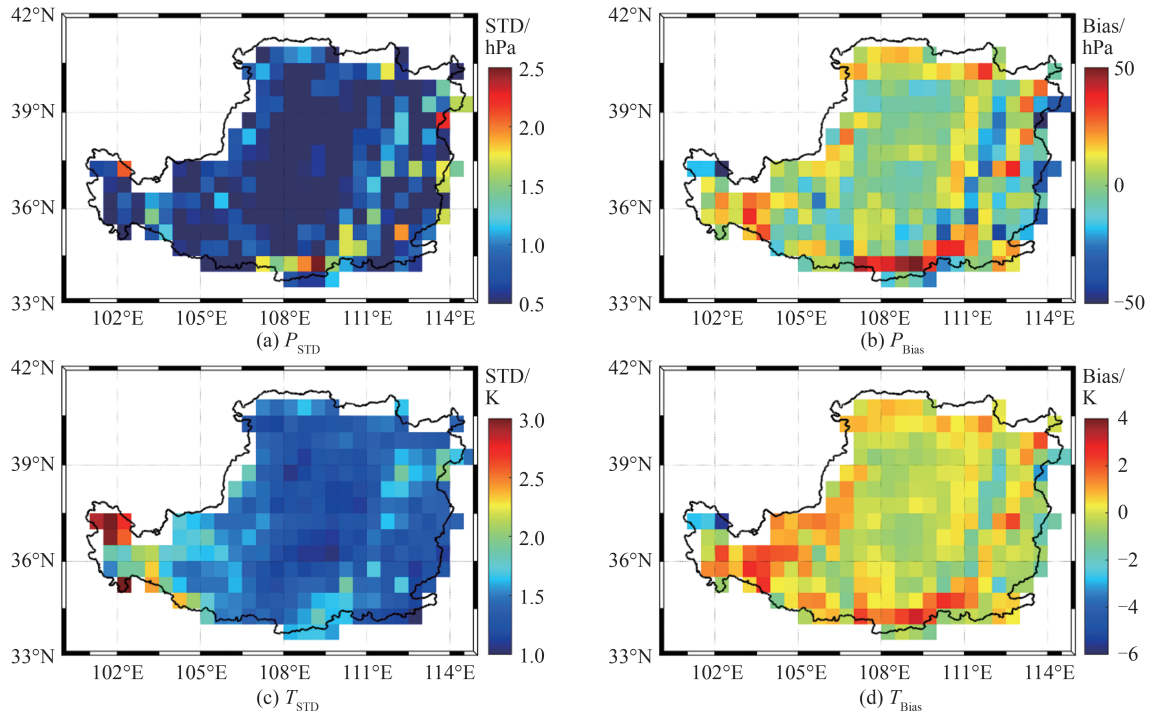


图3 ERA5与ERA-Interim格网间气压与气温的STD与Bias分布图

Fig.3 STD and Bias Distribution of Pressure and Temperature Between ERA5 and ERA-Interim

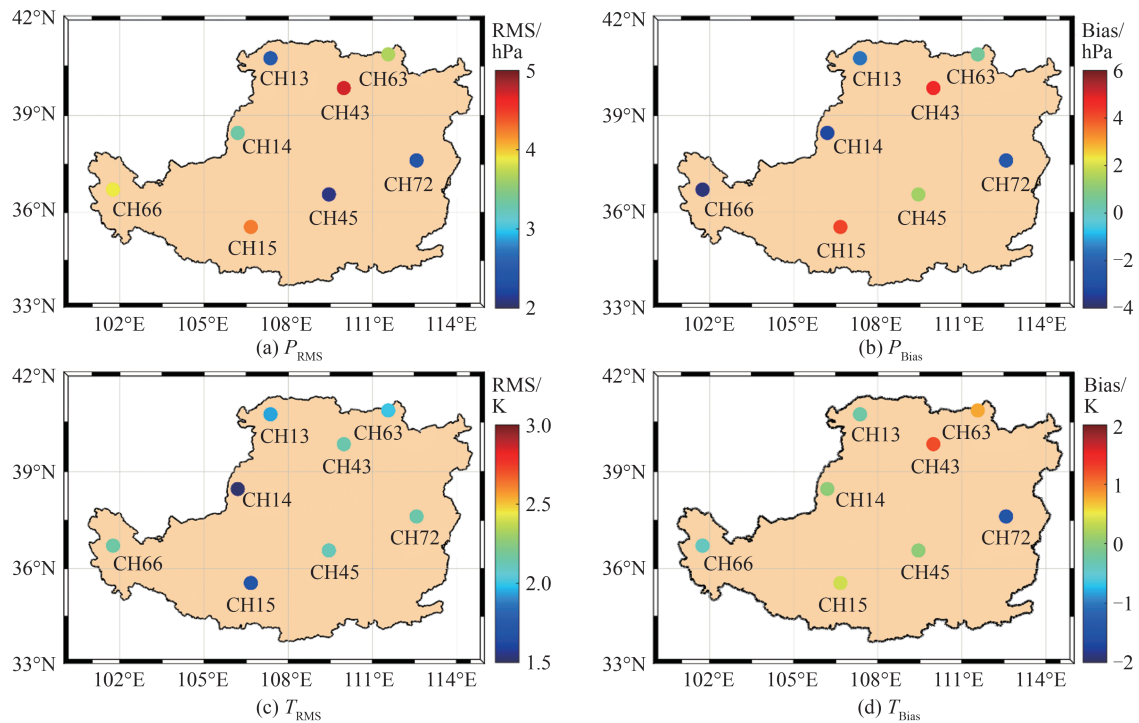


图4 ERA5与RS站点间气压与气温的RMS和Bias分布图

Fig.4 RMS and Bias Distribution of Pressure and Temperature Between ERA5 and RS Stations

### 2.3 黄土高原地区 PWV 理论精度分析

由PWV的计算公式可知PWV精度受到多个因子的影响,通过误差传播定律,依据各项影响因子的精度值,可推算出PWV的理论精度值<sup>[14]</sup>。下面分别给出ZHD、转换系数Q、PWV的

不确定度的计算方式。

1)ZHD数据的不确定度。ZHD的精度主要受气压和常数 $c$ 的不确定性影响,1 hPa的地表气压约对ZHD产生0.20 mm的误差影响<sup>[28]</sup>,ZHD的不确定度计算如下<sup>[14]</sup>:



表1 站点经纬度与高程信息

Tab.1 Station Longitude and Latitude and Elevation Information

站点名	纬度/(°)	经度/(°)	高程/m
CH66	36.716 7	101.750 0	2 296.00
CH63	40.850 0	111.566 7	1 153.50
CH13	40.733 3	107.366 7	1 041.00
CH43	39.833 3	109.983 3	1 459.00
CH14	38.466 7	106.200 0	1 112.00
CH72	37.620 6	112.576 7	776.00
CH45	36.566 7	109.450 0	958.90
CH15	35.550 0	106.666 7	1 348.00

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{\text{ZHD}} &= \sqrt{\left( \frac{2.276\,7\sigma_{P_0}}{f(\lambda, H)} \right)^2 + \left( \frac{P_0\sigma_c}{f(\lambda, H)} \right)^2} \\ f(\lambda, H) &= (1 - 2.66 \times 10^{-3} \cos(2\varphi) - 2.8 \times 10^{-7} H) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中,  $P_0$  为站点处的气压值(单位:hPa);  $\sigma_{P_0}$  为气压的误差;  $\sigma_c = 0.002\,4$ , 常数  $c$  的不确定度参照 Zhao 等<sup>[15]</sup> 研究中所使用的数值;  $\lambda$  和  $H$  分别是站点纬度和大地高。

$$\sigma_v = \sqrt{\left( \frac{\sigma_{\text{ZTD}}}{Q} \right)^2 + \left( \frac{2.276\,7\sigma_{P_0}}{f(\lambda, H)Q} \right)^2 + \left( \frac{P_0\sigma_c}{f(\lambda, H)Q} \right)^2 + \left( V \frac{\sigma_Q}{Q} \right)^2} \quad (5)$$

式中,  $\sigma_v$ 、 $\sigma_{\text{ZTD}}$ 、 $\sigma_{P_0}$ 、 $\sigma_Q$  分别代表 PWV、ZTD、气压、转换系数  $Q$  的误差;  $V$  代表 PWV;  $\sigma_c = 0.002\,4$ 。

依据上述各项因子的不确定度计算式可获得各项因子对 PWV 所引起的误差影响。通过计算可知, 转换因子  $Q$  的误差约为 2.26,  $P$  的误差约为 3.36 hPa, ZHD 的误差约为 2.79 mm, ZTD 的误差约为 4.05 mm。其中, ZTD 的误差由 Zhang 等<sup>[27]</sup> 利用 PANDA 软件获得的 ZTD 进行对比得到, ZHD 与  $Q$  的误差分别由式(3)和式(4)计算获得。

由上述计算结果可知, ZTD 对 PWV 的理论误差影响最大, 其次是 ZHD。而造成 ZHD 出现误差的主要原因是气压的误差相对较大, 造成  $Q$  出现误差的主要原因是大气加权平均温度存在误差。将上述各因子的误差值代入式(5)可得, 黄土高原地区 PWV 的理论精度值为 1.51 mm。

### 3 PWV 实际精度分析

#### 3.1 GNSS PWV 与 RS PWV 对比分析

为确定黄土高原地区 GNSS PWV 数据集的精度, 依据 RS 站的 PWV 数据对其进行精度评定。对基于 ERA5 气象参数与 CMONOC ZTD

2) 转换系数  $Q$  的不确定度。转换系数  $Q$  与  $Q$  的不确定度的计算公式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} Q &= 1 \times 10^{-6} \rho_w R_w \left( k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \\ \sigma_Q &= 1 \times 10^{-6} \rho_w R_w \sqrt{\left( \frac{\sigma_{k_3}}{T_m} \right)^2 + \sigma_{k'_2}^2 + \left( k_3 \frac{\sigma_{T_m}}{T_m^2} \right)^2} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中,  $\rho_w$  为液态水的密度;  $k'_2 = 16.48$  K/hPa;  $k_3 = (3.776 \pm 0.014) \times 10^5$  K<sup>2</sup>/hPa;  $R_w = 461$  J/(kg·K);  $T_m$  是大气加权平均温度;  $\sigma_Q$ 、 $\sigma_{k_3}$ 、 $\sigma_{k'_2}$  和  $\sigma_{T_m}$  分别为转化系数  $Q$ 、常数  $k_3$ 、 $k'_2$  和大气加权平均温度  $T_m$  的误差。其中, 液态水的密度  $\rho_w$  的不确定度<sup>[29]</sup> 为 0.002 kg/m<sup>3</sup>,  $R_w$  的不确定度为 0.008 J/(kg·K) (<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>), 由于来自这两个参数的影响较小(小于  $Q$  总不确定度的 0.1%), 因此  $Q$  的不确定度取决于  $T_m$ 、 $k_3$  和  $k'_2$  的不确定度<sup>[14]</sup>。

3) PWV 的不确定度。根据误差传播定律, PWV 的不确定度<sup>[14,28]</sup> 计算如下:

获得的 2014—2017 年的 GNSS PWV 与 RS PWV 利用 3 倍中误差对数据进行粗差剔除, 并保证每个站点的数据利用率均在 85% 以上。通过对数据进行粗差处理后, 选择黄土高原地区的 5 个 GNSS 与 RS 并址站进行对比。图 5 给出了 2014—2017 年 GNSS PWV 与 RS PWV 的 RMS 和 Bias 分布图。从图 5 可以看出, 除 XNIN 站以外, 其余站点处的 RMS 值均小于 3 mm, 出现这一现象的主要原因是该站点位于青藏地区, 高程差异较大, 气压与气温的数据质量较差, 因此导致该站点的 PWV 精度相对较低。据统计, 图 5 中 5 个站点处的 GNSS PWV 与 RS PWV 的平均 RMS 和 Bias 分别为 1.94 mm 和 0.72 mm, 由此可知, PWV 的实际精度低于理论精度, 主要原因是由于 ERA5 为再分析资料与实际值有一定差距, 并且 RS PWV 本身也存在着一定误差, 因此最终导致 PWV 的实际精度值低于理论精度值。为了清晰地描述 GNSS PWV 与 RS PWV 的长时序变化, 图 6 给出了 GSPL 站与 SNYA 站 2014—2017 年 GNSS PWV 与 RS PWV 的长时序变化。

由图 6 可知, GNSS PWV 和 RS PWV 的变化趋势一致, 故基于 ERA5 气象参数与 CMONOC ZTD 所获得的 GNSS PWV 具有较高精度。

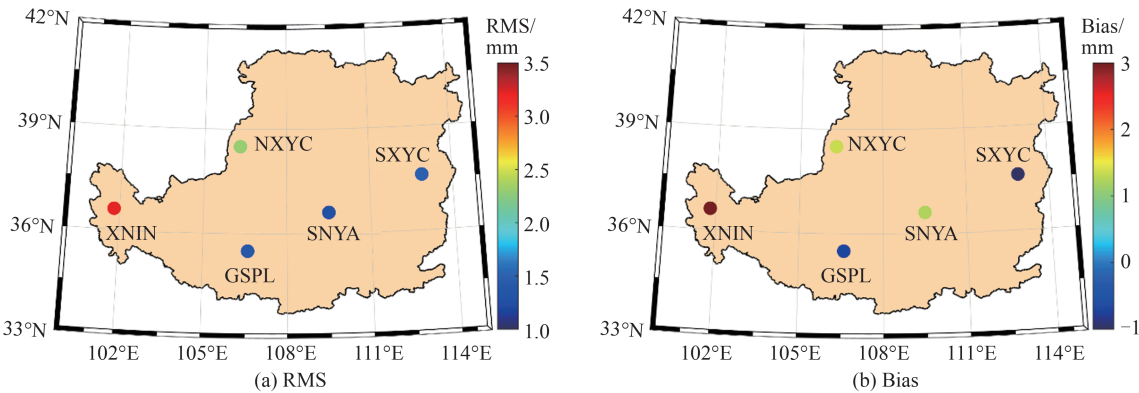


图5 2014—2017年GNSS PWV与RS PWV的RMS与Bias分布图  
Fig.5 RMS and Bias Distribution of GNSS PWV and RS PWV from 2014 to 2017

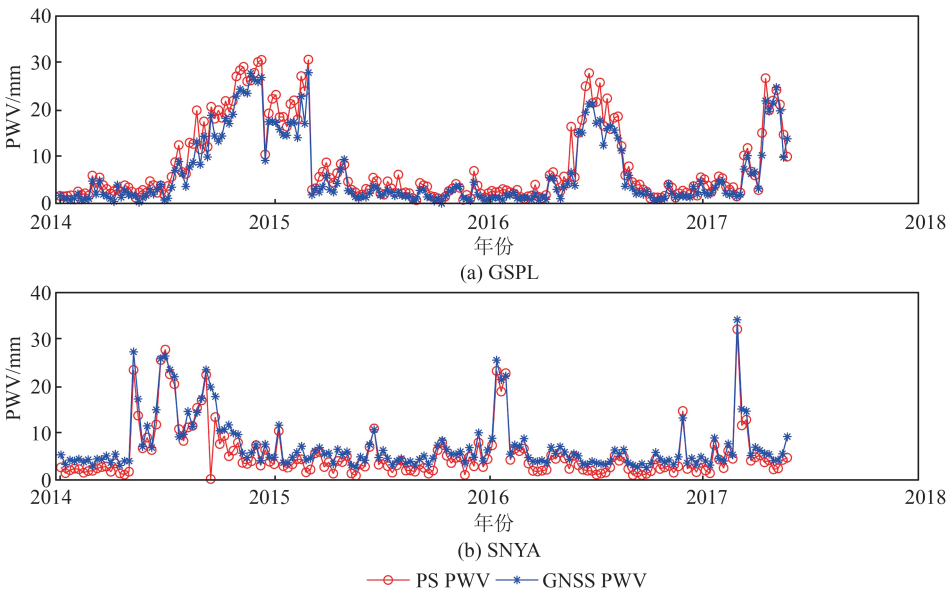


图6 2014—2017年期间测站GSPL与SNYA位置处的RS PWV与GNSS PWV长时序图  
Fig.6 RS PWV and GNSS PWV Long Time Series of Stations GSPL and SNYA from 2014 to 2017

3.2 GNSS PWV与ERA5 PWV对比分析

为进一步确定GNSS PWV的精度,利用狄洛尼三角网法将2016年GNSS站点的PWV数据插值为整个黄土高原地区的面状PWV,与ERA5的格网PWV数据进行对比。图7给出了2016年GNSS PWV与ERA5 PWV及二者差值的分布图。分别按照春、夏、秋、冬4个季节进行分析,图7(a)为4个季节的ERA5 PWV分布,图7(b)为4个季节的GNSS PWV分布,图7(c)为4个季节ERA5 PWV与GNSS PWV的差值分布。

从图7可以看出,PWV的分布在春季到冬季之间也有很大差异。比较GNSS PWV和ERA5 PWV可以看出,其分布总体上是一致的,在每个季节ERA5和GNSS的PWV数据都有一定的差值,但是在各个季节大多数地区的差值均在5 mm以下,因此基于ERA5气象参数和

CMONOC ZTD获得的黄土高原地区的GNSS PWV数据具有较好的精度。此外,在个别区域可以发现ERA5 PWV与GNSS PWV的差值较大,这可能是由于GNSS站不均匀所导致。

表2给出了GNSS PWV与ERA5 PWV及二者差值分别在4个季节的均值,同样可知二者相差较小,进而说明GNSS PWV的精度相对较高。

表2 2016年GNSS PWV与ERA5 PWV及二者差值分别在4个季节的均值/mm			
Tab. 2 Mean Values of GNSS PWV and ERA5 PWV and Their Difference, Respectively in Four Seasons/mm			
季节	ERA5	GNSS	差值
春季	12.78	12.44	−0.31
夏季	18.05	15.87	−2.19
秋季	14.62	15.14	0.53
冬季	6.13	5.28	−0.85

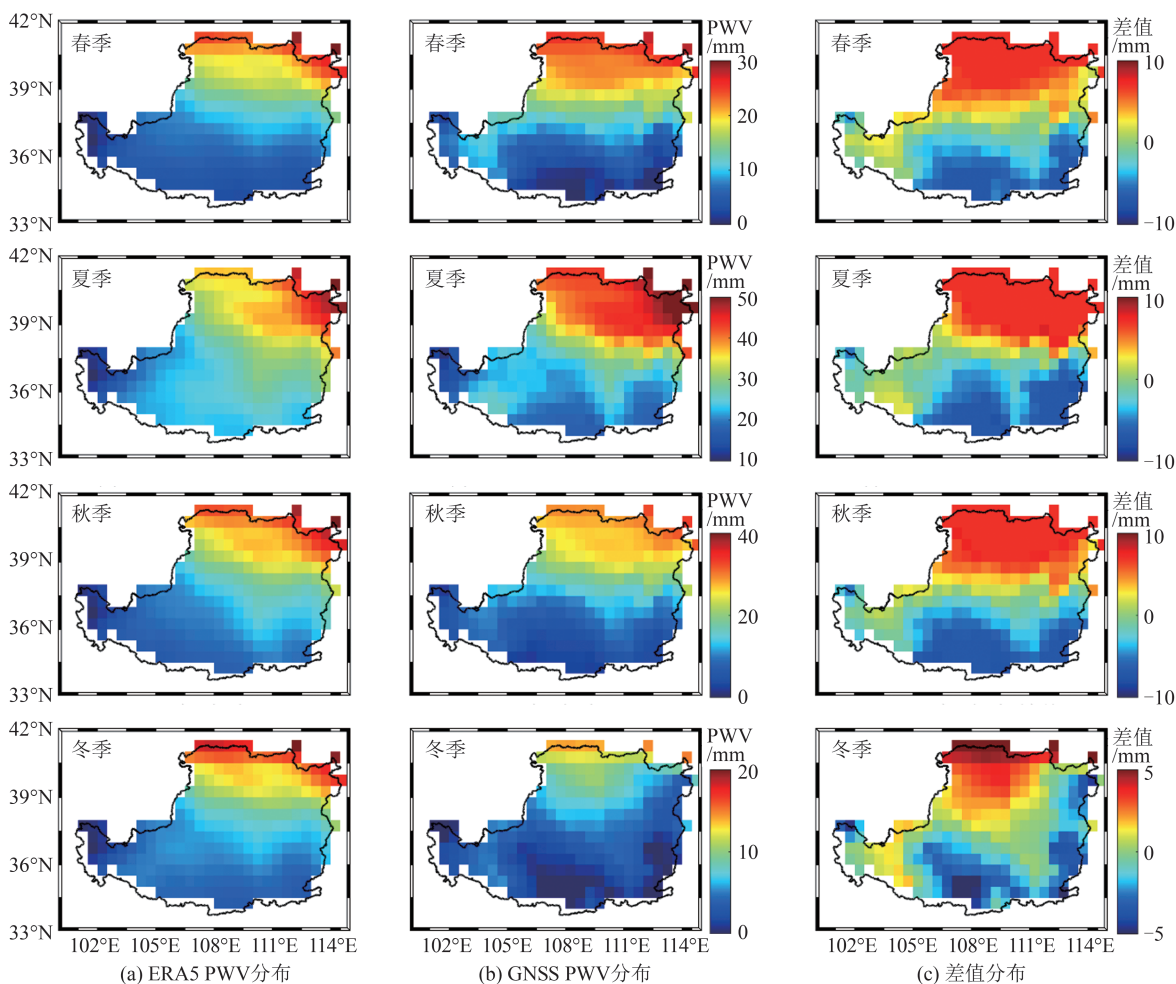


图7 2016年GNSS PWV与ERA5 PWV对比分布图

Fig.7 Comparative Distribution of GNSS PWV and ERA5 PWV in 2016

## 4 结 语

大气水汽的快速变化对区域水汽循环和气候变化具有重要意义,因此,对于PWV的影响因素的分析及精度评估变得尤为重要。本文重点研究黄土高原地区GNSS PWV的理论精度与实际精度,分析了影响PWV精度的各因子的不确定度。理论误差的计算主要依据误差传播定理进行研究,实际误差的计算是以RS数据资料为标准来验证GNSS PWV的精度。

通过本文的研究最终得到如下结论:(1)ERA5和ERA-Interim两类数据集的气压在个别区域相差较大,气温整体相差较小。通过利用RS数据集中的气压与气温对ERA5气压与气温的评定发现,气压的平均RMS为3.36 hPa,气温的平均RMS为1.97 K;气压的平均Bias为-0.01 hPa,气温的Bias为0.04 K。(2)影响PWV理论精度的最大影响因素为ZTD,其次为ZHD与转换系数Q,通过PWV的不确定度公式计算得到黄土高原地区PWV的理论精度为1.51 mm,低

于PWV的实际精度1.94 mm,出现该现象的主要原因是ERA5为再分析资料,与真实值存在一定差距,RS数据资料本身也存在一定误差。(3)分析2016年期间4个季节的GNSS PWV和ERA5 PWV发现,二者整体相差较小,在个别区域相差较大,主要原因可能是由于GNSS站点不均匀所导致。

基于ERA5气象参数和CMONOC ZTD获得的GNSS PWV精度较好,且具有较高的时间分辨率,这对于研究黄土高原区域水汽变化与分布具有重要意义。

致谢:感谢ECMWF提供的ERA-interim与ERA5数据集,中国陆态网CMONOC提供的GNSS ZTD数据集,以及美国国家气候数据中心提供的IGRA2数据资料。

## 参 考 文 献

- [1] Jin S G, Li Z, Cho J. Integrated Water Vapor Field and Multiscale Variations over China from GPS Measurements[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(11): 3008-3015



- [2] Baldysz Z, Nykiel G, Figurski M, et al. Investigation of the 16-Year and 18-Year ZTD Time Series Derived from GPS Data Processing[J]. *Acta Geophysica*, 2015, 63(4): 1103-1125
- [3] Wong M S, Jin X M, Liu Z Z, et al. Multi-sensors Study of Precipitable Water Vapour over Mainland China [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(10): 3146-3159
- [4] Song Shuli. Sensing Three Dimensional Water Vapor Structure with Ground-Based GPS Network and the Application in Meteorology [D]. Shanghai: Chinese Academy of Sciences, 2004 (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: 中国科学院研究生院, 2004)
- [5] Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays Onto Precipitable Water [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(3): 379-386
- [6] Bevis M, Businger S, Herring 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): 15787 - 15801
- [7] Rocken C, Hove T V, Ware R. Near Real-Time GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(24): 3221-3224
- [8] Tregoning P, Boers R, O'Brien D, et al. Accuracy of Absolute Precipitable Water Vapor Estimates from GPS Observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D22): 28701-28710
- [9] Basili P, Bonafoni S, Mattioli V, et al. Mapping the Atmospheric Water Vapor by Integrating Microwave Radiometer and GPS Measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1657-1665
- [10] Zhao Q Z, Yao Y B, Yao W Q, et al. Near-Global GPS-Derived PWV and Its Analysis in the El Nino Event of 2014—2016 [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, 179: 69-80
- [11] Zhang W X, Lou Y D, Huang J F, et al. Multiscale Variations of Precipitable Water over China Based on 1999—2015 Ground-Based GPS Observations and Evaluations of Reanalysis Products[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(3): 945-962
- [12] Li Chengcai, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. Global Positioning System Remote Sensing Total Water Vapor[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(3): 333-336 (李成才, 毛节泰, 李建国, 等. 全球定位系统遥感水汽总量[J]. 科学通报, 1999, 44(3): 333-336)
- [13] Chen Junping, Wang Jiexian, Lu Caiping. Study on Comparison Between Water Vapor Value Calculated by GPS and Observed by WVR[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2005, 25(3): 125-128 (陈俊平, 王解先, 陆彩萍. GPS 监测水汽与水汽辐射计数据的对比研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(3): 125-128)
- [14] Ning T, Wang J, Elgered G, et al. The Uncertainty of the Atmospheric Integrated Water Vapour Estimated from GNSS Observations [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(1): 79-92
- [15] Zhao Q Z, Yang P F, Yao W Q, et al. Hourly PWV Dataset Derived from GNSS Observations in China [J]. *Sensors*, 2019, 20(1), DOI:10.3390/s20010231
- [16] Herring T, King R, McClusky S. Documentation of the GAMIT GPS Analysis Software Release 10.4 [M]. Cambridge, USA: Department of Earth and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 2010
- [17] Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L. ITRF2008: An Improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(8): 457-473
- [18] Zhao Jingyang, Song Shuli, Zhu Wen Yao. Accuracy Assessment of Applying ERA-Interim Reanalysis Data to Calculate Ground-Based GPS/PWV over China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 935-939 (赵静阳, 宋淑丽, 朱文耀. ERA-Interim 应用于中国地区地基 GPS/PWV 计算的精度评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8): 935-939)
- [19] Wang X M, Zhang K F, Wu S Q, et al. Water Vapor-Weighted Mean Temperature and Its Impact on the Determination of Precipitable Water Vapor and Its Linear Trend [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(2): 833-852
- [20] Zhao Q Z, Yao Y B, Yao W Q. Troposphere Water Vapour Tomography: A Horizontal Parameterised Approach[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1241
- [21] Böehm J, Heinkelmann R, Schuh H. Short Note: A Global Model of Pressure and Temperature for Geodetic Applications [J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(10): 679-683
- [22] Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites [M]//The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Washington, USA: American Geophysical Union, 2013
- [23] Huang L K, Liu L L, Chen H, et al. An Improved Atmospheric Weighted Mean Temperature Model and Its Impact on GNSS Precipitable Water Vapor

- Estimates for China[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2), DOI:10.1007/s10291-019-0843-1
- [24] Shi C, Zhao Q L, Geng J H, et al. Recent Development of PANDA Software in GNSS Data Processing [C]//International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis, Wuhan, China, 2008
- [25] Zhang H X, Yuan Y B, Li W, et al. GPS PPP-Derived Precipitable Water Vapor Retrieval Based on  $T_m/P_s$  from Multiple Sources of Meteorological Data Sets in China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(8): 4165-4183
- [26] Liu J N, Ge M R. PANDA Software and Its Preliminary Result of Positioning and Orbit Determination [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2003, 8(2): 603-609
- [27] Zhang W X, Lou Y D, Haase J S, et al. The Use of Ground - Based GPS Precipitable Water Measurements over China to Assess Radiosonde and ERA-Interim Moisture Trends and Errors from 1999 to 2015 [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(19): 7643-7667
- [28] Tregoning P, Herring T A. Impact of a Priori Zenith Hydrostatic Delay Errors on GPS Estimates of Station Heights and Zenith Total Delays [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(23): L23303
- [29] Wolf H. Determination of Water Density: Limitations at the Uncertainty Level of  $1 \times 10^{-6}$  [J]. *Accreditation and Quality Assurance*, 2008, 13(10): 587-591

## Analysis of Influencing Factors and Accuracy Evaluation of PWV in the Loess Plateau

YANG Pengfei<sup>1</sup> ZHAO Qingzhi<sup>1</sup> SU Jing<sup>1</sup> YAO Yibin<sup>2</sup>

1 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract: Objectives:** Atmospheric water vapor is one of the important components in troposphere. It is of great significance to study the factors and accuracy of influencing water vapor. This paper mainly studies the influencing factors of precipitable water vapor (PWV) in the Loess Plateau and evaluates its actual accuracy. **Methods:** Firstly, the pressure, temperature data of the fifth-generation atmospheric reanalysis data of ECMWF (ERA5) and global navigation satellite system(GNSS) derived zenith troposphere delay (ZTD) are evaluated. Secondly, according to the pressure and temperature data of ERA5 and ZTD data of crustal movement observation network of China (CMONOC), the PWV with 1-hour time resolution is calculated, and the theoretical error of PWV is deduced by using error propagation theory, and then the accuracy of PWV in the Loess Plateau is analyzed by comparing with the actual calculation error of PWV. **Results:** The results show that the average root mean square(RMS) and bias of GNSS-derived ZTD calculated by GAMIT/GLOBK and PANDA are 4.05 mm and -0.46 mm, respectively. The average RMS and bias of ERA5-provided pressure and temperature are 3.36 hPa / 1.97 K and -0.01 hPa / 0.04 K, respectively. The theoretical error of PWV in the Loess Plateau is 1.51 mm, and the actual error is 1.94 mm. **Conclusions:** The accuracy of PWV calculated in this paper is high, which is of great significance to the investigation of water vapor distribution and climate monitoring.

**Key words:** precipitable water vapor(PWV); accuracy evaluation; Loess Plateau; global navigation satellite system(GNSS)

**First author:** YANG Pengfei, master, specializes in GNSS space environment change. E-mail: ypf0323@163.com

**Corresponding author:** ZHAO Qingzhi, PhD, associate professor. E-mail: zhaoqingzhia@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41904036); the Science and Technology Projects of Northwest Engineering Corporation Limited (XBY-2016-10, XBY-KJ-2019-06, XBY-KJ-2021-14).

**引文格式:** YANG Pengfei, ZHAO Qingzhi, SU Jing, et al. Analysis of Influencing Factors and Accuracy Evaluation of PWV in the Loess Plateau[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1470-1478. DOI:10.13203/j.whugis20200390(杨鹏飞, 赵庆志, 苏静, 等. 黄土高原地区PWV影响因素分析及精度评定[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, 47(9): 1470-1478. DOI:10.13203/j.whugis20200390)