

DOI:10.13203/j.whugis20180228



文章编号:1671-8860(2020)04-0574-12

# BDS/QZSS及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能评估

布金伟<sup>1,2,3</sup> 左小清<sup>2</sup> 金立新<sup>4,5</sup> 常军<sup>6</sup>

1 中国矿业大学自然资源部国土环境与灾害监测重点实验室,江苏 徐州,221116

2 昆明理工大学国土资源工程学院,云南 昆明,650093

3 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116

4 中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西 西安,710043

5 甘肃铁道综合工程勘察院有限公司,甘肃 兰州,730000

6 自然资源部第一大地测量队,陕西 西安,710054

**摘要:**利用多星座实验(the multi-GNSS experiment, MGEX)监测网的观测数据分别从可见卫星数、精度衰减因子(dilution of precision, DOP)、多路径效应、信噪比、静态/动态精密单点定位(precise point positioning, PPP)几个方面对北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)/准天顶卫星系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能进行评估与分析。分析结果表明:QZSS与BDS系统组合,卫星数增加,能提供较好的空间几何构型分布,从而保证了定位的精度、可靠性和可用性;由于QZSS卫星的星座结构与BDS卫星类似,其多路径效应的变化规律表现出与BDS卫星一致性的特点;BDS和QZSS卫星各频点信号的信噪比与高度角相关趋势几乎相同,相同高度角条件下,地球中轨道(medium earth orbit, MEO)卫星信噪比要比倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星高2~3 dB-Hz;静态PPP和动态PPP方面,在高度角较大时( $40^\circ$ ),BDS+QZSS组合比BDS单系统在低高度角情形下改善更为明显。E、N和U方向静态PPP改善率可达20%以上,动态PPP改善率可达30%以上。QZSS系统卫星对日本、中国以及周边区域BDS定位具有一定的补充和增强作用,在信号易遮挡的复杂环境(如城市、建筑物密集区、山区、树林等)下,具有较好的应用价值。

**关键词:**BDS/QZSS;可见卫星数和DOP值;多路径效应;信噪比;定位性能评估

中图分类号:P228

文献标志码:A

随着全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、GLONASS、Galileo和北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)<sup>[1]</sup>等的不断建设和完善,多星座多频率组合导航与定位<sup>[2-5]</sup>将更好地服务于各行各业。准天顶卫星系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)是日本正在研发与建设的区域卫星导航系统,旨在作为全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)增强,正越来越频繁地被用作GPS、BDS、Galileo和GLONASS等系统卫星定位的补充<sup>[6-8]</sup>。

在信号易遮挡的复杂环境(如城市、建筑物密集区、山区、树林等)下,单系统可见卫星数较

少,导致定位性能不理想甚至难以满足实际工作中导航定位的需求。近年来,国内外学者纷纷开展了关于QZSS系统与其他GNSS组合定位的研究工作。Li等<sup>[9]</sup>分别采用单点定位模式、静态精密单点定位(precise point positioning, PPP)模式和动态PPP模式来评估QZSS对GPS/BDS单接收机定位的影响,得出使用QZSS可以提高GPS/BDS定位的可用性和准确性的结论。Odolinski等<sup>[10]</sup>提出了BDS+Galileo+QZSS+GPS的4系统组合实时动态(real-time kinematic, RTK)模型,得出4系统RTK模型可以改善整数模糊度固定率和定位性能,尤其是对于更高的截止角更为有效的结论。楼益栋等<sup>[11]</sup>从可用性、信

收稿日期:2019-02-27

项目资助:国家自然科学基金(41574009,41871376);云南省应用基础研究计划面上项目(2018FB078)。

第一作者:布金伟,博士生,主要研究方向为组合导航与定位、多模多频GNSS精密单点定位。b\_jinwei@163.com

通讯作者:左小清,博士,教授。zuoxq@163.com

号精度、Kinematic PPP 几个方面对 QZSS 系统卫星两类增强信号在中国区域的性能进行了评估和分析。李作虎等<sup>[12]</sup>针对日本和中国中东部地区,分析了 QZSS 系统卫星对 GPS 导航系统卫星的增强情况。张琳<sup>[8]</sup>利用实测数据对 QZSS 卫星导航系统在亚太地区的服务性能进行初步评估,得出在截止高度角较大情况下,QZSS/GPS 组合的定位精度、可用性和可靠性比 GPS 单系统有很大改善。综合以上的研究现状,目前有关 QZSS 与其他卫星导航系统组合定位取得了较好的研究成果,但是主要集中在对 GPS 系统的定位增强<sup>[8,11-12]</sup>方面,而针对北斗系统的增强服务性能评估研究较少<sup>[13-14]</sup>。

因此,本文利用多星座实验(the multi-GNSS experiment, MGEX)跟踪站的观测数据,分别从可见卫星数、精度衰减因子、多路径效应、信噪比、静态 PPP 和动态 PPP 几个方面对 BDS/QZSS 及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能进行评估。

## 1 BDS 及 QZSS 基本情况介绍

截至 2019 年 7 月 20 日,BDS 在轨卫星数已经达到 40 颗,其中有 17 颗具有提供导航定位服务的能力(<http://www.csno-tarc.cn/>)<sup>[11-15]</sup>。卫星发射情况可从 <https://www.glonass-iac.ru/en/BEI-DOU/index.php> 查询。BDS 卫星播发频率信息见文献[16]。

QZSS 第一阶段包括 3 颗倾斜同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星和 1 颗地球同步轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星<sup>[17]</sup>,目前已经完成 4 颗卫星的部署<sup>[8]</sup>。QZSS 的轨道设计保证了其服务地区覆盖东亚及大洋洲。2010 年,QZSS 第一颗卫星 Michibiki 发射后,能够给日本领土内用户提供一天 12 h 以上的服务。同时,在其系统覆盖的东亚及大洋洲范围内,保证每日 4 颗卫星可见。2017 年后,QZSS 系统能够全天候对上述地区提供服务。在多山环境和城市街道较狭隘区域,QZSS 卫星能对其他卫星定位起到较好的补充<sup>[18-19]</sup>。QZSS 卫星发射信号类型和频率信息见文献[11,20]。

QZSS 与 GPS 具有相同的时间系统,并且日本的卫星导航大地测量系统(Japan satellite navigation geodetic system, JGS)与 WGS84 之间的差异,在普通的导航定位应用中可以忽略不计<sup>[8]</sup>。

## 2 定位性能评估与分析

### 2.1 BDS/QZSS 卫星可见性和精度衰减因子值分析

GNSS 测量中,若卫星可见数少于 4 颗,则无法提供导航定位服务。GNSS 点位误差主要与用户等效距离误差和精度衰减因子(dilution of precision, DOP)有关,可表示为:

$$\delta = (A^T A)^{-1} \sigma_{\text{UERE}}^2 \quad (1)$$

式中,  $\delta$  为钟差和位置误差的协方差;  $\sigma_{\text{UERE}}^2$  为伪距测量方差;  $(A^T A)^{-1}$  为放大因子矩阵, 表征卫星空间分布特性的好坏, 是衡量卫星系统性能的重要指标, 其矩阵形式表示为:

$$(A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{bmatrix} \quad (2)$$

DOP 值越小, 代表卫星的空间几何结构分布较好且具有较高的定位精度概率; DOP 值越大, 则代表卫星的空间几何结构较差且具有较低的定位精度概率。DOP 包括几何精度衰减因子(geometric dilution of precision, GDOP)、位置精度衰减因子(position dilution of precision, PDOP)、水平精度衰减因子(horizontal dilution of precision, HDOP) 和垂直精度衰减因子(vertical dilution of precision, VDOP)。其各自表达形式为<sup>[1]</sup>:

$$GDOP = \sqrt{d_{11} + d_{22} + d_{33} + d_{44}} \quad (3)$$

$$PDOP = \sqrt{d_{11} + d_{22} + d_{33}} \quad (4)$$

$$HDOP = \sqrt{d_{11} + d_{22}} \quad (5)$$

$$VDOP = \sqrt{d_{33}} \quad (6)$$

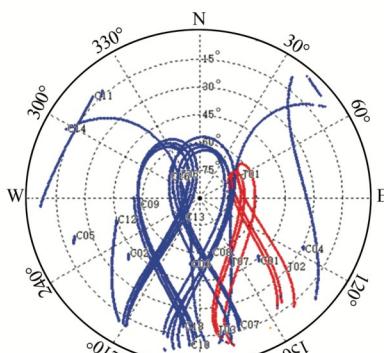
分别选取 2019 年年积日(day of year, DOY) 018 和 025 天的中国测站 JFNG、日本测站 GMSD 以及澳大利亚测站 KARR 对 BDS/QZSS 及其组合系统卫星的可见性和 DOP 值进行分析。限于篇幅, 图 1 中给出了 3 个测站 DOY 025 的 BDS/QZSS 卫星的 Skyplot 图和方位角-高度角轨迹图。

分析图 1(a)、1(b) 可知, 测站 JFNG 位于北半球, 其 BDS 可见卫星数为 16 颗, QZSS 可见卫星数为 4 颗, 呈不对称“8”字形状。24 h 内, 对于 BDS 卫星, C01~C05 卫星全天均可见, C06~C14、C16 和 C18 卫星部分时间可见。对于 QZSS 卫星, J07 卫星全天可见, 其余 3 颗大约有 4 h 不可见。

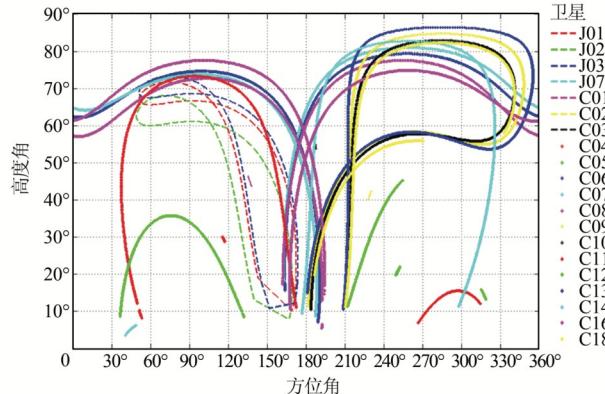
从图 1(c)、1(d) 可知, 测站 GMSD 位于北半

球上,BDS可见卫星数为14颗,QZSS可见卫星数为3颗;24 h内BDS的GEO卫星全天均可见,IGSO卫星(C06~C10,C13,C16)和地球中轨道(medium earth orbit,MEO)卫星(C11,C12,C14)

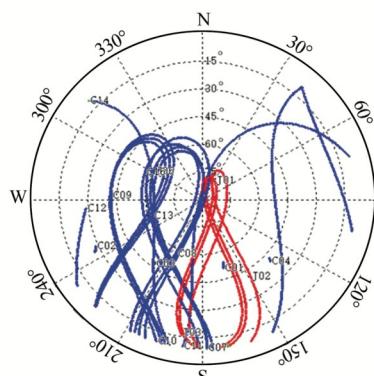
部分时间可见。对于QZSS卫星,J01和J02卫星大约2 h和3 h不可见,J03卫星大约1 h不可见,在观测时段内出现部分数据缺失现象,可能与测站周围外界环境影响有关。



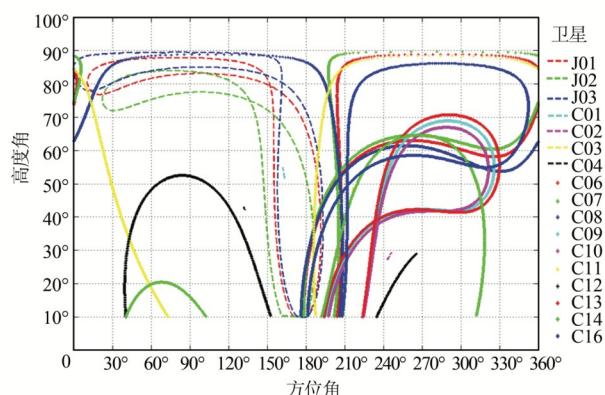
(a) JFNG测站Skyplot图



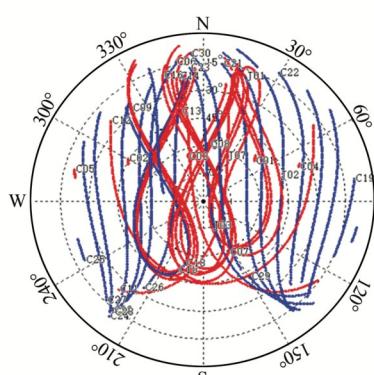
(b) JFNG测站BDS/QZSS卫星的方位角-高度角轨迹图



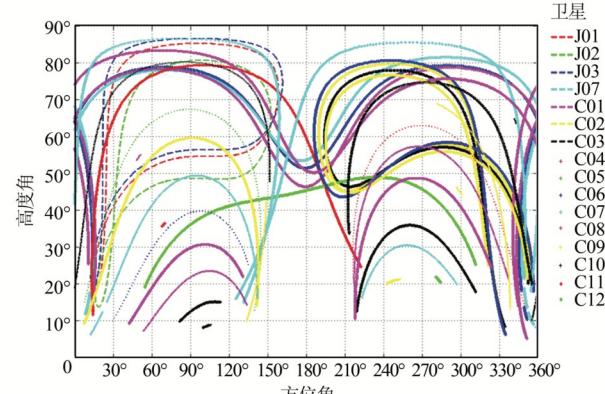
(c) GMSD测站Skyplot图



(d) GMSD测站BDS/QZSS卫星的方位角-高度角轨迹图



(e) KARR测站Skyplot图



(f) KARR测站BDS/QZSS卫星的方位角-高度角轨迹图

图1 JFNG、GMSD和KARR测站BDS/QZSS卫星的Skyplot图、方位角-高度角轨迹图

Fig.1 Skyplots and Azimuth-Elevation Plots for Stations JFNG, GMSD and KARR of BDS/QZSS Satellites

从图1(e)、1(f)可知,测站KARR位于南半球上,BDS可见卫星数为28颗(其中,BDS-3有13颗),QZSS可见卫星数为4颗。24 h内BDS的GEO卫星除C05外,其余4颗全天均可见,可能是因为C05在GNSS接收信号时出现失锁所致,在该测站上4颗QZSS卫星全天均可见。

图2所示为中国测站JFNG DOY025的可见

卫星数和DOP值时间序列。从图2和实验验证可知:

- 1)在不同截止高度角下,BDS+QZSS组合的DOP值和可见卫星数较BDS单系统的改善率分别为10%~60%和20%~30%;
- 2)当截止高度角为7°、15°、20°和30°时,BDS单系统和BDS+QZSS组合DOP值的95%分位

数的最大值分别为 10.3 和 7.5, 可见卫星数的 95% 分位数的最小值分别为 10 和 12; 当截止高度角为 40° 时, BDS 单系统和 BDS+QZSS 组合 DOP 值的 95% 分位数的最大值分别为 11.6 和 8.6, 可见卫星数的 95% 分位数的最小值分别为 9 和 11; 当截止高度角为 45° 时, 除 HDOP 值外,

BDS 单系统和 BDS+QZSS 组合的 GDOP、PDOP 和 VDOP 值都较大, 但 BDS+QZSS 组合较 BDS 单系统较好。

可见, QZSS 卫星对 BDS 定位具有一定的补充和增强作用, 卫星数的增加能提供较好的空间几何构型分布, 从而保证定位的精度、可靠性和可用性。

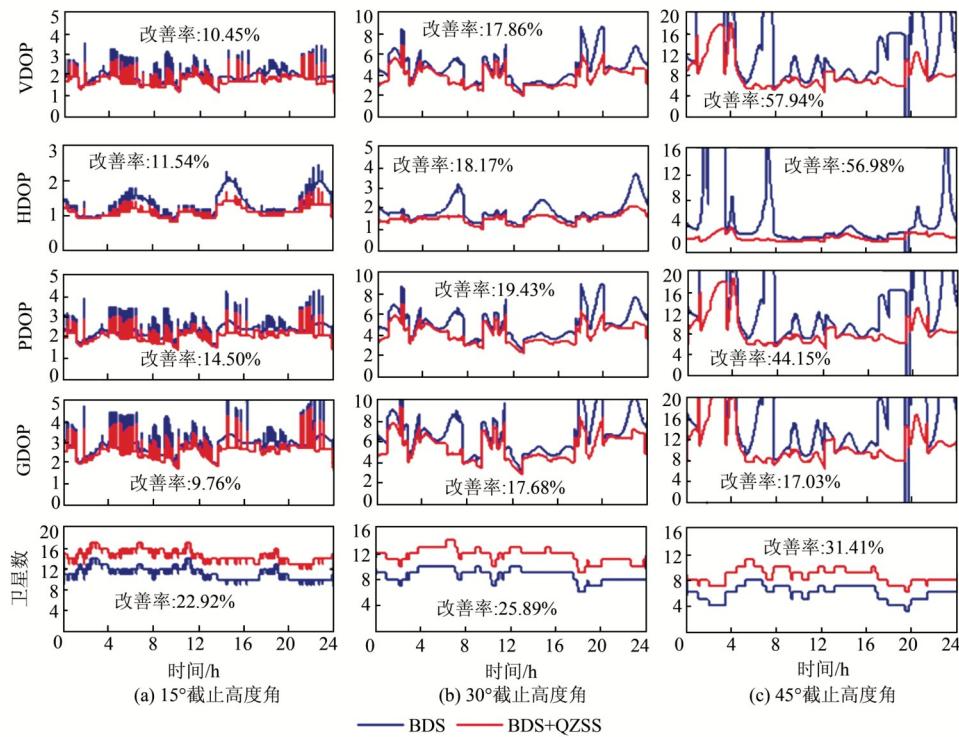


图 2 JFNG 测站 DOY025 的可见卫星数、DOP 值时间序列

Fig. 2 Number of Visible Satellites and Time Series of DOP Values of JFNG Station in DOY025

## 2.2 多路径效应分析

多路径效应实际反映了伪距观测值多路径误差与观测噪声的综合影响, 可由载波相位观测值、伪距相位观测值等来表示<sup>[2,21]</sup>:

$$mp_1 = P_1 - \left(1 + \frac{2}{\alpha_1 - 1}\right) \lambda_1 \phi_1 + \frac{2}{\alpha_1 - 1} \lambda_2 \phi_2 \quad (7)$$

$$mp_2 = P_2 - \frac{2\alpha_1}{\alpha_1 - 1} \lambda_1 \phi_1 + \left(\frac{2\alpha_1}{\alpha_1 - 1} - 1\right) \lambda_2 \phi_2 \quad (8)$$

$$mp_3 = P_3 - \frac{2\alpha_2}{\alpha_2 - 1} \lambda_1 \phi_1 + \left(\frac{2\alpha_2}{\alpha_2 - 1} - 1\right) \lambda_3 \phi_3 \quad (9)$$

式中,  $mp_1, mp_2, mp_3$  为 3 个频率上的多路径效应, 单位为 m;  $P_1, P_2, P_3$  为伪距观测值, 单位为 m;  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  为载波相位观测值, 单位为 m;  $\alpha_1 = f_1/f_2$ ,  $\alpha_2 = f_1/f_3$ ,  $f_i (i=1, 2, 3)$  为载波相位观测值的频率。

为了分析 BDS 卫星和 QZSS 卫星的多路径效应, 图 3 给出了 BDS/QZSS 卫星 3 个频点多路径效应与高度角的关系, 图 4 给出了 BDS-2、BDS-3 和 QZSS 卫星 3 个频点多路径效应的均方

根 (root mean square, RMS) 误差值统计结果。

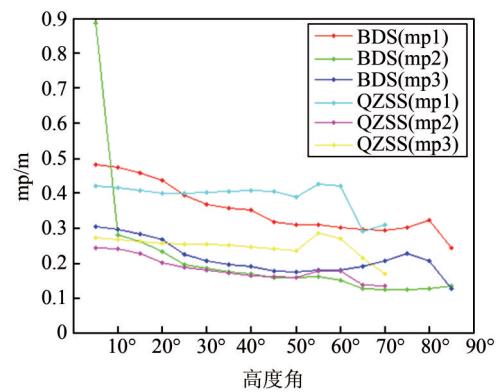


图 3 BDS/QZSS 卫星多路径效应与高度角的关系

Fig. 3 Multipath Effect Versus Cut-off Angle of BDS/QZSS Satellites Signals

从图 3 可知:(1)BDS 卫星 3 个频点的多路径效应随着高度角增大而减小, 且当高度角大于 50° 时趋于稳定, 这与文献[22]结论基本一致; 在相同高度角情况下, 频点 1 的多路径效应明显大于频点 2 和频点 3;(2)由于 QZSS 卫星的星座结构

与 BDS 卫星类似,其多路径效应的变化规律表现出与 BDS 卫星一致性的特点,多路径效应高度角变化的规律与 BDS 卫星一致。

从图 4 可知:

1) BDS-2 的 MEO 卫星多路径的 RMS 统计值大于 IGSO 卫星,可能由于 MEO 卫星观测时段的低高度角观测数量比例较大,3 个频点中,频点 3 抗多路径性能最强,频点 1 抗多路径性能最差。GEO 卫星由于轨道的特殊性,多路径 RMS 值比其他两种类型轨道的卫星稳定,且 3 个频点多路径效应均呈现出  $\text{MEO} > \text{IGSO} >$

GEO 的现象;

2) BDS-3 的频点 1 和频点 3 的多路径 RMS 值小于频点 2,原因需要进一步分析;

3) BDS-3 的频点 1 和频点 3 的多路径小于 BDS-2 同类卫星,可能是因为 BDS-2 卫星多路径中存在与高度角相关的系统性偏差,导致其 RMS 统计结果较差;

4) QZSS 卫星的 3 个频点多路径规律与 BDS-2 的 GEO 卫星基本一致,其中 J07 的频点 3 多路径明显小于其他 3 颗卫星,这是因为 GEO 卫星轨道高度更高。

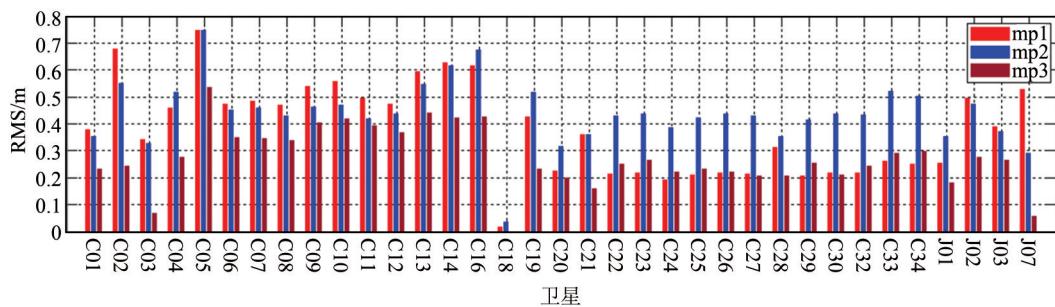


图 4 BDS-2、BDS-3 和 QZSS 卫星多路径效应的 RMS 值统计

Fig. 4 RMS Values Statistics of Multipath Effect of BDS-2, BDS-3 and QZSS Satellites

### 2.3 信噪比分析

信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 是反映 GNSS 载波信号质量的一个重要指标<sup>[2,23]</sup>。信噪比可用来衡量测距信号质量的优劣,其值越大,说明观测信号的质量越好,观测精度越高。

为了分析 BDS/QZSS 卫星的信噪比情况,图 5 给出了 BDS/QZSS 卫星 3 个频点信噪比与高度角的关系,图 6 给出了 BDS-2、BDS-3 和 QZSS 卫星 3 个频点信噪比的统计结果。从图 5、图 6 中可以看出来:(1)BDS-3 的 3 个频点信噪比高于 BDS-2;(2)BDS 和 QZSS 卫星各频点信号的信噪比与高度角相关趋势几乎相同,相同高度角条件下,MEO 卫星信噪比要比 IGSO 卫星高 2~3 dBHz,可能因为 IGSO 卫星轨道高度更高,卫星发射功率偏低所致;(3)QZSS 卫星频点 3 的信噪比明显高于频点 1 和频点 2,而 BDS 卫星的 3 个频点中,频点 1 和频点 2 的信噪比差异不大,频点 3 在高度角小于 15° 时,信噪比稳定性稍差,当高度角大于 50° 时趋于稳定,此时信噪比有所提升。总体来看,除 C05 卫星外,BDS-2、BDS-3 和 QZSS 各类卫星的 3 个频点信噪比均大于 35 dBHz。

### 2.4 PPP 定位性能分析

#### 2.4.1 PPP 定位模型和误差项处理策略

以双频 GNSS 接收机为例,PPP 的传统观测

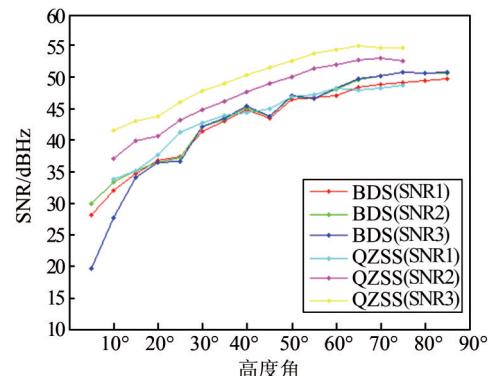


图 5 BDS/QZSS 卫星信噪比与高度角的关系

Fig. 5 Signal-to-Noise Ratio Versus Cut-off Angle of BDS/QZSS Satellites Signals

方程可以表示为:

$$\begin{cases} P_i = \rho_s^r + c \cdot (t_r - t^s) + d^s + T_i + I_i + M_i + \epsilon_{P_i} \\ \phi_i = \rho_s^r + c \cdot (t_r - t^s) + d^s + T_i - I_i + \lambda_i N_i + M_i + \epsilon_{\phi_i} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $d^s$  为卫星轨道误差;  $P_i$  为  $L_i$  上的伪距观测值;  $\phi_i$  为  $L_i$  上的载波相位观测值;  $\rho_s^r$  为卫星到测站(接收机)的几何距离;  $c$  为真空中的光速;  $t_r$  和  $t^s$  分别为接收机钟差和卫星钟差;  $I_i$  为电离层延迟;  $T_i$  为对流层延迟;  $M_i$  为多路径效应误差;  $\lambda_i$  为波长;  $N_i$  为整周模糊度;  $\epsilon$  为观测噪声误差;  $P_i, \phi_i, \rho_s^r, d^s, I_i, T_i, M_i, \lambda_i$  和  $\epsilon$  的单位均为 m,  $N_i$  单位为周,  $t_r$  和  $t^s$  单位为 s。

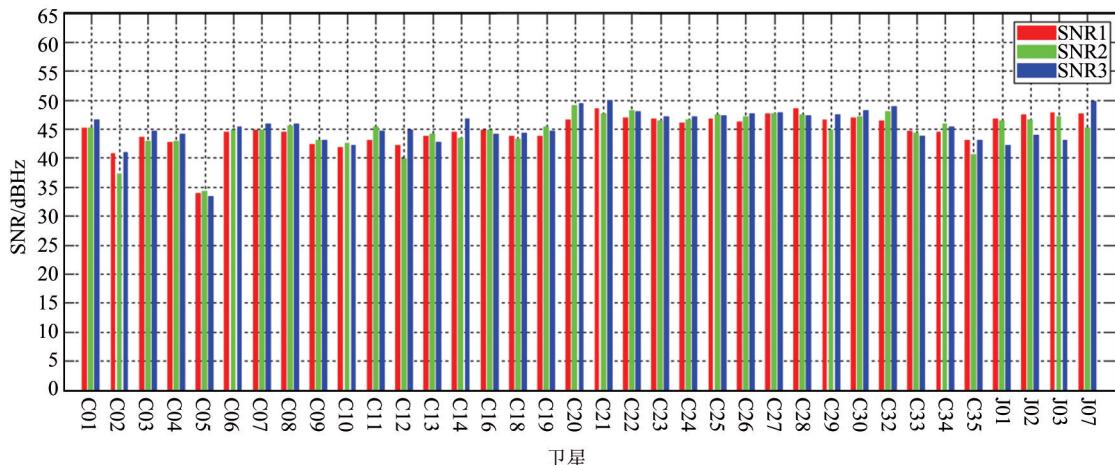


图 6 BDS-2、BDS-3 和 QZSS 卫星信噪比的 RMS 值统计

Fig. 6 RMS Values Statistics of Signal-to-Noise Ratio of BDS-2, BDS-3 and QZSS Satellites

若特别考虑卫星和接收机的硬件延迟误差，则 PPP 的非组合模型观测方程可表示为<sup>[24]</sup>:

$$\begin{cases} P_i = \rho_s^r + c \cdot (t_r - t^s) + d^s + T_i + I_i + M_i - \text{dcb}_s^P + \text{dcb}_r^P + \epsilon_{P_i} \\ \phi_i = \rho_s^r + c \cdot (t_r - t^s) + d^s + T_i - I_i + \lambda_i N_i + M_i - \text{dcb}_s^\phi + \text{dcb}_r^\phi + \epsilon_{\phi_i} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\text{dcb}_s^P$ 、 $\text{dcb}_r^P$  分别为测码伪距观测值的卫星和接收机的硬件延迟误差;  $\text{dcb}_s^\phi$ 、 $\text{dcb}_r^\phi$  分别为载波相位观测值的卫星和接收机的硬件延迟误差; 其他参数含义同前文。

$$\hat{\mathbf{X}} = [x \ y \ z \ t_r \ zpw \ I^{r,1} \ \dots \ I^{r,n} \ N_{r,1}^1 \ N_{r,2}^1 \ \dots \ N_{r,1}^m \ N_{r,2}^m]$$

式中,  $zpw$  为对流层湿延迟。

文中接收机钟差等作为白噪声处理, 引起的时间延迟作为常量进行估计; 采用 ztd-est 模型作为对流层延迟改正模型, 电离层延迟误差改正采用无电离层组合消除一阶项, 对流层延迟的湿分量参数估计采用随机游走的方法。由德国地学中心提供数据处理中所需要的精密星历和精密钟差产品。使用国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 组织提供的 ANTEX 文件改正卫星端和接收机端天线相位中心偏移 (phase center offset, PCO) 和天线相位中心变化 (phase center variation, PCV), 但由于目前 IGS 只提供了粗略的 BDS 卫星端 PCO 改正, 因此无法进行精确的 PCV 和 PCO 改正。数据处理策略和参数估计方法具体见表 1。

#### 2.4.2 试验数据

因为在中国和日本的测站包含 QZSS 卫星的观测数据比较少, 所以本文主要选取了 MGEX 跟踪站 (<http://mgex.igs.org/>) 中国和日本以及周边区域 18 个测站 2019 年 1 月 25 日 (DOY 025) 的观测数据进行静态 PPP 和动态 PPP 试验, 从而对 BDS/QZSS 卫星导航系统及其组合系统的定位性能进行评估和分析, 数据采样率为 30 s。测站

对于式(11), 需要估计的参数有接收机三维位置坐标、接收机钟差、对流层湿延迟、电离层延迟以及模糊度参数。参数估计如下<sup>[25]</sup>:

$$\text{站点分布如图 7 所示。} \quad (12)$$

表 1 精密单点定位解算策略

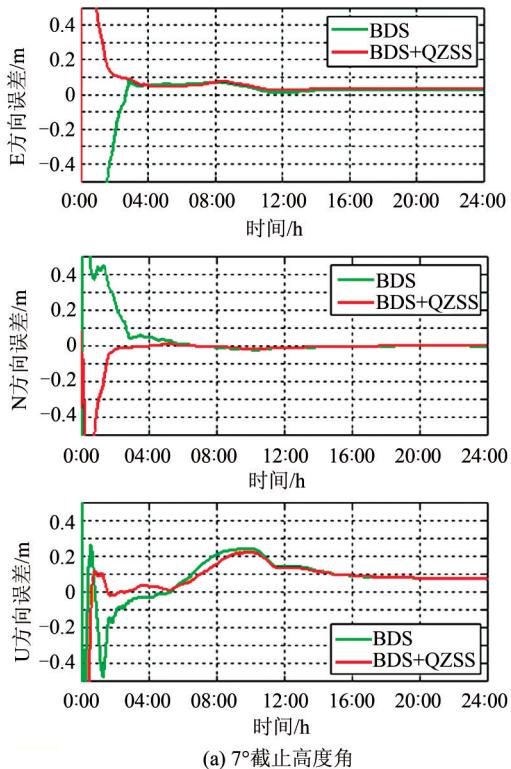
Tab.1 Solution Strategy for Precise Point Positioning

处理步骤	数据类别	处理策略
数据处理	观测值	载波相位观测值和伪距观测值
	卫星系统	BDS+QZSS
	采样间隔	30 s
	截止高度角	7°/15°/20°/30°/40°/45°
误差改正	相位中心偏差	IGS_14 模型 (考虑 PCO、PCV 改正)
	相位解缠	模型改正
	相对论效应	模型改正
	卫星轨道	gbm SP3 (采样间隔 15 min)
	卫星钟差	gbm CLK (采样间隔 30 s)
参数估计	电离层延迟	无电离层组合消除一阶项
	对流层延迟	模型改正 + 随机游走
	潮汐改正	模型改正
	接收机坐标	估计 (静态 / 动态)
参数估计	接收机钟差	当白噪声估计
	模糊度	估计
	参数估计方法	扩展卡尔曼滤波

#### 2.4.3 静态 PPP 分析

图 8 为 GAMG 测站 2019 年 DOY025 静态 PPP 时间序列, 图 9 为 14 个测站在不同截止高度角下 BDS+QZSS 的 dE、dN 和 dU 的 RMS 值较

BDS的改善率,图10为14个测站BDS和BDS+QZSS模式在不同截止高度角下( $7^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ 、 $20^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$ 和 $45^{\circ}$ )可定位历元比例统计结果。从图8中可以看出,当截止高度角为 $7^{\circ}$ 时,BDS+QZSS组合和BDS单系统的E和N方向定位偏差差异不大,而U方向BDS+QZSS组合在0~4 h时段内定位偏差明显小于BDS单系统;当截止高度角为 $45^{\circ}$ 时,BDS单系统24 h内E、N和U方向可定位历元仅有12 h,定位可靠性和稳定性不如BDS+QZSS组合;然而,无论是单系统还是组合系统,在U方向上相较于平面方向仍然存在较大偏差,

(a)  $7^{\circ}$  截止高度角

但是BDS+QZSS组合相比BDS单系统,在U方向上改善明显。

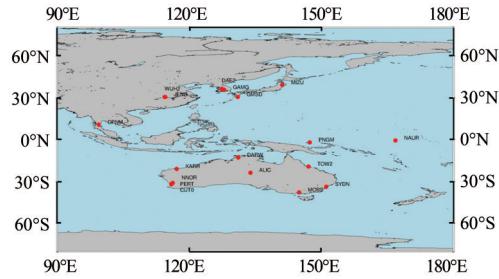


图7 站点分布图

Fig.7 Stations Distribution Map

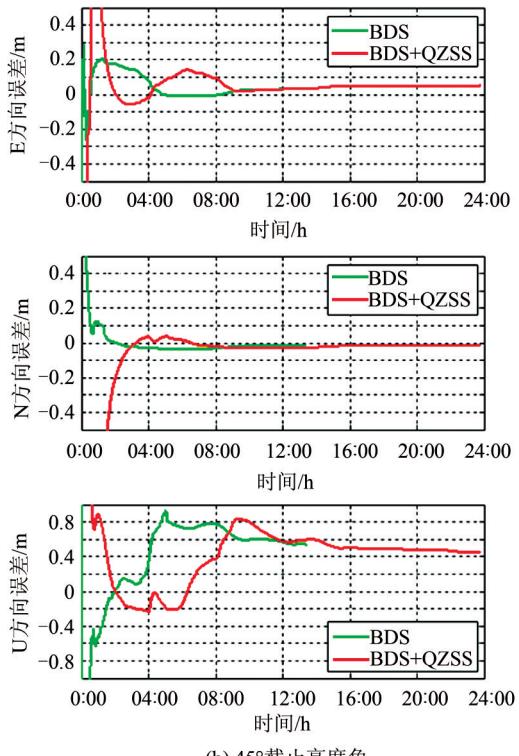
(b)  $45^{\circ}$  截止高度角

图8 GAMG测站2019年DOY025静态PPP时间序列

Fig.8 Static PPP Time Series with GAMG Station in DOY 025 of 2019

结合图9、图10可以看出,当截止高度角为 $7^{\circ}$ 时,14个测站BDS+QZSS组合E、N和U3个方向的定位精度较BDS单系统平均改善率分别约为8.83%、3.54%和5.89%,BDS+QZSS组合和BDS单系统平均可定位历元比例均达99.5%以上;当截止高度角为 $15^{\circ}$ 时,平均改善率分别约为10.02%、10.04%和7.02%,平均可定位历元比例分别为99.9%和99.5%;当截止高度角为 $20^{\circ}$ 时,平均改善率分别约为13.78%、3.25%和9.88%,平均可定位历元比例分别为99.16%和97.54%;当截止高度角为 $30^{\circ}$ 时,平均改善率分别约为6.36%、3.01%和10.11%,平均可定位历元比例分别为94.95%和87.12%;当截止高度角为 $40^{\circ}$

时,平均改善率分别约为20.14%、35.65%和21.90%,平均可定位历元比例分别为91.58%和82.63%;当截止高度角为 $45^{\circ}$ 时,平均改善率分别约为6.97%、15.09%和15.13%,平均可定位历元比例分别为83.50%和68.46%。

可见,BDS+QZSS组合的静态PPP的结果相比单系统定位而言,在不同的截止高度角均有不同程度的改善效果,当截止高度角为 $15^{\circ}$ 时,E和N方向改善相差不大,U方向改善稍差。可能是因为低高度角下,BDS单系统卫星数较多,QZSS卫星参与贡献不显著。在高度角较大时( $40^{\circ}$ 以上),U方向上BDS+QZSS组合系统比BDS单系统在低高度角的情况下改善更为明显。

值得注意的是,BDS+QZSS 组合在高度角为 40° 时,14 个测站平均可定位历元达 90% 以上,在高

度角 45° 时也能达到 80% 以上,可用性相对较好。

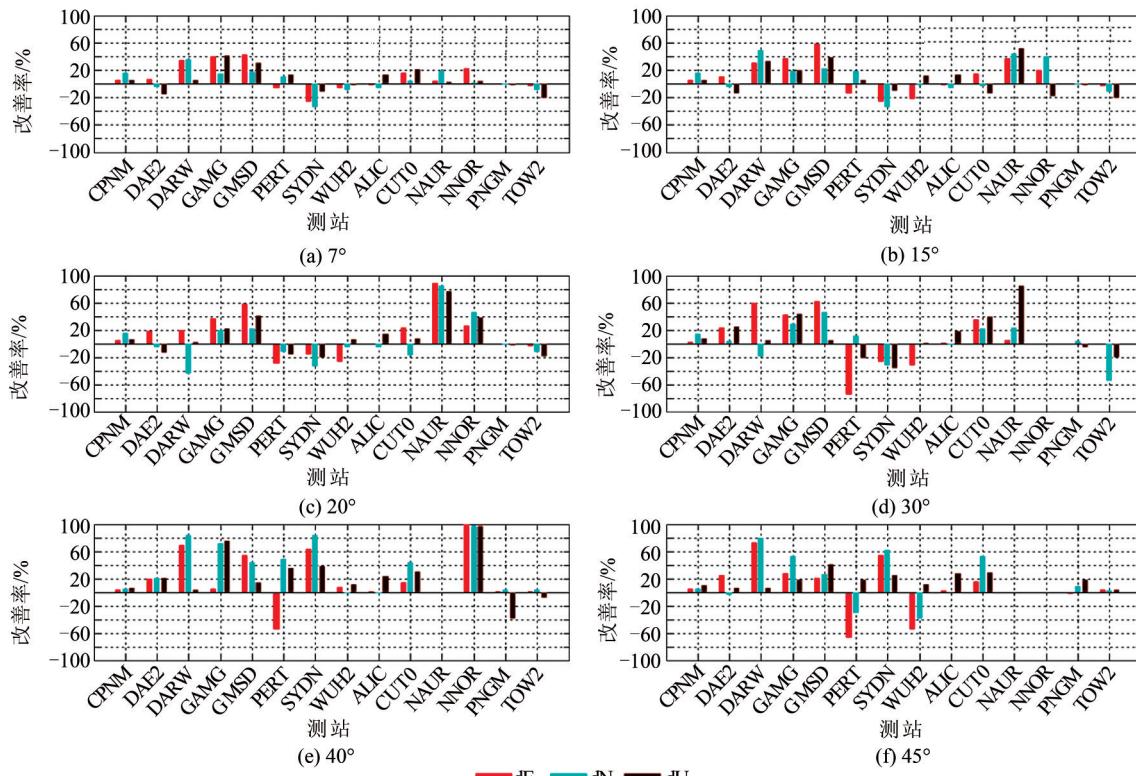


图 9 不同截止高度角下 BDS+QZSS 较 BDS 的改善率(静态 PPP)

Fig. 9 Improvement Rate of BDS+QZSS over BDS at Different Cut-off Height Angles(Static PPP)

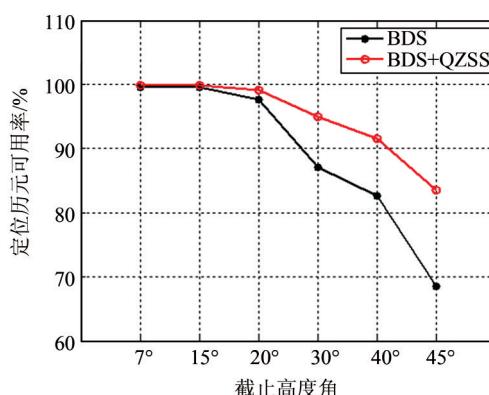


图 10 可定位历元比例(静态 PPP)

Fig. 10 Locatable Epoch Scale(Static PPP)

图 11 给出了不同区域测站(分别为 DARW、NAUR、CUT0 和 GMSD)不同时段长度解的静态 PPP 定位精度及收敛速度。从图 11 中可知,不同测站的 E、N 和 U 3 个方向的 RMS 值和收敛速度均有不同的差异,这可能与测站位置和测站周边环境等因素有关,尽管如此,BDS+QZSS 组合系统从定位精度和收敛性能方面在一定程度上相比 BDS 单系统有提升。如 GMSD 测站,E 方向上,BDS+QZSS 的 RMS 值收敛到 0.5 m 左右大

约需要 120 min,而 BDS 单系统需要 240 min;N 方向上,BDS+QZSS 的 RMS 值收敛到 0.36 m 左右大约需要 25 min,而 BDS 单系统则需要 60 min;U 方向上,BDS+QZSS 的 RMS 值收敛到 0.5 m 左右大约需要 240 min,而 BDS 单系统需要 720 min。

#### 2.4.4 动态 PPP 分析

图 12 给出了 GAMG 测站动态 PPP 时间序列。图 13 给出了 CPNM、MIZU、WUH2、ALIC、PNGM 和 TOW2 测站 BDS 和 BDS+QZSS 模式动态 PPP 解算的 dE、dN 和 dU 的 RMS 值统计结果。图 14 给出了 18 个测站在 6 种截止高度角情况下 BDS+QZSS 组合系统与 BDS 单系统定位结果的改善率统计。图 15 为 BDS+QZSS 和 BDS 在不同截止高度角下动态 PPP 可定位历元比例。从图 12 中可知,在截止高度角为 7° 时,BDS 和 BDS+QZSS 模式在 3 个方向上定位偏差差异不太明显,但收敛速度 BDS+QZSS 较 BDS 单系统快。而在截止高度角为 45° 时,BDS 单系统定位偏差波动较大,BDS+QZSS 组合定位偏差虽然也出现明显波动,但相比 BDS 单系统相对稳定且可用性较好。

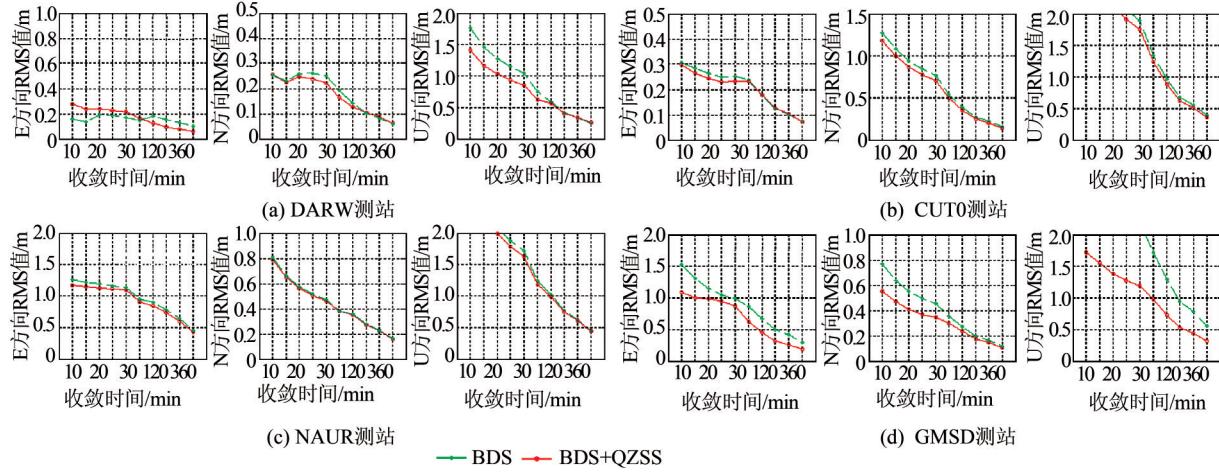


图 11 4个测站不同时段长度解的静态 PPP 定位精度及收敛速度

Fig. 11 Static PPP Positioning Accuracy and Convergence Rate of Four Stations in Different Time Periods

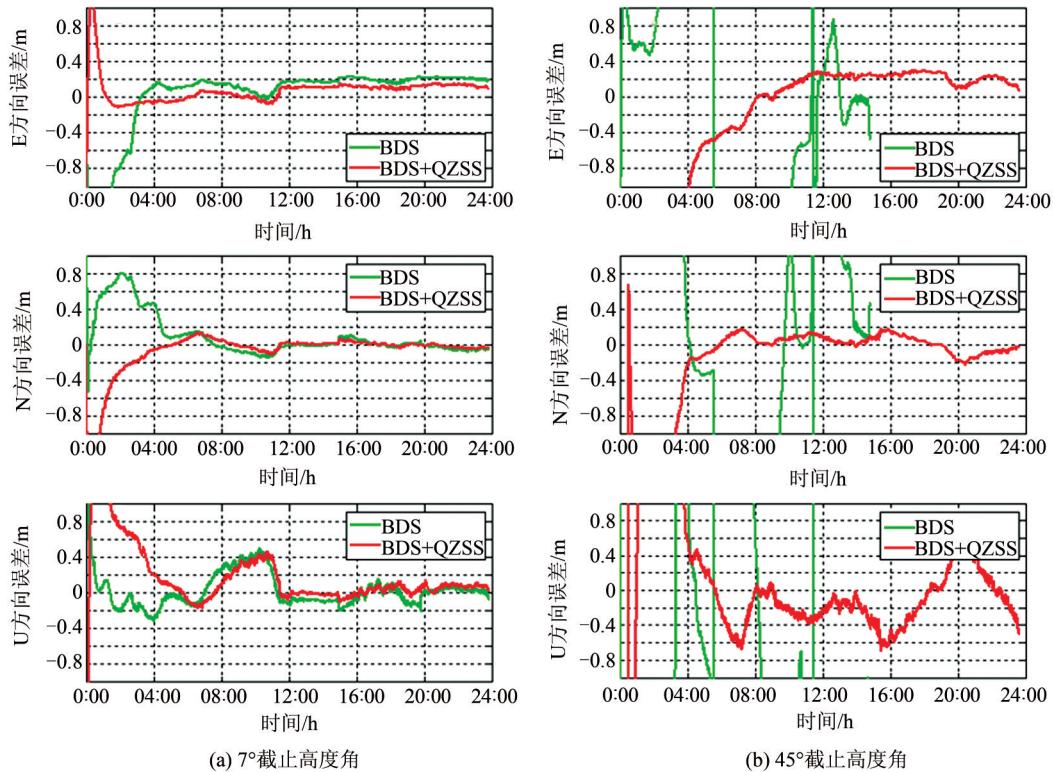


图 12 GAMG测站2019年DOY025动态PPP时间序列

Fig. 12 Kinematic PPP Time Series with GAMG Station in DOY025 of 2019

结合图13~15可知,当截止高度角分别为 $7^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 和 $30^\circ$ 时,18个测站BDS+QZSS组合E、N和U3个方向的定位精度较BDS单系统平均改善率分别约为16.62%、20.44%和24.20%,BDS+QZSS组合和BDS单系统平均可定位历元比例分别约为98.88%和98.33%;当截止高度角大于 $40^\circ$ 时,BDS+QZSS组合较BDS单系统的平均改善率分别约为37.93%、35.81%和43.13%,BDS+QZSS组合和BDS单系统平均可定位历

元比例分别为89.33%和80.00%。在截止高度角较大情形下的改善效果比截止高度角较小时明显,这对于复杂环境下定位具有较好的贡献。

### 3 结语

本文采用MGEX跟踪站中一些具有代表性的观测站数据,分别从可见卫星数、精度衰减因子、多路径效应、信噪比、静态PPP和动态PPP等方面评估和分析了BDS/QZSS及其组合系统在中国和日

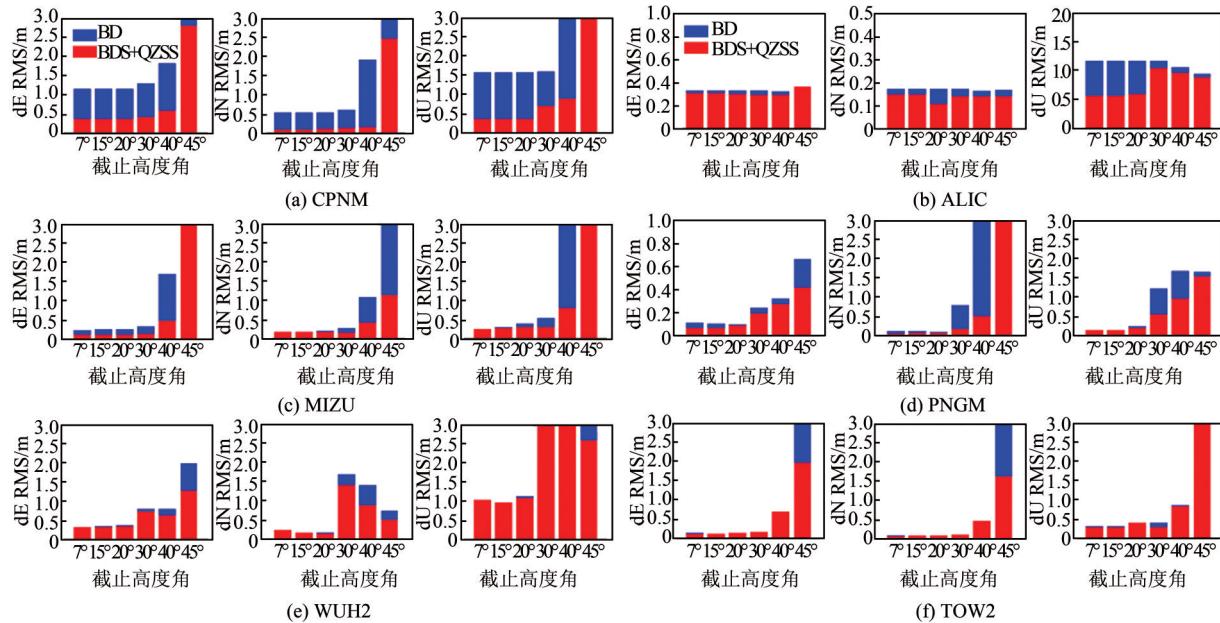


图 13 不同测站 BDS 和 BDS+QZSS 模式 dE、dN 和 dU 的 RMS 对比图(动态 PPP)

Fig.13 RMS Comparison Between BDS and BDS+QZSS Modes of dE, dN and dU for Different Stations(Kinematic PPP)

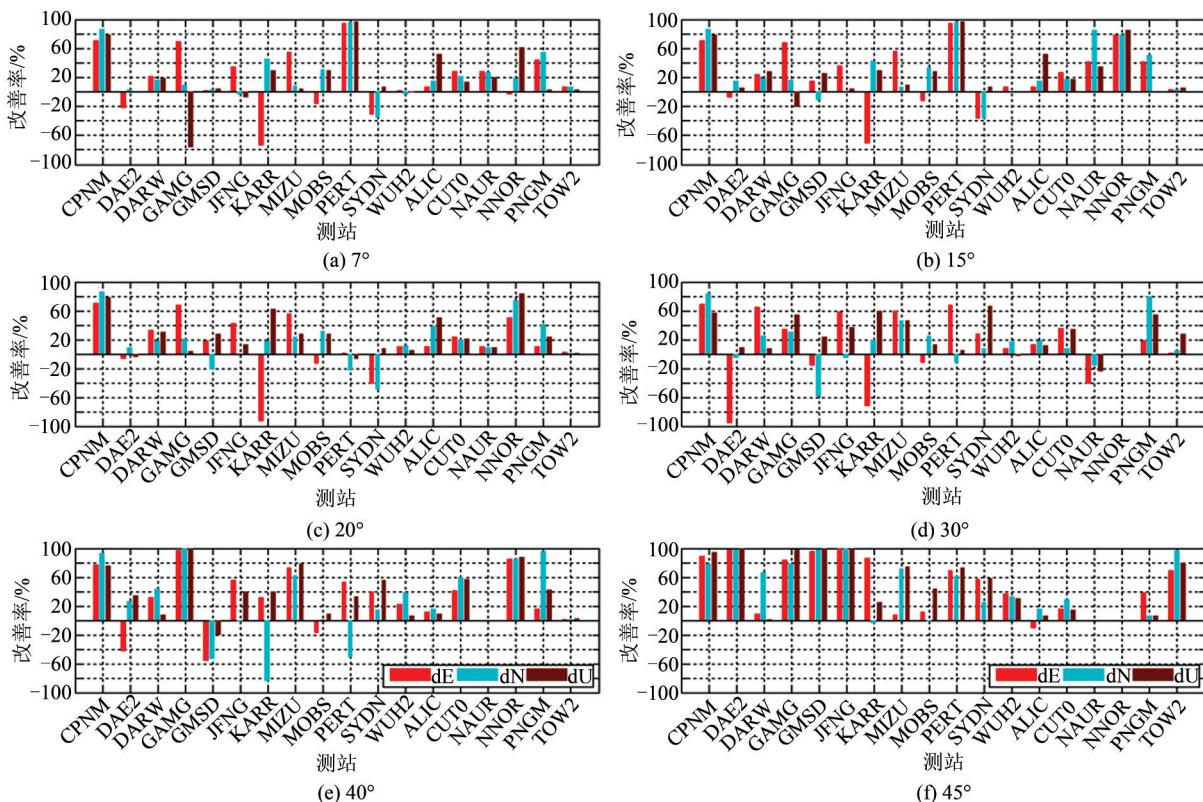


图 14 不同截止高度角下 BDS+QZSS 较 BDS 的改善率(动态 PPP)

Fig. 14 Improvement Rate of BDS+QZSS over BDS at Different Cut-off Height Angles(Kinematic PPP)

本以及周边地区的定位性能。由于精密轨道和钟差产品的限制,在静态和动态 PPP 方面,本文仅对 BDS-2、BDS-2/QZSS 组合的 PPP 定位性能进行了评估,后续还需进一步对 BDS-3、BDS-3/QZSS 组合及 BDS-2+3/QZSS 组合的定位性能进行评估。

目前,相比 BDS 单系统定位,QZSS 卫星对日本、中国以及周边区域 BDS 定位具有一定的补充和增强作用。随着中国 BDS 卫星和日本 QZSS 卫星的不断建设和完善,在信号易遮挡的复杂环境(如城市、建筑物密集区、山区、树林等)下,将具有较好的应用价值。

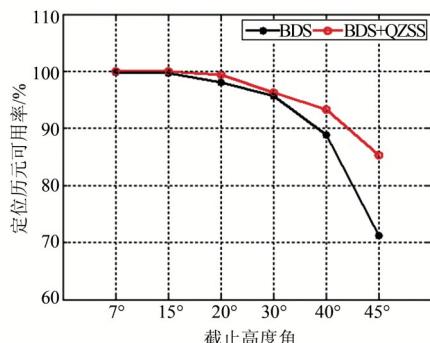


图 15 可定位历元比例(动态 PPP)

Fig. 15 Locatable Epoch Scale(Kinematic PPP)

致谢:感谢德国地学中心提供多系统精密轨道和钟差产品以及IGS MGEX提供多系统观测数据。

## 参 考 文 献

- [1] Guo F , Li X , Zhang X , et al. The Contribution of Multi-GNSS Experiment (MGEX) to Precise Point Positioning[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(11):2 714-2 725
- [2] Bu Jinwei,Li Xiaolong,Zuo Xiaoqing, et al. Comparison and Analysis of Beidou/GPS/GLONASS Multi-system Satellite Positioning Data Quality [J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(1):1-9(布金伟,李小龙,左小清,等. Beidou/GPS/GLONASS多系统卫星定位数据质量比较分析[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(1):1-9)
- [3] Cai Changsheng, Zhu Jianjun, Dai Wujiao, et al. Modeling and Result Analysis of Combined GPS/ GLONASS Precise Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(12): 1 474-1 477(蔡昌盛,朱建军,戴吾蛟,等. GPS/GLONASS组合精密单点定位模型及结果分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(12): 1 474-1 477)
- [4] Zhang Xiaohong, Guo Fei, Li Xingxing, et al. Study on Precise Point Positioning Based on Combined GPS and GLONASS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(1): 9-12(张小红,郭斐,李星星,等. GPS/GLONASS组合精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(1): 9-12)
- [5] Wei Erhu, Liu Xuexi, Wang Lingxuan, et al. Analysis and Assessment of BDS/GPS Combined Precise Point Positioning Accuracy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1 654-1 660(魏二虎,刘学习,王凌轩,等. BDS/GPS组合精密单点定位精度分析与评价[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(11): 1 654-1 660)
- [6] Nadarajah N, Khodabandeh A, Teunissen P J G. Assessing the IRNSS L5-Signal in Combination with GPS, Galileo, and QZSS L5/E5a-Signals for Positioning and Navigation [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(2):289-297
- [7] Zhao Q L, Chen G, Guo J, et al. A Priori Solar Radiation Pressure Model for the QZSS Michibiki Satellite [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(2): 109-121
- [8] Zhang Lin. Preliminary Performance Evaluation of QZSS Navigation System in Asia Pacific Region [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2017, 25(5):618-623(张琳. QZSS导航系统在亚太地区的初步性能评估[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(5):618-623)
- [9] Li Z , Chen F . Improving Availability and Accuracy of GPS/BDS Positioning Using QZSS for Single Receiver[J]. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2016, 52(1):1-15
- [10] Odolinski R , Teunissen P J G , Odijk D . Combined BDS, Galileo, QZSS and GPS Single-frequency RTK[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1):151-163
- [11] Lou Yidong, Zheng Fu, Gong Xiaopeng, et al. Evaluation and Analysis of Enhanced Service Performance of QZSS System in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41 (3): 298-303(楼益栋,郑福,龚晓鹏,等. QZSS系统在中国区域增强服务性能评估与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(3):298-303)
- [12] Li Zuohu, Hao Jinming, Li Jianwen, et al. QZSS Performance Enhancement Analysis of GPS Area [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35 (1): 17-20(李作虎,郝金明,李建文,等. QZSS对GPS区域性能增强分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(1):17-20)
- [13] Xu Wei, Jia Xue, Wang Tao. QZSS/IRNSS Evaluation of BDS's Positioning Performance Enhancement in China[J]. *Mapping Engineering*, 2018, 27(1): 31-36(徐炜,贾雪,王涛. QZSS/IRNSS对BDS在中国定位性能增强的评估[J]. 测绘工程, 2018, 27(1):31-36)
- [14] Zhou F , Dong D , Li P. et al. Influence of Stochastic Modeling for Inter-system Biases on Multi-GNSS Undifferenced and Uncombined Precise Point Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3):59-71
- [15] Duan B, Hugentobler U, Selmke I . The Adjusted Optical Properties for Galileo/BeiDou-2/QZS-1 Satellites and Initial Results on BeiDou-3e and QZS-2 Satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(5):1 803-1 812
- [16] Odijk D, Nadarajah N, Zaminpardaz S, et al. GPS, Galileo, QZSS and IRNSS Differential ISBs: Esti-

- mation and Application [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2):439-450
- [17] Li X, Yuan Y, Huang J, et al. Galileo and QZSS Precise Orbit and Clock Determination Using New Satellite Metadata[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93 (8): 1123-1136
- [18] Zhou Peiyuan, Du Lan, Fang Shanchuan, et al. Analysis of Characteristics of QZSS Satellite Orbit and Clock Products During Yaw Attitude Model Switching[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 274-281(周佩元, 杜兰, 方善传, 等. 姿态模式切换期间 QZSS 卫星轨道及其钟差产品特性分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(3):274-281)
- [19] Hu Caibo, Wang Hongbing, Zhao Na, et al. Performance Analysis of Japanese QZSS Navigation System-GPS Enhancement System [J]. *Radio Engineering*, 2009, 39(6):37-39(胡彩波, 王宏兵, 赵娜, 等. 日本 QZSS 导航系统-GPS 增强系统性能分析[J]. 无线电工程, 2009, 39(6):37-39)
- [20] André H, Steigenberger P, Rodriguez-Solano C. Signal, Orbit and Attitude Analysis of Japan's First QZSS Satellite Michibiki[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(1):127-133
- [21] Zhang Tao, Bei Jinzhong, Gu Shouzhou. Visualiza-tion and Analysis of GNSS Data Quality Check on Anubis [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(12): 163-170(张涛, 秘金钟, 谷守周. Anubis 的 GNSS 数据质量检核可视化表达与分析[J]. 测绘科学, 2017, 42(12):163-170)
- [22] Yang Y, Xu Y, Li J, et al. Progress and Performance Evaluation of BeiDou Global Navigation Satellite System: Data Analysis Based on BDS-3 Demonstration System [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(5):614-624
- [23] Li Xiaoguang, Cheng Pengfei, Cheng Yingyan, et al. Quality Analysis of GNSS Data[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(3):1-4(李晓光, 程鹏飞, 成英燕, 等. GNSS 数据质量分析[J]. 测绘通报, 2017(3):1-4)
- [24] Cai Changsheng. Theory and Method of Multi-mode GNSS Fusion Precise Point Positioning [M]. Beijing: Science Press, 2017(蔡昌盛. 多模 GNSS 融合精密单点定位理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2017)
- [25] Zhou Feng. Research on Theory and Method of Multi-system GNSS Non-differential and Non-combination Precision Single Point Positioning [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018(周锋. 多系统 GNSS 非差非组合精密单点定位相关理论和方法研究[D]. 上海:华东师范大学, 2018)

## Positioning Performance Evaluation of BDS/QZSS and Its Combined Systems in China, Japan and Their Peripheral Areas

BU Jinwei<sup>1,2,3</sup> ZUO Xiaoqing<sup>2</sup> JIN Lixin<sup>4,5</sup> CHANG Jun<sup>6</sup>

1 Key Lab of Land, Environment and Disaster Monitoring, Ministry of Natural Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2 Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

3 School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

4 China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an 710043, China

5 The General Engineering Survey Institute of Railways of Gansu Co. Ltd., Lanzhou 730000, China

6 The First Geodetic Surveying Brigade of Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China

**Abstract:** The positioning performance of BeiDou Navigation Satellite System (BDS) /Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) and its combined systems in China, Japan and their peripheral areas is evaluated and analyzed by using the observation data of the multi-GNSS experiment (MGEX) from the number of visible satellites, dilution of precision, the multipath effect, the signal-to-noise ratio (SNR), the static precise point positioning (PPP) and kinematic PPP. The results show that the combination of QZSS and BDS system can increase the number of satellites and provide better spatial geometry distribution, thus ensuring the accuracy, reliability and availability of positioning. Because the constellation structure of QZSS satellite is similar to that of BDS satellite, its multipath effect is consistent with that of BDS satellite. The SNR of MEO(medium earth orbit) satellite is 2-3 dBHz higher than that of inclined geosynchronous orbit(IGSO) satellite at the

(下转第 611 页)

## High Degree Phobos Gravity Field Modeling Based on Shape Model

GUO Xi<sup>1</sup> YAN Jianguo<sup>1</sup> YANG Xuan<sup>1</sup> Barriot Jean-Pierre<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Observatoire Géodésique de Tahiti, University of French Polynesia, BP 6570, 98702 Faa'a, Tahiti, French Polynesia

**Abstract:** This paper solved a Phobos gravity field model with degree of 80 by using shape forward modeling method. We introduced three methods that are edge, surface, polyhedron, to generate integral unit and obtain outside potential value from shape model. During computation we rotated the reference coordinate system of the polyhedron model into the principal axis frame. The potential varies from 45–56 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, basically showing a stripped distribution and indicating a maximal value around the Stickney crater. Meantime, the moment of inertia in  $x, y, z$  axes, with values of 0.355 45, 0.418 10, 0.491 34 are obtained; the spherical coefficient  $C_{20}$  value is –0.029 395 4, and  $C_{22}$  value is 0.015 254. By comparing the acceleration of 20, 50 and 80 degrees gravitational potential fields, we can confirm that the benefits of higher degree of the gravity field can be seen on acceleration.

**Key words:** Phobos; gravity field; moment of inertia; acceleration

**First author:** GUO Xi, postgraduate, specializes in the gravitational potential of asteroids. E-mail: guoxi\_whu@126.com

**Corresponding author:** YAN Jianguo, PhD, professor. E-mail: jgyan@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China(U1831132, 41874010); Hubei Provincial Fund for Distinguished Young Scholars(2018CFA087).

**引文格式:** GUO Xi, YAN Jianguo, YANG Xuan, et al. High Degree Phobos Gravity Field Modeling Based on Shape Model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(4):604–611.DOI:10.13203/j.whugis20190104(郭茜, 鄢建国, 杨轩, 等. 利用形状模型进行火卫一高阶重力场建模[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(4):604–611.DOI:10.13203/j.whugis20190104)

(上接第 585 页)

same altitude angle. For static and kinematic PPP, the improvement of BDS+QZSS combination is more obvious than that of BDS single system at low altitude angle when the altitude angle is larger ( $40^\circ$ ). The improvement rate of E, N and U directions static PPP can reach more than 20%, where kinematic PPP can reach more than 30%. QZSS plays a complementary and enhanced role in BDS positioning in Japan, China and surrounding areas. In the complex environment (such as city, building intensive area, mountain area, et al.) where the signal is easy to block, it will have better application value.

**Key words:** BDS/QZSS; the number of visible satellites and DOP values; multipath effect; signal-to-noise ratio; positioning performance evaluation

**First author:** BU Jinwei, PhD candidate, specializes in multi-constellation and multi-frequency GNSS PPP. E-mail: b\_jinwei@163.com

**Corresponding author:** ZUO Xiaoqing, PhD, professor. E-mail: zuoxq@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41574009, 41871376); the Applied Basic Research Project in Yunnan Province(2018FB078).

**引文格式:** BU Jinwei, ZUO Xiaoqing, JIN Lixin, et al. Positioning Performance Evaluation of BDS/QZSS and Its Combined Systems in China, Japan and Their Peripheral Areas[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(4):574–585.DOI:10.13203/j.whugis20180228(布金伟, 左小清, 金立新, 等. BDS/QZSS 及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(4):574–585.DOI:10.13203/j.whugis20180228)