

武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 基于北斗 PPP-B2b 改正信号的地震同震形变实时监测方法  
作者: 方荣新, 陈智潜, 李大炜, 郑佳伟, 吕黄晖, 胡冰燕, 刘经南  
DOI: 10.13203/j.whugis20240163  
收稿日期: 2024-10-28  
网络首发日期: 2024-11-05  
引用格式: 方荣新, 陈智潜, 李大炜, 郑佳伟, 吕黄晖, 胡冰燕, 刘经南. 基于北斗 PPP-B2b 改正信号的地震同震形变实时监测方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240163>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240163

引用格式：

方荣新, 陈智潜, 李大炜, 等. 基于北斗 PPP-B2b 改正信号的地震同震形变实时监测方法 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240163 (FANG Rongxin, CHEN Zhiqian, LI Dawei, et al. A Method for Real-time Coseismic Displacement Monitoring Based on BDS PPP-B2b Correction Signals[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240163)

## 基于北斗 PPP-B2b 改正信号的地震同震形变实时监测方法

方荣新<sup>1</sup> 陈智潜<sup>1</sup> 李大炜<sup>2</sup> 郑佳伟<sup>1</sup> 吕黄晖<sup>1</sup> 胡冰燕<sup>2</sup> 刘经南<sup>1</sup>

1 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉 430079

2 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉, 430079

**摘要：**针对 PPP 实时解算需要提供精密卫星轨道和钟差产品，且高度依赖于网络传输等问题，提出了一种基于北斗 PPP-B2b 改正信号的地震同震形变实时监测方法。该方法可直接利用 GNSS 接收机同时接收观测数据和改正信号实现实时精密定位。利用 2022 年四川泸定 Ms 6.8 级地震 1 Hz GNSS 观测数据回溯性反演，基于 B2b 改正产品的静态 PPP 平均 RMS 水平方向可达到 1-2 cm，高程方向可达到 2-4 cm；动态模式下，以 WUM 精密产品解算为参考，基于 B2b 改正产品解算的位移波形在东、北方向的差值仅为 0.56 cm 和 1.08 cm。利用 B2b 产品和 WUM 产品定位结果确定的泸定地震震级分别为 Ms 6.76 和 Ms 6.67，与中国地震局公布的震级相比仅相差 0.04 个震级单位，表明基于北斗 B2b 改正信号的 PPP 方法可应用于地震实时监测及地震参数快速确定等应用研究。

**关键词：**PPP-B2b 信号；高频 GNSS；地震监测；泸定地震

## A Method for Real-time Coseismic Displacement Monitoring Based on BDS PPP-B2b Correction Signals

FANG Rongxin<sup>1</sup> CHEN Zhiqian<sup>1</sup> LI Dawei<sup>2</sup> ZHENG Jiawei<sup>1</sup> LÜ Huanghui<sup>1</sup>

HU Bingyan<sup>2</sup> LIU Jingnan<sup>1</sup>

1 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

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

**Abstract: Objectives:** For real-time Precise Point Positioning (PPP) solutions, precise satellite orbit and clock correction products are required, and it heavily relies on issues such as network transmission. **Methods:** This paper proposes a real-time monitoring method for coseismic

收稿日期：2024-10-28

基金项目：国家自然科学基金 (42274025)

第一作者：方荣新，博士，教授，主要从事北斗/GNSS 高精度定位及应用研究。rfang@whu.edu.cn

通讯作者：李大炜，博士，讲师。dwli@whu.edu.cn

displacement based on BeiDou Navigation Satellite System (BDS) PPP-B2b correction signals, which enables direct utilization of GNSS receivers to simultaneously receive observation data and correction signals for real-time precise positioning. **Results:** By retrospectively inverting 1 Hz GNSS observation data for the 2022 Luding Ms 6.8 earthquake in Sichuan, the average RMS of static PPP in the horizontal direction based on B2b correction products can reach 1-2 cm, and in the vertical direction can reach 2-4 cm. In the kinematic PPP mode, using WUM precise products as a reference, the displacement waveforms calculated based on B2b correction products have differences of only 0.56 cm and 1.08 cm in the east and north directions, respectively. The magnitude of the Luding earthquake determined using the displacement waveforms from B2b products and WUM products is Ms 6.76 and Ms 6.67, respectively. Compared with the magnitude announced by the China Earthquake Administration, they differ by only 0.04 magnitude units. **Conclusions:** This study indicates that the PPP method based on BDS B2b correction signals can be applied to real-time seismic monitoring and rapid determination of seismic parameters.

**Key words:** PPP-B2b signal; High-rate GNSS; Earthquake monitoring; Luding earthquake

随着高频 ( $\geq 1$  Hz) GNSS 接收机的出现以及高精度定位技术的发展, 高频 GNSS 技术被广泛应用于地震同震形变监测及反演研究<sup>[1-9]</sup>。高频 GNSS 技术能克服测震仪饱和效应和强震仪基线偏差等问题, 在大震监测中具有传统地震监测仪器无法比拟的优势<sup>[10-12]</sup>。

高频 GNSS 数据处理主要有相对定位和精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 方法。相对定位方法通过与参考站作差, 消除接收机钟差、电离层延迟、对流层延迟等误差, 定位精度可达厘米级, 但该方法在地震实时监测应用中存在难以快速选择稳定且距离合适的参考站的问题<sup>[13]</sup>。PPP 仅使用单台接收机便可获取高精度位置坐标, 成为地震同震形变监测的一种重要手段<sup>[14-15]</sup>。由于 PPP 实时解算需要实时提供精密卫星轨道和钟差产品, 其应用性能高度依赖于网络传输条件。而大地震发生后, 网络通讯往往易受中断, 限制了实时 PPP 的工程化应用。

2019 年我国北斗卫星导航系统公开 PPP-B2b 服务信号, 并且发布了对应的接口控制文件 (PPP-B2b 测试版), 可为用户提供实时 PPP 服务。北斗三号地球静止轨道卫星 (Geostationary Earth Orbit, GEO) 通过 PPP-B2b 信号实时为用户播发轨道、钟差、码偏差的改正参数, 用户可直接利用 GNSS 接收机接收观测数据和 B2b 改正产品实现高精度定位。由于基于 PPP-B2b 改正信号的定位方式采用卫星播发替代互联网传输模式, 因此不受网络传输限制, 特别适合复杂环境下实时 PPP 应用<sup>[16]</sup>。

国内外学者已对北斗三号 PPP-B2b 改正及其定位性能开展了相关研究。宋伟伟等<sup>[17]</sup>利用 2020 年 9 月一周的观测数据评估了 PPP-B2b 信号的北斗卫星轨道和钟差精度, 表明 B2b

改正后的轨道在径向、法向、切向精度分别为 10 cm、31 cm、30 cm。郭斐等<sup>[18]</sup>对轨道、钟差、码偏差进行精度评估, 7 天的解算结果表明中地球轨道卫星 (Middle Earth Orbit, MEO) 卫星经 B2b 产品改正后, 轨道精度在径向、法向、切向精度分别为: 6.84 cm、25.63 cm、21.93 cm。Ren 等<sup>[19]</sup>使用 B2b 改正产品和广播星历进行实时 PPP 评估, 结果表明北斗三号卫星在径向、法向、切向的实时轨道精度分别为 7.25 cm、24.79 cm、25.87 cm。Zhang 等<sup>[20]</sup>对国内 6 个 iGMAS (international GNSS Monitoring Assessment Service, 国际 GNSS 监测评估系统) 测站 150 天的观测数据进行分析, 评估 B2b 改正产品和 PPP 性能, 静态模式下单 BDS-3 系统平均 RMS 在水平和垂直分量上分别约为 2.1 cm 和 2.6 cm, BDS-3 与 GPS 多系统平均 RMS 在水平和垂直分量上分别为 1.8 cm 和 2.1 cm。在 6 个测站模拟动态 PPP 实验中, 统计 150 天的解算结果表明单 BDS-3 系统在水平和垂直分量上的平均 RMS 分别为 21.5 cm 和 33.4 cm, BDS-3 与 GPS 多系统平均 RMS 在水平和垂直分量上分别为 15.2 cm 和 30.4 cm。Nie 等<sup>[21]</sup>利用 4 个 iGMAS 测站的观测数据, 研究 BDS-3 和 GPS 多系统下 PPP 精度, 研究表明静态模式下 B2b 实现 PPP 水平定位精度可优于 0.3 m, 垂直定位精度可优于 0.6 m, 收敛后 PPP 在最后 10 分钟的平均 RMS 值在东、北、高程三个方向上可达到 2.40 cm、1.60 cm、2.30 cm。模拟动态 PPP 模式下, 统计 4 个测站 3 天的结果表明, 在东、北、高程三个方向上平均 RMS 可达到 8.10 cm、3.60 cm、8.00 cm。

在此基础上, 相关学者开展了基于北斗三号 PPP-B2b 信号的监测应用研究。YANG 等<sup>[22]</sup>针对地震瞬时位移监测中传统方法的局限, 采用静态数据模拟动态方式初步验证了 B2b 服务在地震监测中的可行性。Fang 等<sup>[23]</sup>使用 B2b 改正产品对 2021 Mw 7.4 玛多地震实测数据进行分析处理, 结果表明, 与使用最终精密产品的 GPS 单系统的 PPP 结果相比, 使用 B2b 改正产品在东、北、高程方向上精度可达到 1.7 cm、2.4 cm 和 1.7 cm。Zang 等<sup>[24]</sup>利用 2021 年 Mw 7.4 玛多地震期间收集的 GNSS 观测数据, 验证了 PPP-B2b 在实时震后位移监测方面的性能, 并利用得到的同震位移数据回溯性反演了震级、震源机制和断层滑动分布, 结果表明采用 B2b 产品结果与 PPP 产品反演的结果一致。

北斗 PPP-B2b 服务应用于地震监测研究还处于初步探索阶段, 除了 2021 年 Mw 7.4 玛多地震尚未涵盖更多的地震案例, 因此, 本文以 2022 年四川泸定 Mw 6.8 地震为例, 评估北斗 PPP-B2b 服务在地震波监测方面的性能, 进一步了解 B2b 改正产品在震级计算等地学应用上的潜力。

## 1 原理与方法

目前, 北斗系统播发的 PPP-B2b 信号可用于 BDS-3 与 GPS 卫星的广播星历改正。表 1 列出了 B2b 产品播发的 4 种主要信息类型。

表 1 B2b 信息类型

Tab. 1 B2b Signal Information Types

信息类型	信息内容
1	卫星掩码
2	轨道改正数、测距精度指数
3	码偏差改正数
4	钟差改正数

### 1.1 CNAV1 导航电文改正方法

对于 BDS-3, PPP-B2b 信号可以改正 B1C 信号播发的 CNAV1 导航电文; 对于 GPS, 可用 PPP-B2b 信号改正 LNAV 导航电文。由于北斗定位中常用的是 B1I、B3I 信号播发的 D1、D2 导航电文, 与 B2b 采用的 CNAV1 导航电文有所不同, 因此这里介绍针对 CNAV1 导航电文的改正方法。

#### 1) 长半轴平方根

CNAV1 导航电文中并未播发轨道长半轴平方根, 而是参考时刻长半轴的偏差 $\Delta A$ , 同时加入了长半轴变化率参数 $\dot{A}$ , 因此长半轴的计算方式为:

$$A_k = A_{ref} + \Delta A + (\dot{A})(t - t_{oe}) \quad (1)$$

其中,  $A_k$ 为观测历元的长半轴;  $A_{ref}$ 为长半轴的参考值, 根据卫星类型, 其数值也不同, 例如 MEO 卫星的长半轴参考值为 27906.1km, GEO 卫星则为 42162.2km;  $\Delta A$ 为与参考时刻的长半轴相对于参考值的偏差;  $\dot{A}$ 为长半轴变化率参数;  $(t - t_{oe})$ 为观测历元与参考历元的时间差。

#### 2) 平均角速度改正项

CNAV1 导航电文中加入了平均角速度变化率 $\Delta \dot{n}_0$  (参考时刻的卫星平均角速度和计算值差值的变化率), 计算平均角速度偏差公式为:

$$\Delta n_A = \Delta n_0 + \frac{\Delta \dot{n}_0 (t - t_{oe})}{2} \quad (2)$$

其中,  $\Delta n_0$ 为卫星平均角速度与计算值差值,  $(t - t_{oe})$ 为观测历元与参考历元的时间差。

### 1.2 轨道、钟差和码偏差改正

在使用 B2b 改正产品前, 需对 PPP-B2b 电文信息进行解码, 得到轨道、钟差以及码偏差改正信息, 然后将其与导航电文进行匹配即可得到精确的轨道和钟差产品。

#### 1) 卫星轨道改正

PPP-B2b 电文信息中的轨道改正信息获取的参数为轨道改正向量 $\delta O$ , 其在径向、切向、

法向的分量分别为 $[\delta O_{radial} \ \delta O_{along} \ \delta O_{cross}]^T$ 。由于改正向量 $\delta O$ 所在坐标系为星固系，需要将其转换为地固系下的卫星轨道改正数 $\delta X$ 。 $\delta X$ 计算如公式（3）所示：

$$\begin{cases} e_{radial} = \frac{r}{|r|} \\ e_{cross} = \frac{r \times \dot{r}}{|r \times \dot{r}|} \\ e_{along} = e_{radial} \times e_{cross} \\ \delta X = [e_{radial} \ e_{along} \ e_{cross}] \cdot \delta O \end{cases} \quad (3)$$

式（3）中 $r = X$ 为广播星历卫星位置矢量； $\dot{r} = \dot{X}_{broadcast}$ 为广播星历卫星速度矢量； $e_{radial}$ 、 $e_{along}$ 、 $e_{cross}$ 分别对应径向、切向、法向方向的单位矢量； $\delta O = [\delta O_{radial} \ \delta O_{along} \ \delta O_{cross}]^T$ 为 PPP-B2b 信息中获得的轨道改正矢量，顺序为径向、切向、法向分量<sup>[6]</sup>。

将式（3）中得到的卫星轨道改正数 $\delta X$ 与卫星位置向量 $X_{broadcast}$ （利用广播星历计算）联合解算即可得到改正后的卫星位置 $X_{orbit}$ ，见公式（4）：

$$X_{orbit} = X_{broadcast} - \delta X \quad (4)$$

## 2) 钟差改正

钟差改正电文中参数是相对于广播星历钟差的改正参数，计算公式如式（5）所示<sup>[5]</sup>：

$$t_{satellite} = t_{broadcast} - \frac{C_0}{c} \quad (5)$$

式（5）中 $t_{satellite}$ 为改正后的卫星钟差； $t_{broadcast}$ 为广播星历计算的卫星钟差参数； $C_0$ 为 PPP-B2b 电文中的钟差改正参数； $c$ 为光速。

## 3) 码偏差改正

通过不同信号得到的观测值之间存在系统性偏差，在处理各频率的信号时，需要消除该偏差，实现各频率各信号同步处理。北斗 PPP-B2b 信号提供 GPS 与 BDS 的码偏差分别基于 L1/L2 组合观测值和 B3I 观测值。本文使用的 GPS 观测值为 L1/L2 组合观测值，因此无需进行码偏差改正。但对于北斗系统，由于 PPP-B2b 信号提供的钟差频点基准为 B3 频点，当用户使用 B1/B3 双频无电离层组合模型时，需要通过式（6）进行码间偏差的改正。

$$dt_{B_1 B_3}^S = dt_{B_3}^S - \frac{f_{B_1}^2}{f_{B_1}^2 - f_{B_3}^2} DCB_{B_1 B_3}^S \quad (6)$$

其中， $dt_{B_1 B_3}^S$ 是以 B1/B3 为基准的钟差； $dt_{B_3}^S$ 为利用北斗导航电文计算得到的基准为 B3 的钟差； $f_{B_1}$ 、 $f_{B_3}$ 分别代表 B1、B3 频点的频率； $DCB_{B_1 B_3}^S$ 为两频点间的码间偏差。

## 1.3 定位算法流程

利用 B2b 产品进行高精度定位时，首先对北斗三号 GEO 卫星播发的 PPP-B2b 信号进行解码，获取高精度的轨道、钟差和码间偏差改正数；然后利用导航电文计算卫星位置与钟差，对计算得到结果利用解码出的改正数进行改正；最后将改正后的精密轨道、钟差产品与

GNSS 观测数据一起进行 PPP 定位解算。算法流程如图 1 所示。

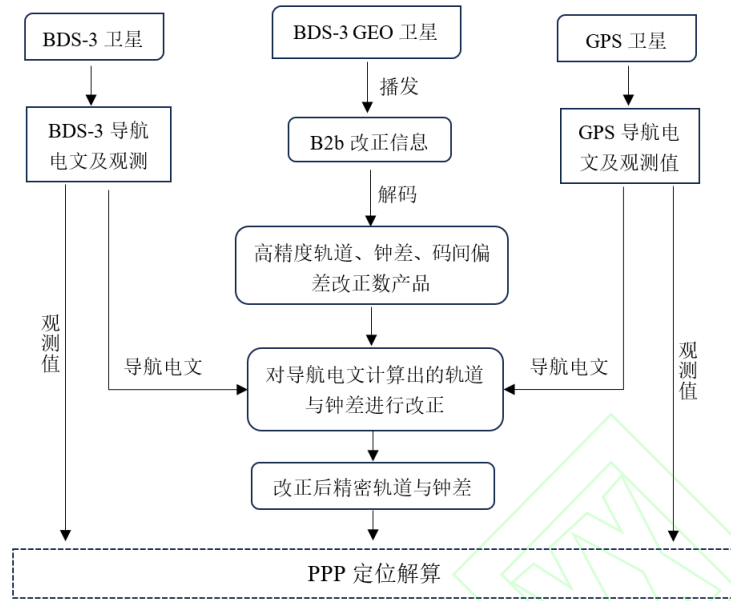


图 1 基于 PPP-B2b 产品的定位算法流程

Fig. 1 Algorithm Flowchart for Positioning Based on PPP-B2b Products

本文 PPP 解算采用武汉大学自主研发的 PANDA 软件<sup>[25-26]</sup>。PPP 解算使用双频无电离层组合观测值，利用无几何距离（Geometry Free, GF）组合和 Melbourne-Wubben 组合（M-W 组合）进行周跳探测，对流层延迟误差采用 Saastamoinen 模型和 GMF 投影函数改正，天线相位缠绕、相对论效应、潮汐效应、地球自转等误差采用模型改正，软件采用平方根信息滤波（Square Root Information Filter, SRIF）估计站坐标、模糊度、接收机钟差以及残余电离层延迟参数。软件采用的精密产品分别为 PPP-B2b 信号改正广播星历后轨道和钟差产品（下文简称 B2b 改正产品）以及武汉大学 IGS 数据中心发布的精密轨道和钟差产品（下文简称 WUM 精密产品）。

## 2 结果与分析

### 2.1 实验数据

北京时间 2022 年 9 月 5 日 12 时 52 分 18 秒在四川甘孜州泸定县（29.59° N, 102.08° E）发生 Ms 6.8 级地震，震源深度 16 km。本次地震为走滑型地震，破裂面走向为北北西-南南东，破裂由震中向东南方向延伸，最大破裂点位于震中东南方向 10 km 处<sup>[27]</sup>。本文选取了地震发生当天陆态网络 6 个 GNSS 测站（SCSM、SCTQ、SCYX、SCXD、SCXJ、SCLT）1Hz 观测数据进行分析，测站分布如图 2 所示，红色五角星为震中位置，黑色圆点为高频 GNSS 测站，黑色实线描绘了地震破裂方向。由于陆态网络工程建立较早，该 6 个测站的 GNSS 接收机无法接收北斗三号卫星数据，因此后续研究仅采用 GPS 观测数据。图 3 显示了地震期间测站 SCYX 一小时（12: 00-13: 00）的 GPS 卫星天空图。PPP-B2b 产品由定制

的飞纳经纬接收机接收得到，并根据前一节描述的原理与方法获得 B2b 精密改正产品。

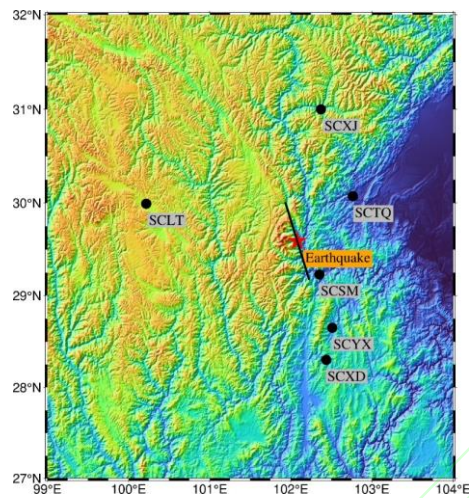


图 2 震中与 GNSS 测站分布图

Fig. 2 Distribution Map of Epicenter and GNSS Stations.

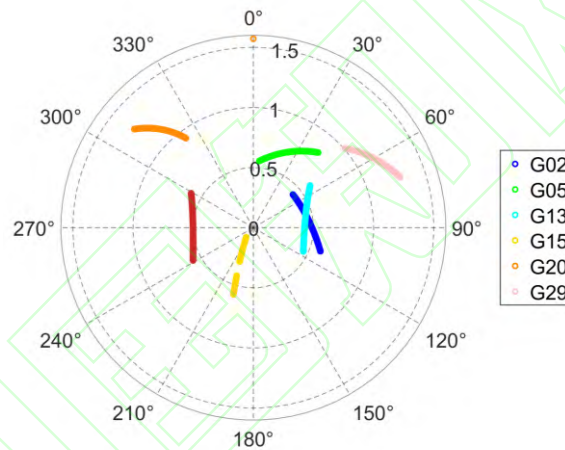


图 3 地震期间测站 SCYX 一小时 GPS 卫星天空图

Fig. 3 One-hour GPS Satellite Sky Plot of Station SCYX During the Earthquake

## 2.2 静态实验结果

本文首先利用 B2b 改正产品与 WUM 事后精密产品对 6 个测站的 GPS 数据进行 PPP 解算，得到各个测站东、北、高程三个方向的定位结果。为了定量评估两种 PPP 结果的解算精度，选取地震发生前测站静止不动的时段进行精度统计。图 4 为距离震中最近的测站 SCSM 与距离较远的 SCLT 测站静止期间 5 分钟的定位结果，其中 (a) 图为 WUM 精密产品定位结果，(b) 图为 B2b 改正产品定位结果。



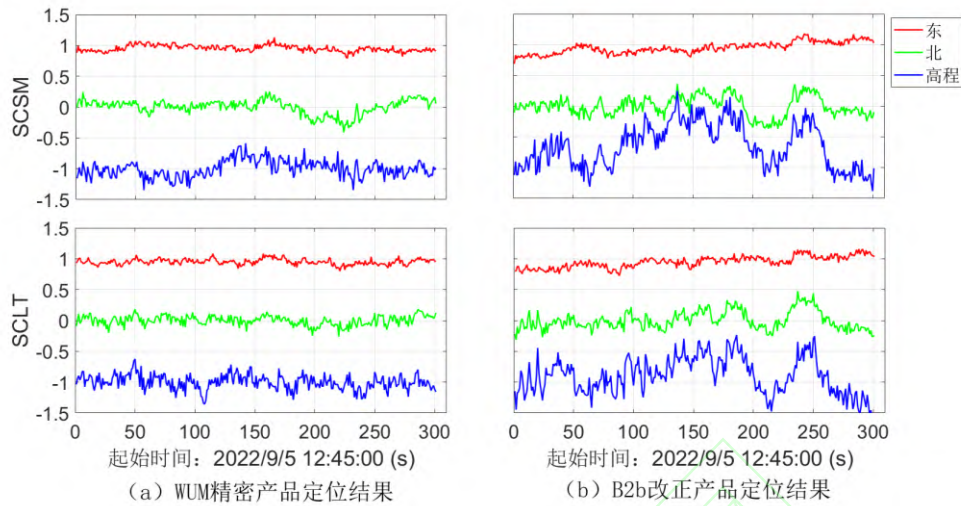


图 4 基于 WUM 精密产品与 B2b 改正产品的 PPP 结果

Fig. 4 PPP Results based on the WUM Products and B2B Products

表 2 统计了 6 个测站 PPP 定位精度 RMS 值。基于 WUM 精密产品的 PPP 定位精度在东、北、高程三个方向平均 RMS 分别为 0.56 cm、0.93 cm、1.35 cm，基于 B2b 产品的 PPP 定位精度在东、北、高程三个方向平均 RMS 分别为 1.06 cm、1.53 cm、3.08 cm。说明两者在水平方向精度相当,可达 1-2 cm,后者在高程方向精度略低,但是其高程精度也优于 4 cm。根据前人研究结果表明,PPP 定位精度水平 1-2 cm,高程 3-5 cm,可满足地震监测精度要求<sup>[10-11]</sup>。需要说明都是,本研究主要瞄准地震波监测,而地震波的持续时间一般为几十秒至几分钟,因此统计时长为 5 分钟的静态定位精度,可满足地震监测需求。

表 2 两种产品 PPP 定位精度

Tab. 2 The Accuracy of PPP based on B2b and WUM Products

测站	WUM 精密产品			B2b 改正产品		
	东向/cm	北向/cm	高程/cm	东向/cm	北向/cm	高程/cm
SCLT	0.48	0.80	1.21	0.93	1.50	3.00
SCSM	0.53	1.19	1.37	0.94	1.62	3.55
SCTQ	0.47	0.81	1.69	0.77	1.40	3.07
SCXD	0.51	0.76	0.98	1.14	1.71	2.71
SCXJ	0.86	1.25	1.48	1.26	1.41	3.20
SCYX	0.48	0.79	1.36	1.30	1.53	2.94
平均值	0.56	0.93	1.35	1.06	1.53	3.08

### 2.3 地震位移监测结果

在验证基于 B2b 改正产品的 PPP 定位性能后,本文进一步评估其在地震位移监测中的性能。利用 B2b 改正产品和 WUM 精密产品分别对包含地震发生时刻的观测数据进行 PPP 解算得到地震位移波形。

图 5 显示了距离震中最近的测站 SCSM 的位移波形图，蓝线为 WUM 精密产品 PPP 定位结果，红线为 B2b 改正产品 PPP 定位结果。从图中可看出，东、北方向具有明显波动，高程方向波形较小。此次地震为走滑（strike slip）破裂，该破裂模式的特征为震动主要表现水平方向<sup>[27]</sup>。考虑到离震中最近的 SCSM 测站其高程方向无明显震动波形，因此后续分析仅展示水平方向位移结果。

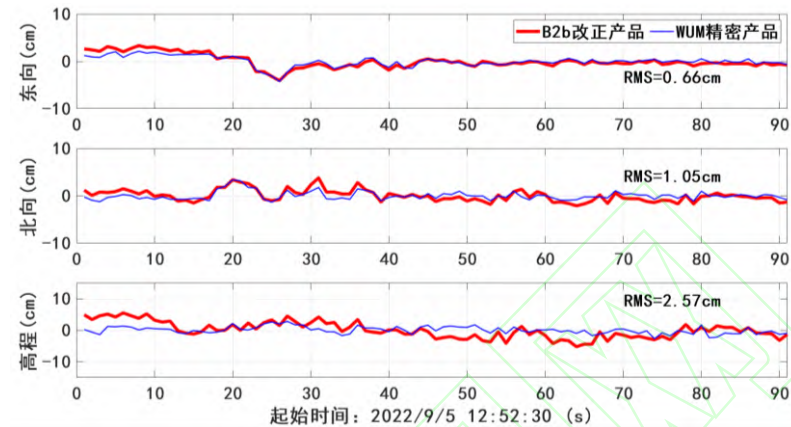


图 5 基于两种产品解算的 SCSM 测站地震位移波形

Fig. 5 The Displacement waveforms calculated by Two Kinds of Products at SCSM Station

图 6 绘制了 6 个测站东、北方向的地震位移波形。WUM 精密产品解算结果用蓝线表示；B2b 改正产品解算结果用红线表示。为展示地震波到达时间及波形大小，纵轴按震中距进行排列与平移。从图中可以看出，距离震中最近的 SCSM 测站地震波最先到达，且位移波形最大。

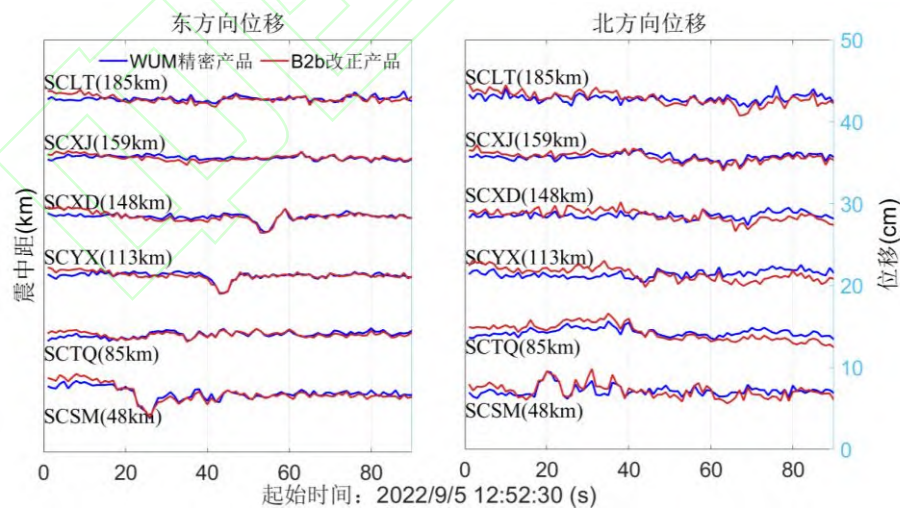


图 6 6 个测站东、北方向地震位移波形

Fig. 6 Earthquake Displacement waveforms of Six Stations in the East and North components

为了定量评估 B2b 改正产品解算结果的精度，以 WUM 精密产品解算的结果为参考，统计两者定位结果差值的 RMS 值（表 3）。统计结果表明，B2b 改正产品解算结果与 WUM

精密产品解算结果在东、北方向的差值仅为 0.56 cm 和 1.08 cm，说明基于 B2b 改正产品的地震波监测精度与基于 WUM 精密产品水平相当。

表 3 两种产品定位结果的差值 RMS

Tab. 3 The RMS Values of the Differences Between the B2b and the WUM Results

测站	东向/cm	北向/cm
SCLT	0.66	1.08
SCSM	0.66	1.05
SCTQ	0.47	1.16
SCXD	0.57	1.02
SCXJ	0.46	0.88
SCYX	0.51	1.30
平均值	0.56	1.08

结合图 2 和图 6 发现，位于震中东南方向的 SCYX（113km）测站和 SCXD（148km）测站位移幅度大于位于震中东北方向的 SCTQ（85km）测站，但前两者距离震中距离更远，表现出地震波衰减与传播距离不完全一致。Boatwright 等指出，地面震动强度与破裂方向密切相关，沿着破裂方向上的地面震动强度相对较高、垂直于破裂方向上的地面震动强度相对较低，且离发震断层近的区域震动强度高<sup>[28]</sup>。因此位于震中东南方向的 SCSM、SCYX、SCXD 测站的地震波大于东北方向的 SCTQ、SCXJ 测站的地震波。该结果与国家应急管理部发布的地震烈度图相吻合，可进一步验证此次地震破裂由震中向东南方向延伸。

#### 2.4 地震震级确定对比分析

地震震级是地震预警的关键参数之一，本文研究基于 B2b 改正产品定位结果的地震震级确定。首先从 B2b 改正产品定位结果中提取水平向峰值位移（Peak Ground Displacement, PGD），然后利用震级计算方式确定地震震级，并与 WUM 精密产品结果计算的震级进行对比。计算公式如下：

$$A = \sqrt{E^2 + N^2} \quad (7)$$

式（8）中， $A$ 为水平向面波质点运动最大位移（PGD），单位为微米（ $\mu m$ ）； $E$ 为东方向位移，单位为微米（ $\mu m$ ）； $N$ 为北方向位移，单位为微米（ $\mu m$ ）。国标《地震震级的规定》（GB 17740-2017）给出的面波地震公式如下：

$$M_s = \log_{10} \frac{A}{T} + 1.66 \log_{10}(\Delta) + 3.5 \quad (8)$$

式（9）中， $A$ 为水平向面波质点运动最大位移，单位为微米（ $\mu m$ ）； $\Delta$ 表示震中距，单位为度（ $^\circ$ ）； $T$ 为 $A$ 对应的周期，单位为秒（ $s$ ），地震面波振幅的主振周期一般设定为 20 秒，因此取  $T = 20s$ 。

图 7 中下图给出了利用 B2b 产品和 WUM 产品定位结果提取的 PGD，两种定位结果提

取的 PGD 差值平均值仅为 0.61 cm，说明两者水平相当。图 7 上图为利用公式 (9) 和 PGD 计算的地震震级，两种定位结果计算的震级平均值分别为 Ms 6.76 和 Ms 6.67，结果非常接近，仅为 0.09 个震级单位。与中国地震局官方公布的面波震级 Ms 6.8 仅相差 0.04 个震级单位。对于部分测站，如 SCTQ、SCXJ 的 PGD 值差距分别达到了 1.04 cm、1.22 cm，从图 2 中可以看出，由于两个测站位于地震破裂面的垂直方向，2.2 节中分析结果表明两种定位结果波形差距较大，导致两测站 PGD 差值高于其他测站。但是从公式 (8) 中可分析出，由于计算震级时对 PGD 值取对数处理，因此 SCTQ、SCXJ 计算的震级差距仅为 0.19、0.18 个震级单位。姚文敏等<sup>[29]</sup>研究了震级与 PGD 误差的问题，表明当 PGD 值差距在 3 cm 以内时，对震级计算的影响较小，与本研究结果一致。

受破裂传播方向和测站场地放大效应影响，单个测站确定的震级略有差异，但是与官方公布的震级最大相差也仅为 0.5 个震级单位。由此可见，基于 B2b 改正产品的精密定位方法可用于地震震级确定。

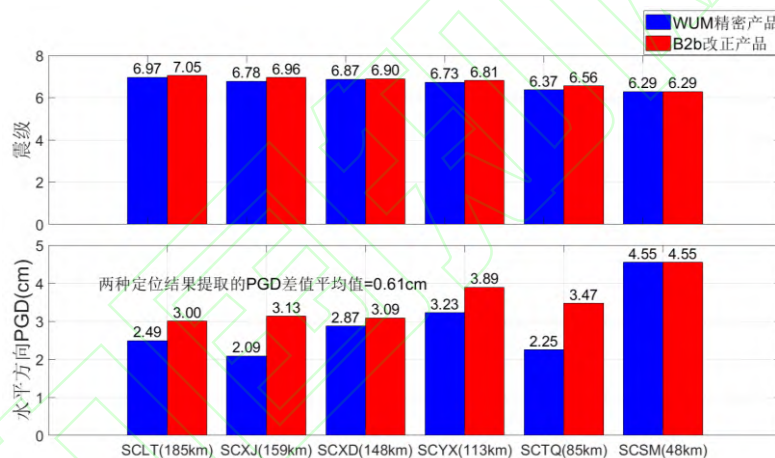


图 7 两种定位方法获得的震级和 PGD 提取结果

Fig. 7 The magnitude and PGD values obtained by two positioning methods

### 3 结语

本文提出了一种基于北斗 B2b 改正信号的地震同震形变实时监测方法，该方法可解决传统 PPP 实时解算需要提供精密卫星轨道和钟差产品，且高度依赖于网络传输条件的问题。以 2022 年四川泸定 Ms 6.8 级地震为例，验证了该方法的可行性和精度水平。实验结果表明，基于 B2b 改正产品的 PPP 精度水平方向可达到 1-2 cm，高程方向可达到 2-4 cm；以 WUM 精密产品解算为参考，基于 B2b 改正产品解算的位移波形在东、北方向的差值仅为 0.56 cm 和 1.08 cm，说明两者精度相当。利用 B2b 产品和 WUM 产品定位结果确定的泸定地震震级分别为 Ms 6.76 和 Ms 6.67，互差仅为 0.09 个震级单位，与中国地震局公布的震级相比仅相差 0.04 个震级单位。因此，基于北斗 B2b 产品的 PPP 方法可应用于地震实时监测及地震参数快速确定等应用研究，具有较为广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] Larson M K, Bodin P, Gomberg J. Using 1-Hz GPS Data to Measure Deformations Caused by the Denali Fault Earthquake[J]. *Science*, 2003,300(5624):1421-1424.
- [2] Kanamori-H. Real-time seismology and earthquake damage mitigation [J].*Annual Review of Earth and Planetary Sciences*,2005,33(1):195-214.
- [3] Bilich, Andria, John F. Cassidy, et al. GPS seismology: Application to the 2002 M w 7.9 Denali fault earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*,2008.98 (2): 593-606.
- [4] Du Cunpeng. Deformation Characteristics and Seismic Risk Analysis of Anqiu : Juxian Fault Based on GNSS and Seismic Phase Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(2): 332-332. (杜存鹏.基于 GNSS 和震相资料的安丘: 莒县断裂形变特征及地震危险性分析[J].*武汉大学学报 (信息科学版)*, 2024, 49(2): 332-332.)
- [5] Li Zhicai, Chen Zhi, Wu Junli, et al. Co-seismic Deformation of the Jishishan 6.2 Earthquake in Gansu Province Based on High-Frequency GNSS Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. DOI: 10.13203/j.whugis20240004 (李志才, 陈智, 武军邴,等. 基于高频 GNSS 观测的甘肃积石山 6.2 级地震同震形变[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*. DOI: 10.13203/j.whugis20240004)
- [6] Xu Caijun, He Kefeng. Advancements in Earthquake Cycle Deformation Research Based on Geodetic Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1736-1755. (许才军, 贺克锋. 地震周期形变的大地测量研究进展和展望[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2023, 48(11): 1736-1755.)
- [7] Zheng Jiawei. Rapid determination of rupture characteristic of large earthquakes based on high-rate GNSS and accelerometer[D].*Wuhan University*,2022.(郑佳伟. 基于高频 GNSS 和加速度计信息的大震破裂特征快速确定研究[D].*武汉大学*,2022.)
- [8] Zheng Jiawei, Fang Rongxin, Li Min, et al. Line-Source Model Based Rapid Inversion for Deriving Large Earthquake Rupture Characteristics Using High-Rate GNSS Observations [J].*Geophysical Research Letters*, 2022, 49(5): e2021GL097460.
- [9] Zheng Jiawei, Li Min, Fang Rongxin, et al. Rapid inversion of fault rupture characteristics for the Luding M6.8 earthquake in Sichuan with high-rate GNSS and strong-motion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*,2023,66(4):1419-1427.(郑佳伟,李敏,方荣新,等.联合高频

GNSS 和强震数据快速反演四川泸定 6.8 级地震断层破裂特征[J].地球物理学报,2023, 66(04):1419-1427.)

[10] Xiong Yongliang, Huang Dingfa, Xu Shaoguang, et al. Long Distance Kinematic GPS Data Processing and Kinematic Crustal Deformation Features Analysis of Wenchuan Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010,35(03):265-269.(熊永良,黄丁发,徐韶光,等.长距离动态 GPS 数据处理方法与汶川地震引起的动态地壳形变特征分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2010,35(03):265-269.)

[11] Zheng Kai. Research on Methodology of Broadband Seismic Displacement Monitoring Using a Single High-rate GNSS Receiver[D].*Wuhan University*,2020.(郑凯. 单站 GNSS 宽频带地震地表位移监测方法和关键技术研究[D].武汉大学,2020.)

[12] Bock, Yehuda, Diego Melgar, et al. "Real-time strong-motion broadband displacements from collocated GPS and accelerometers [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*,2011.101 (6): 2904-2925.

[13] Shi Chuang, et al. Seismic deformation of the Mw 8.0 Wenchuan earthquake from high-rate GPS observations [J]. *Advances in Space Research*,2010.46 (2): 228-235.

[14] Zhang X H, Guo F, Guo B F, et al. Coseismic displacement monitoring and wave picking with high-frequency GPS[J].*Chinese Journal of Geophysics*,2012,55(06):1912-1918.(张小红,郭斐,郭博峰,等.利用高频 GPS 进行地表同震位移监测及震相识别[J].地球物理学报,2012,55(06):1912-1918.)

[15] Fang R, Shi C, Song W, et al. Determination of earthquake magnitude using GPS displacement waveforms from real-time precise point positioning[J].*Geophysical Journal International*,2014,196(1):461-472.

[16] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Precise Point Positioning Service Signal PPP-B2b (Version 1.0) [DB/OL].2020. (中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件精密单点定位服务信号 PPP-B2b(1.0 版) [DB/OL].2020. <http://www.BeiDou.gov.cn/xt/gfxz/202008/P020200803362060731204.pdf>

[17] Song Weiwei, Zhao Xinke, Lou Yidong, et al. Performance Evaluation of BDS-3 PPP-B2b Service[J].*Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(3): 408-415.(宋伟伟,赵新科,楼益栋等.北斗三号 PPP-B2b 服务性能评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(3):408-415.)

- [18] Guo Fei, Zhou Chao, Wu Ziheng. Evaluation of BDS-3 PPP-B2b signal accuracy and precise point positioning service[J].*Journal of Nanjing University of Information Science & Technology( Natural Science Edition)*, 2022,14(06):658-666.(郭斐,周超,吴子恒. 北斗三号 PPP-B2b 信号精度及精密单点定位性能评估[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2022,14(06):658-666.)
- [19] Ren Z, Gong H, Peng J, et al. Performance assessment of real-time precise point positioning using BDS PPP-B2b service signal[J].*Advances in Space Research*, 2021, 68(8): 3242-3254.
- [20] Zhang W, Lou Y, Song W, et al. Initial assessment of BDS-3 precise point positioning service on GEO B2b signal[J].*Advances in Space Research*, 2022, 69(1): 690-700.
- [21] Nie Z, Xu X, Wang Z, et al. Initial assessment of BDS PPP-B2b service: precision of orbit and clock corrections, and PPP performance[J].*Remote Sensing*, 2021, 13(11): 2050.
- [22] Yang H, Ji S, Weng D, et al. Assessment of the Feasibility of PPP-B2b Service for Real-Time Coseismic Displacement Retrieval [J].*Remote Sensing*, 2021, 13(24).
- [23] Fang R, Lv H, Hu Z, et al. GPS/BDS precise point positioning with B2b products for high-rate seismogeodesy: application to the 2021 M w 7.4 Maduo earthquake[J].*Geophysical Journal International*, 2022, 231(3): 2079-2090.
- [24] Zang J, Fan S, Xu C, et al. Performance assessment of the BDS-3 PPP-B2b service for real-time earthquake source description: a case study for the 2021 Mw 7.4 Maduo earthquake [J]. *GPS Solutions*, 2023, 28(1).
- [25] Shi Chuang, Zhao Qile, Lou Yidong, et al. PANDA : Comprehensive Processing Software for Satellite Navigation Systems and Its Research Progress[J].*Spacecraft Engineering*,2009,18(04):64-70.(施闯,赵齐乐,楼益栋,等.卫星导航系统综合分析处理软件 PANDA 及研究进展[J].航天器工程,2009,18(04):64-70.)
- [26] Liu J, Ge M. 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 Zhe, Fang Lihua, Xu Lisheng. Primary source characteristics of the 2022 Sichuan Luding Ms 6.8 Earthquake[J].*Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(4): 1397-1408.(张喆,房立华,许力生. 2022 年四川泸定 Ms 6.8 地震震源基本特征[J]. 地球物理学报, 2023, 66(4): 1397-1408.)
- [28] Boatwright J. The persistence of directivity in small earthquakes[J].*Bulletin of the*

*Seismological Society of America*, 2007, 97(6): 1850-1861.

- [29] Yao Wenmin, Fang Rongxin, Wang Zhen, et al. Use and Accuracy of High-rate GNSS Observations to Quickly Estimate Earthquake Magnitude[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(12):1249-1253. (姚文敏,方荣新,王珍,等.高频 GNSS 观测快速估计地震震级及其精度评估[J].*大地测量与地球动力学*,2019, 39(12):1249-1253.)

#### 网络首发:

标题: 基于北斗 PPP-B2b 改正信号的地震同震形变实时监测方法

作者: 方荣新, 陈智潜, 李大伟, 郑佳伟, 吕黄晖, 胡冰燕, 刘经南

收稿日期: 2024-10-28

DOI:10.13203/j.whugis20240163

#### 引用格式:

方荣新, 陈智潜, 李大伟, 等. 基于北斗 PPP-B2b 改正信号的地震同震形变实时监测方法[J].*武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240163 (FANG Rongxin, CHEN Zhiqian, LI Dawei, et al. A Method for Real-time Coseismic Displacement Monitoring Based on BDS PPP-B2b Correction Signals[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240163)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

#### 您感兴趣的其他相关论文:

**基于模拟高频 GNSS 数据的安宁河断裂强震滑动分布快速反演研究**

高志钰, 李彦川, 单新建, 黄星

*武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(9): 1527-1537.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230221>

**高频 GNSS 数据 MGF 周跳解算方法的质量控制**

董可, 冯威, 董兴干, 黄丁发

*武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(2): 268-276.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200200>

**北斗三号 PPP-B2b 服务性能评估**

宋伟伟, 赵新科, 楼益栋, 孙唯彬, 赵正予

*武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(3): 408-415.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200686>