

鲍艳,王国权,于笑,等,2020. 华北稳定参考框架 NChina20 的建立及应用. 中国地震,36(4):788~805.

华北稳定参考框架 NChina20 的建立及应用

鲍艳¹⁾ 王国权²⁾ 于笑²⁾ 肖根如³⁾
丁晓光⁴⁾ 赵瑞斌⁵⁾ 甘卫军⁶⁾

- 1) 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室,北京 100124
- 2) 美国休斯顿大学,地球与大气科学系,休斯顿 77024
- 3) 东华理工大学,测绘工程学院,南昌 330013
- 4) 陕西省地震局,西安 710054
- 5) 天津城建大学,地质与测绘学院,天津 300384
- 6) 中国地震局地质研究所,北京 100029

摘要 选用中国大陆地壳运动观测台网(CMONOC)在华北地区约8年(2011年10月~2019年9月)的连续观测数据,建立了华北稳定参考框架——NChina20。NChina20与全球参考框架(IGS14)保持坐标系缩放比例一致,两坐标系统在历元2020.0对齐。本文详细介绍了将相对于IGS14的位置时间序列转换到NChina20的方法,并列举了NChina20在城市地面升降长期观测领域的应用。NChina20的稳定性(精度)在水平方向约为0.5mm/a,在垂直方向约为0.6mm/a。参考框架的稳定性随时间的推移而退化,建议NChina20的使用范围在时间上限于2006~2025年的时间窗口内,在空间上限于华北活动地块区域内。选用华北地区5个基岩站20年(2000~2019年)的连续观测数据,建立了华北地区季节性地面升降预测模型。华北稳定参考框架将每隔几年更新一次,以缓解框架稳定性随时间的退化,并与IGS参考框架同步更新。

关键词: IGS14 GNSS NChina20 稳定参考框架 华北活动地块
季节性地面升降模型

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0788-18 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

近20年来,基于全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)的高精度测量技术已被广泛应用到城市地质灾害长期观测和工程结构健康监测(Structural Health Monitoring,SHM)领域,例如滑坡、地面沉降、活动断层的长期观测以及大坝、海堤、大跨度桥梁、高层建筑和海洋平台的稳定性监测等。随着GNSS观测系统的完善和数据处理技术的

[收稿日期] 2020-06-22; [修定日期] 2020-08-12

[项目类别] 国家自然科学基金(51829801)资助

[作者简介] 鲍艳,女,1976年生,副教授,主要从事大地测量数据分析和大型工程结构健康监测研究工作。

E-mail:baoy@bjut.edu.cn

甘卫军,通讯作者,男,1964年生,研究员,主要从事大地测量、地壳形变和构造运动等方面的研究工作。

E-mail:wjgan@ies.ac.cn

成熟,高精度 GNSS 监测技术将在工程实践中得到更为广泛的应用。由 GNSS 原始数据解算得到的观测点的初始位置一般与卫星轨道保持同一参考框架,即全球参考框架,在工程应用中,通常需要将该坐标位置转换到区域参考框架中。中国大陆及周边地区部分永久 GNSS 观测台站在全球参考框架下的水平运动速度场如图 1 所示,其中,场地速度由 20 年 (1999~2019 年)时间窗口内观测时间跨度大于 5 年、观测天数大于 1000 天的坐标位置时间序列解算得到,参考框架为 IGS14。IGS14 由国际全球导航卫星系统服务组织 (International GNSS Service, IGS) 于 2017 年 1 月 29 日启用。相对于全球参考框架 IGS14,中国不同地区的地壳运动速度 (大小和方向) 有显著差异,不考虑滑坡、地面沉降等局部地表变形因素,华北地区的地壳运动速度在 EW 方向约为 3.2cm/a (向东),在 SN 方向约为 1.1cm/a (向南),在垂直方向约为 0.2cm/a (向上)。IGS 实现全球参考框架的基本原则是将分布在全球的一组参考站 (约 400 个台站) 的总体水平运动速度限制到最小 (趋于 0) (Reischung et al, 2016)。观测点相对于全球参考框架的场地速度通常由观测点所在地壳块体的运动所主导,局部的、短期的、毫米级每年的场地变形往往会被长期的、大尺度的 (厘米级每年) 的地壳块体运动速度所掩盖 (Wang et al, 2015a, 2019)。因此,很难在全球参考框架中精确研究区域性的、短期的、缓慢的 (毫米级每年) 地表位移或结构变形。

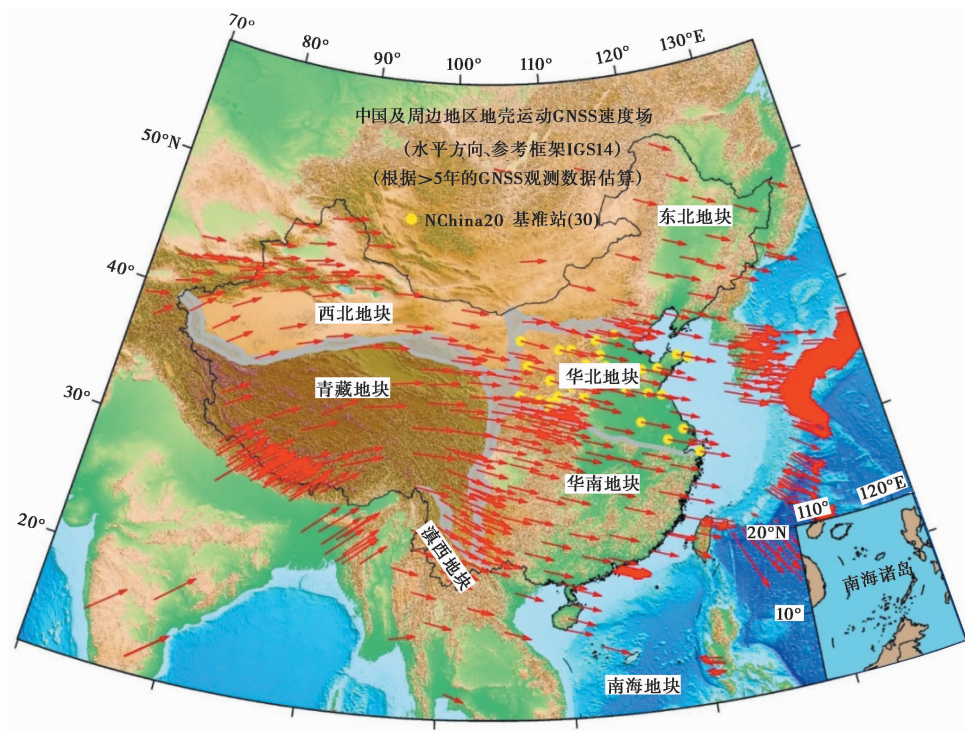


图 1 中国及周边地区地壳运动 GNSS 速度场 (水平方向)

基于中国大陆地壳运动观测网络 (Crustal Movement Observational Network of China, CMONOC) 的连续 GNSS 观测数据,我们在 2018 年建立了华北稳定参考框架——NChina16 (Wang et al, 2018)。NChina16 基于华北地区 12 个 GNSS 站约 5 年 (2012~2016 年) 的连续

观测数据,实现由全球参考框架 IGS08 到华北稳定参考框架的坐标转换。NChina16 在北京昆仑公寓大厦稳定性监测与预警(Bao et al, 2018)、石家庄地铁 1 号线穿滹沱河隧道河底变形监测与预警(郭稳等, 2020a)、天津地面沉降长期观测(Zhao et al, 2020)等项目中得到应用。IGS08 于 2017 年被 IGS14 所替代,因此,华北稳定参考框架需要做相应的更新。本文选用 30 个基准站长达 8 年(2011 年 10 月~2019 年 9 月)的连续观测数据,更新华北稳定参考框架。更新后的华北稳定参考框架与 IGS14 保持坐标系缩放比例一致,并在历元 2020.0 与 IGS14 的坐标位置对齐,因此该参考框架命名为 NChina20。

在卫星导航与定位研究领域,GNSS 已逐步代替 GPS(Global Positioning System)成为卫星导航的通用术语。GNSS 包括美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧洲 Galileo、中国北斗以及其他区域卫星导航系统。近年来,CMONOC 台站也开始记录 GLONASS、Galileo 和中国北斗系统的信号。每个 GNSS 系统在定义卫星轨道时均有自己独立的参考系统,例如, GPS 使用 WGS 84 参考框架, GLONASS 使用 PZ-90 地心地固参考框架, Galileo 使用伽利略地球参考框架(GTRF), 中国北斗(BDS)使用中国大地坐标参考框架(CTRF2000)(魏子卿等, 2011)。IGS 根据长期的地面观测数据解算各导航系统每个卫星相对于全球参考框架的精确位置,即将卫星轨道与最新的 IGS 参考框架对齐。GNSS 处理软件一般选用由 IGS 提供的“最终”卫星轨道数据,将不同卫星系统的定位结果统一到全球参考框架系统。IGS14 参考框架下的 24h 平均定位结果是当前高精度 GNSS 静态观测的基础产品。本文在解算观测点的位置时仅使用了 GPS 信号,但本研究的主要成果,即实现 NChina20 所需的 7 个参数和季节性地面升降预测模型,适用于所有的 GNSS 系统,因此,全文使用 GNSS。

1 华北地区 GNSS

自 20 世纪 90 年代以来,高精度 GNSS 大地测量技术在全球地壳板块运动研究领域得到广泛的应用。中国各级地方政府和科研机构运行的 GNSS 观测台网为研究中国大陆地壳形变和板块构造积累了基础数据,同时也为中国大陆现今构造区划提供了重要依据(张培震等, 2002; 甘卫军等, 2012; Wang et al, 2001, 2020; Gan et al, 2007)。张培震等(2003)根据地质构造和早期的 GNSS 观测结果,将中国大陆及其邻区划分为 6 个一级活动地块区(青藏、西域、南华、滇缅、东北亚和华北)和 22 个二级活动地块。本文将这 6 个一级活动地块区在中国境内的部分分别称为:青藏地块、西北地块、大华南地块(华南地块、南海地块)、滇西地块、东北地块和华北地块(图 1)。本文所定义的“华北地区”即华北稳定参考框架的覆盖范围,与张培震等(2003)划定的“华北活动地块”的范围基本一致,包括 3 个二级活动地块:鄂尔多斯地块、华北平原和鲁东-黄海地块。

近 20 年来,GNSS 静态定位的精度和可靠度随着 GNSS 硬件和软件的不断完善得到显著提高。目前,GNSS 连续观测数据经过后处理得到的单日位置精度(可重复性)一般均能达到毫米级(Wang et al, 2017),但是在地质灾害和大型工程变形监测领域,用户最关心的通常是观测点的位置随时间变化的速度,即场地位移速度或结构变形速度。高精度的单点定位并不保证得到可靠的场地速度。观测点的位移速度直接影响对观测对象稳定性(或活动性)的评价。GNSS 长期观测得到的位移时间序列以及由此推算得到的位移速度的可靠性不仅仅取决于硬件(天线和接收器),而且在很大程度上取决于数据处理软件和固件(区域参考

框架)(Wang et al, 2015b)。固件也称“软”硬件,源于硬件(长期的 GNSS 连续观测),置于软件之中,在一个比较长的时间窗口(5 年或更长)内保持稳定。硬件、软件和固件三者相结合,共同构建高精度区域大地测量基础设施。

1.1 GNSS 数据处理

GNSS 高精度数据处理技术已日益成熟,处理方法一般可归纳为两种:双差定位(Double Difference, DD)和精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)。不同的 GNSS 数据后处理软件往往采用不同的方法,例如美国麻省理工学院(MIT)开发的 GAMIT/GLOBK 软件应用 DD 方法,美国喷气推进实验室(JPL)开发的 GipsyX 软件应用 PPP 方法,瑞士波恩大学(University of Bern)开发的 Bernese 软件可以选用 DD 或 PPP 方法,武汉大学开发的 PANDA 软件综合使用 DD 和 PPP 两种方法。双差定位和精密单点定位的最大差别是双差定位方法需要参考站的同步观测数据,而精密单点定位方法不需要任何参考站的数据,从而避免了由参考站的不稳定而导致的观测点位置误差,也降低了观测成本。国内外许多研究机构均提供高精度 GNSS 数据处理服务,工程技术人员经简单培训后,一般能够承担高精度 GNSS 观测项目,无需涉及到繁杂的数据处理。多年来,作者所在研究小组采用 GAMIT/GLOBK、Bernese、PANDA 等软件处理 GNSS 数据。本研究选用由美国内华达大学(Blewitt et al, 2018)、UNAVCO(Herring et al, 2016)和作者所在研究小组提供的、相对于 IGS14 的地心地固三维笛卡尔坐标(ECEF-XYZ)时间序列,用 Wang(2011)的方法清除位移时间序列中的异常值(离群值),该方法剔除约 5%到 10%的观测值。本研究用 Blewitt 等(2016)提出的 MIDAS(Median Interannual Difference Adjusted for Skewness)方法估算位移时间序列的线性速度,即观测点的场地速度。简单来讲,MIDAS 首先计算每相隔 1 年(365 天)的位移速度(斜率),然后从大量的 1 年速度样本中选取中位数来代表该位移时程的线性速度。对于未受到短期或局部场地变形(滑坡、地面沉降、地震同震位移、震后位移)影响、连续观测历史超过五年的台站,由 MIDAS 和传统的最小二乘法得到的场地速度差异通常小于 0.3mm/a。MIDAS 方法能够有效避免或减小由季节性地面变形、天线更换、地震同震位移(位置突变)、震后位移(非线性位移)等事件对场地速度估算值的影响。

北京房山台(BJFS)在全球参考框架(IGS14)中的三方向(东西 EW、南北 NS、垂直方向 UD)位移时间序列(1999~2019 年)如图 2(a)所示。该台站的位移时间序列受到 2011 年 3 月 11 日日本东海大地震(M_w 9.0)的显著影响。根据震前 12 年(1999~2010 年)的连续观测数据估算得到的场地速度为:东西(EW)方向 $3.05 \pm 0.02 \text{ cm/a}$ ($\pm 0.02 \text{ cm/a}$ 表示 95%的置信度,向东)、南北(NS)方向 $-1.08 \pm 0.02 \text{ cm/a}$ (向南)、垂直(UD)方向 $0.21 \pm 0.06 \text{ cm/a}$ (向上)。该台站相对于华北稳定参考框架的位移时间序列如图 2(b)所示。在 GNSS 大地测量研究领域,通常采用稳定台站位移时间序列的均方根误差(RMSE)来评价单日位置的可重复性,也称位移精度(Soler et al, 2016)。PPP 单日解的精度在水平方向一般小于 5mm,在垂直方向小于 8mm(Bertiger et al, 2010)。用 DD 方法解算得到的相对于全球参考框架的单日解精度,会受到所选参考站的数量和质量以及观测站与参考站之间距离的影响。根据程鹏飞等(2013、2018)采用 GAMIT/GLOBK 软件处理我国陆态网数据的经验,DD 方法在全球参考框架下得的单日解位移精度可以达到 2~3mm。根据我们的统计分析,本研究所选用的 24h 平均位移的精度在水平方向为 2~4mm,在垂直方向为 5~8mm。对于观测区间为 8 年左右的

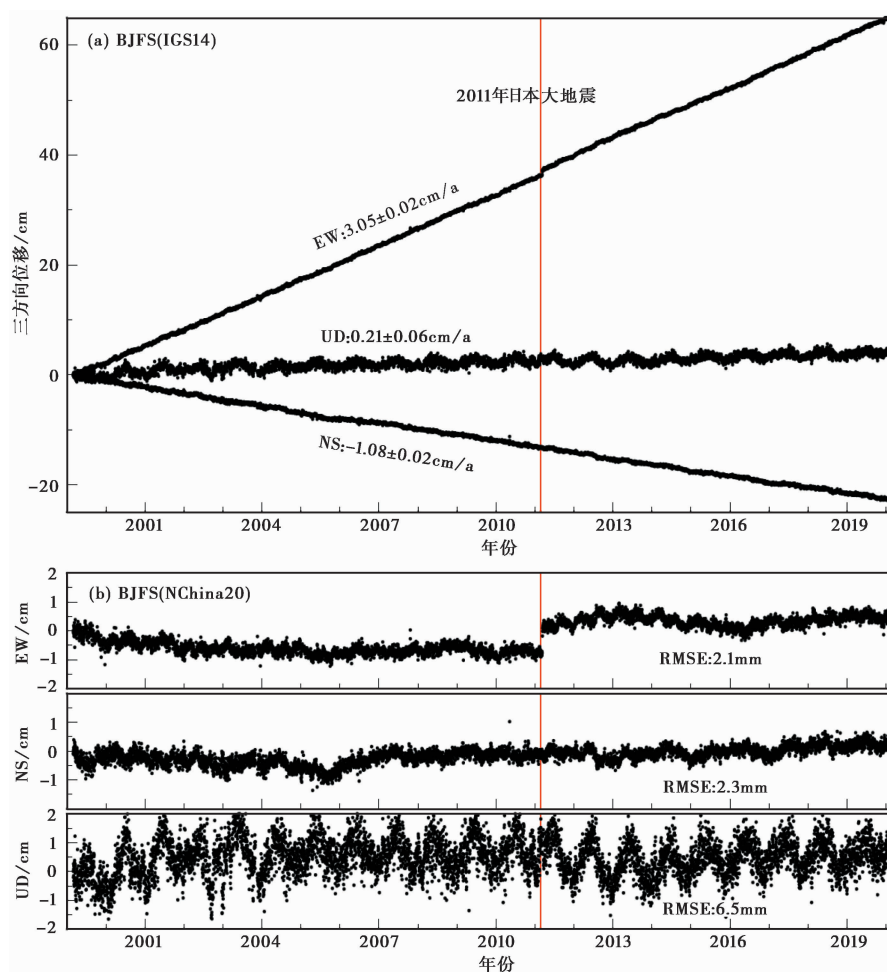


图 2 北京房山台 (BJFS) 20 年的位移 (相对坐标位置) 时间序列 (PPP 单日解)

(a) 相对于全球参考框架 (IGS14); (b) 相对于华北稳定参考框架 (NChina20); RMSE (均方根误差) 表示 PPP 单日定位 (24h) 的精度

连续 GNSS 单日解时间序列, 由位移时间序列估算的场地速度的可靠度 (95% 置信度) 大致为水平方向 $0.3 \sim 0.5 \text{ mm/a}$ 、垂直方向 $0.8 \sim 1.0 \text{ mm/a}$ 。

1.2 2011 年日本地震的影响

2011 年 3 月 11 日的日本大地震 ($M_w 9.0$) 在中国东部产生了长期的震后位移 (顾国华等, 2015), 自 2011 年 3 月以来的平均地壳运动速度与该地震之前的平均地壳运动速度有一定差别。BJFS 位移时间序列 (图 2(b)) 表明, 同震和震后位移在 EW 方向较为显著, 在 SN 方向较小, 在垂直方向几乎观察不到。华北地区 5 个基岩台站 JIXN、TAIN、BJSH、BJFS、ZHNZ 震前和震后的水平方向位移时间序列如图 3 所示, 参考框架为 NChina20, 这 5 个台站的位置参见图 4。

天津蓟县台 (JIXN) 距震中约 2157 km, 在 EW 方向记录到约 1 cm 的同震位移 (向东) 以及随时间渐变的震后位移。震后位移在 2011 年底之前相对较为明显, 尤其是在 EW 方向

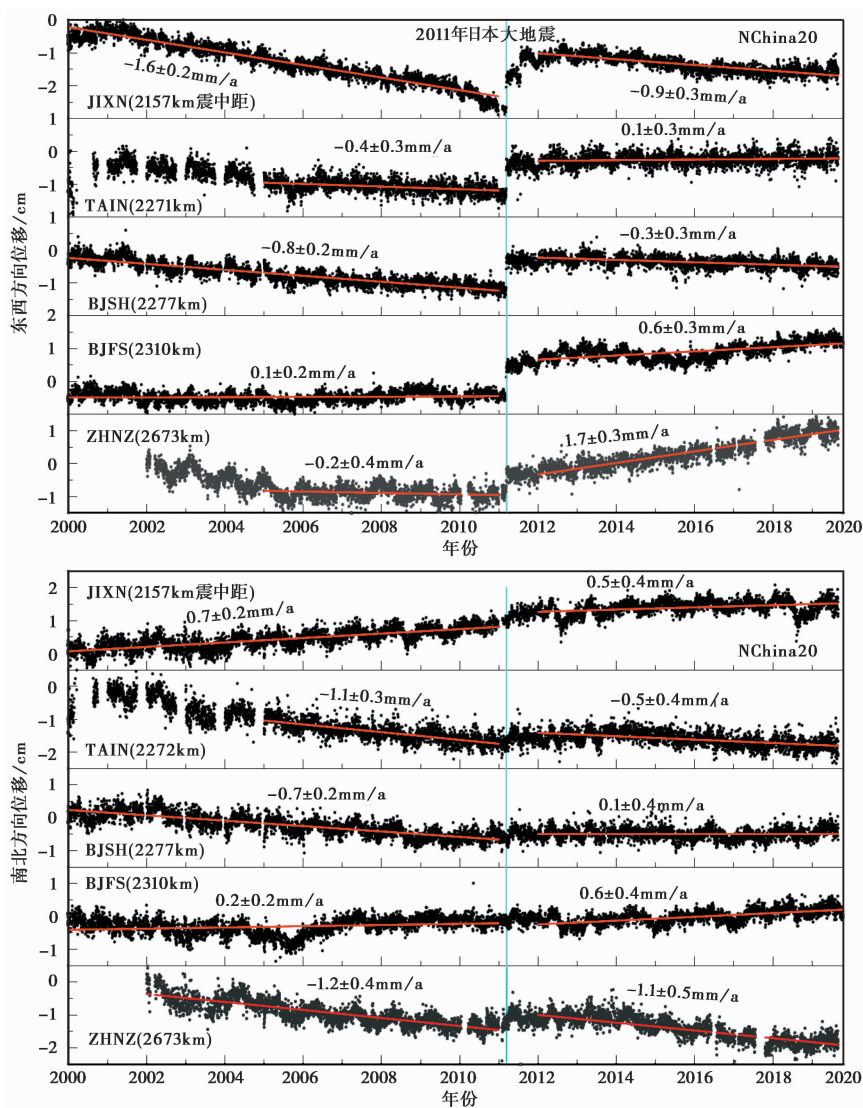


图3 日本大地震前后华北地区5个基岩台的场地速度对比(水平方向)

上。该台站震前(2000~2010年)EW方向的线性平均速度为 $-1.6 \pm 0.2 \text{ mm/a}$ (向西,相对于NChina20),震后(2012~2019年)的平均线性速度为 $-0.9 \pm 0.3 \text{ mm/a}$ (向西),二者相差 0.7 mm/a 。该台站在SN方向地震前后的线性速度相差约 0.2 mm/a 。山东泰安台(TAIN)距震中约2272km,地震前后在EW方向的速度差别为 0.5 mm/a ,在SN方向的速度差别为 0.6 mm/a 。北京十三陵台(BJSH)和北京房山台(BJFS)距震中相对较远,在EW方向地震前后的速度差别均约为 0.5 mm/a ;BJSH在SN方向地震前后的速度差别约为 0.8 mm/a ;BJFS在SN方向地震前后的速度差别约为 0.4 mm/a ,与线性速度的精度相当。河南郑州台(ZHZN)距震中约2673km,相比天津和北京的台站,其距震中远约500km,在EW方向的速度差别约为 2 mm/a ,在SN方向地震前后平均速度差别约为 0.1 mm/a 。与其他4个台站相比,ZHZN自

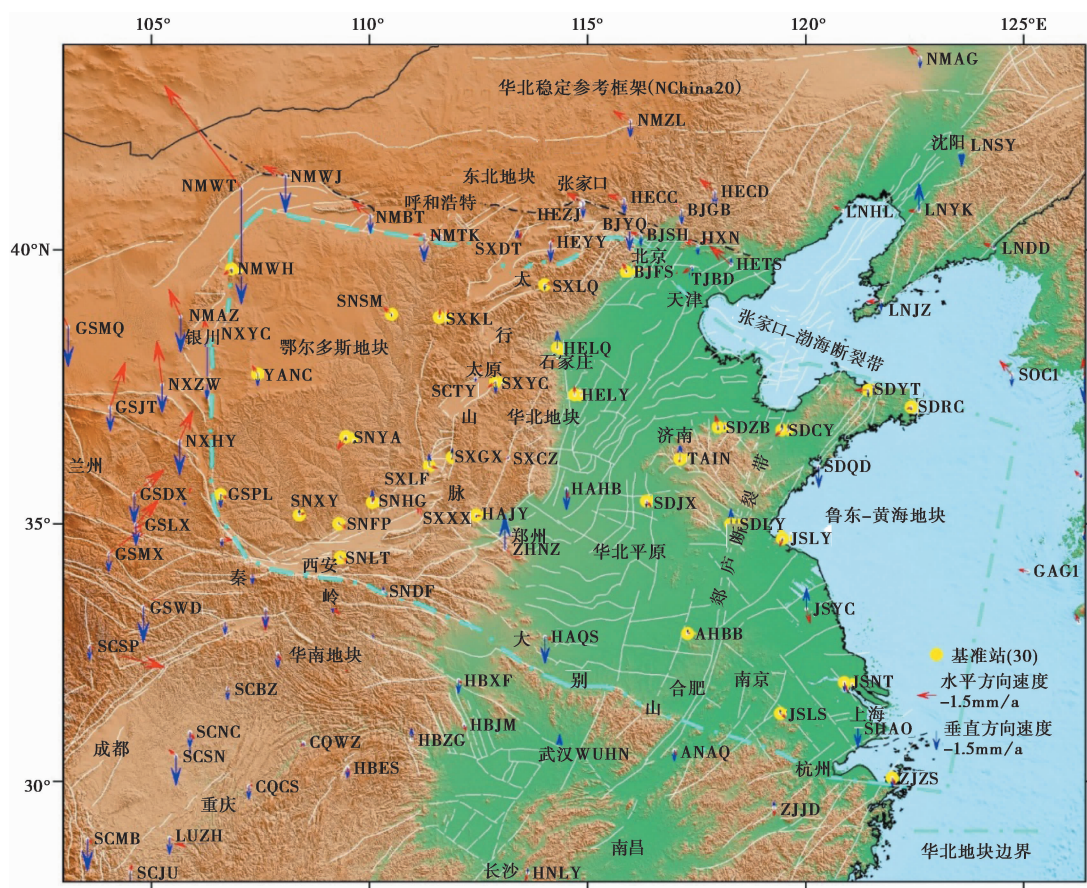


图 4 华北稳定参考框架的覆盖范围及 30 个基准站的分布

场地速度由 2011 年 10 月~2019 年 10 月跨度约为 8 年的 GNSS 连续观测数据估算,参考框架为 NChina20;白色线为第四纪以来活动过的断裂(邓起东等,2007)

2012 年以来呈现明显向东偏移的趋势。该台站位于一垃圾填埋场,观测墩基有可能未触及基岩面,推测该台站场地速度的变化并非由震后位移所致,很可能由场地局部变形所致。总体而言,在华北东部(北京、天津、河北、山东和江苏),地震前 10 年和地震后 10 年的地壳平均运动速度在水平方向相差约 0.5mm/a ,与场地速度的 95% 置信度 ($\pm 0.3 \sim \pm 0.5\text{mm/a}$) 相当(图 2)。垂直方向的场地速度在地震前后几乎无差异。大地震引起的震后位移随观测点到震中距离的增加而减小,因此,日本大地震震后位移对华北中西部地区当前地壳运动速度的贡献小于 0.5mm/a ,在华北地块内部由震后位移引起的地壳运动速度的差异更小。

2 NChina20 的实现

参考框架是坐标系的具体实现,因此,参考框架的转换也称坐标转换。全球参考框架采用地心地固笛卡尔三维坐标系(ECEF-XYZ),观测点在区域参考框架中的坐标位置通常由全球参考框架中的位置转换得到,这个过程即是区域参考框架的实现。在工程应用中,为方便研究地表位移,XYZ坐标位置通常换算到站心地平直角坐标系,即东-北-天坐标系(ENU:

East-west、North-south、Up-down)。

2.1 基准站选取原则

在大地测量基础研究和应用领域,参考框架之间的坐标转换通常通过 Helmert 转换实现,一组称为参考站的公共点用于联络 2 个参考框架。实现区域参考框架的参考站通常称为基准站。稳定参考框架基于区域地壳块体的刚性假设,即假设各基准站之间没有相对运动。地壳块体的整体刚度随着块体面积的增大和时间跨度的延长而减小,因此区域参考框架在时间和空间上均有其适用范围。基准站的合理选择对于实现稳定的参考框架至关重要,不稳定的基准站会降低参考框架的稳定性。理论上,用 3 个基准站的位置便能估算坐标转换所需要的 7 个参数,从而实现区域参考框架,但在实践中,则尽可能多地选择基准站,利用最小二乘法解算转换参数。增加基准站的数量,通常可提高转换参数的可靠性,从而提高坐标转换的准确性。基准站的空间分布对提高转换参数的可靠性也很重要,在实践中,所选基准站尽可能均匀覆盖整个选定的区域。需要指出的是,基准站的冗余不会给用户增加额外负担,用户不需要收集和处理任何基准站的数据,也无需担心基准站的未来状态。

区域参考框架采用线性模型来预测观测点在感兴趣的时间窗口内的位置,因此,位移时间序列的线性度是选择基准站的主要标准之一。本研究选用的大多数 GNSS 台站自 2010 年开始运行,日本大地震引起的震后位移(非线性地壳运动)在震后半年内相当显著(图 3),因此,选用 2011 年 10 月~2019 年 9 月跨度约 8 年的观测数据估算观测点的长期地壳运动速度。我们逐条检查了华北地区及周边约 80 个 GNSS 台站的三方向(EW、NS、UD)位移时间序列,首先剔除观测时间跨度小于 5 年或有频繁间断的台站,其次剔除明显受到地面沉降、滑坡、活动断层等小范围地面变形影响的台站。初步选定 50 个基准站,解算实现区域参考框架所需要的 7 个转换参数,具体方法参见 Wang 等(2018)。得到初始参考框架后,再计算各基准站相对于该初始参考框架的三方向速度,剔除水平方向速度大于 2mm/a 或垂直方向速度大于 2.5mm/a 的台站;再重新解算 7 个转换参数,计算基准站在新的参考框架内的三方向场地速度,剔除水平方向速度大于 1.5mm/a 或垂直方向绝对值速度大于 2mm/a 的台站。通过逐步淘汰,最后综合台站的空间分布和场地速度的大小,选定 30 个基准站实现华北稳定参考框架(图 4)。每个参考站相对于 NChina20 在水平方向的速度小于 1.0mm/a ,在垂直方向速度小于 1.2mm/a ,30 个参考站的平均速度为 0(表 1)。

华北活动地块的北边界为鄂尔多斯地块北缘的河套断陷带和张家口-渤海断裂带,南边界为秦岭-大别山山前断裂带。相对于 NChina20,内蒙包头台(NMBT)显示向西北方向的运动(约 2mm/a);内蒙托克托台(NMTK)在水平方向保持稳定(0.7mm/a),但在垂直方向明显下沉(-1.5mm/a)。因此,NMBT 和 NMTK 未被选为华北稳定参考框架的基准站。河北张家口台(HEZJ)、河北赤城县台(HECC)、北京古北口镇台(BJGB)、河北承德台(HECD)、北京延庆台(BJYQ)、天津蓟县台(TJXX)和河北唐山台(HETS)相对于北京房山台(BJFS)明显向西北方向运动(约 2mm/a)。根据这些台站相对于 NChina20 的场地速度,我们划定了华北活动地块的北边界(图 4),与张培震等(2003)划定的边界有细微差别。最西的基准站位于内蒙乌海市(NMWH)、宁夏盐池(YANC)和甘肃平凉(GSPL)一带;最东的台站位于山东烟台(SDYT)、山东荣成(SDRC)、江苏南通(JSNT)和浙江舟山(ZJZS)一带。

2.2 IGS14 到 NChina20 的坐标转换

Helmert 方法是实现区域参考框架的基本方法,也称做七参数坐标变换,即将 IGS14 参

表 1 华北稳定参考框架(NChina20)基准站的基本信息

台站	东经 /(°)	北纬 /(°)	观测历史			场地平均速度/(mm·a ⁻¹)						95%置信度 /(mm·a ⁻¹)		
			开始 (年-月)	结束 (年-月)	跨度 /a	IGS14			NChina20			EW		
						EW	NS	UD	EW	NS	UD			
AHBB	117.30	32.90	2010-05	2019-09	9.3	32.6	-11.0	1.1	0.2	0.1	0.3	0.3	0.4	0.9
BJFS	115.89	39.61	1999-03	2020-01	20.9	31.1	-10.4	2.1	-0.4	0.7	0.4	0.3	0.4	0.7
GSPL	106.59	35.55	2010-07	2019-05	8.8	33.9	-9.6	1.1	0.6	0.3	-0.9	0.4	0.4	0.8
HAJY	112.45	35.16	2010-06	2019-09	9.1	32.9	-10.4	1.3	0.3	0.1	-0.2	0.4	0.4	1.0
HELQ	114.31	38.25	2010-05	2019-09	9.2	31.6	-10.8	3.0	-0.1	0.0	1.2	0.3	0.3	0.8
HELY	114.71	37.40	2010-06	2019-09	9.1	31.8	-10.1	1.8	0.1	0.7	0.1	0.5	0.4	0.8
JSLS	119.42	31.35	2010-07	2019-06	8.8	32.9	-11.7	0.7	0.4	-0.4	0.2	0.3	0.4	0.9
JSLY	119.47	34.72	2010-07	2019-09	9.1	31.6	-12.0	0.9	-0.2	-0.6	-0.2	0.4	0.5	0.8
JSNT	120.89	31.95	2010-07	2019-09	9.1	32.4	-12.3	-0.4	-0.2	-0.7	-0.7	0.4	0.4	0.9
NMWH	106.84	39.66	2010-07	2019-09	9.1	31.8	-9.9	2.4	-0.6	-0.5	-0.3	0.3	0.5	0.9
SDCY	119.46	36.75	2010-06	2019-09	9.1	30.8	-11.9	1.8	-0.5	-0.5	0.5	0.3	0.4	0.8
SDJX	116.35	35.43	2011-01	2019-09	8.7	32.4	-11.4	0.8	0.4	-0.4	-0.3	0.3	0.4	0.8
SDLY	118.29	35.00	2010-06	2019-09	9.1	32.0	-11.6	2.3	-0.1	-0.4	1.1	0.4	0.5	0.9
SDRC	122.42	37.17	2010-06	2019-09	9.1	30.5	-12.0	0.9	-0.3	-0.1	-0.2	0.4	0.4	0.8
SDYT	121.44	37.48	2010-07	2019-09	9.1	29.8	-11.7	0.7	-0.9	-0.1	-0.5	0.3	0.4	0.8
SDZB	117.99	36.81	2010-07	2019-09	9.0	31.3	-10.4	1.1	-0.2	0.9	-0.2	0.4	0.5	0.9
SNFP	109.30	35.00	2011-01	2019-12	9.0	33.8	-10.1	1.9	0.7	-0.3	0.1	0.3	0.3	0.8
SNHG	110.07	35.41	2011-01	2019-12	9.0	33.0	-9.5	2.8	0.2	0.4	0.9	0.4	0.4	0.8
SNLT	109.28	34.34	2011-01	2020-01	9.0	33.3	-9.7	1.8	-0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.8
SNSM	110.51	38.86	2011-02	2019-12	8.9	31.5	-9.6	2.0	-0.6	0.5	-0.2	0.3	0.4	0.8
SNXY	108.39	35.17	2010-07	2019-12	9.4	33.6	-9.4	2.4	0.5	0.1	0.4	0.3	0.3	0.8
SNYA	109.46	36.62	2010-09	2019-09	9.0	32.0	-10.8	1.6	-0.6	-0.8	-0.3	0.6	0.4	0.8
SXGX	111.90	36.25	2010-09	2019-09	8.9	32.5	-10.5	2.3	-0.1	-0.2	0.6	0.4	0.5	1.1
SXKL	111.60	38.80	2010-10	2019-09	8.8	32.0	-9.7	2.4	-0.1	0.6	0.1	0.3	0.4	0.9
SXLF	111.37	36.08	2010-07	2019-09	9.1	33.2	-10.4	2.6	0.6	-0.2	0.9	0.3	0.4	0.9
SXLQ	114.02	39.38	2010-06	2019-09	9.1	32.2	-10.6	1.5	0.7	0.2	-0.4	0.3	0.4	0.8
SXYC	112.89	37.63	2010-11	2019-09	8.7	31.5	-10.9	1.0	-0.6	-0.4	-0.8	0.3	0.4	0.8
TAIN	117.12	36.21	1999-03	2019-09	20.5	31.7	-11.3	2.6	0.1	-0.3	-0.8	0.3	0.4	0.8
YANC	107.44	37.78	1999-03	2019-09	20.5	32.3	-8.8	1.4	-0.4	0.6	-0.9	0.3	0.3	0.8
ZJZS	121.99	30.07	2010-05	2019-09	9.2	32.6	-12.2	-0.4	-0.2	-0.5	-0.7	0.4	0.4	1.0
平均值					10.0	32.2	-10.6	1.6	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.8
均方根速度(RMS,参考框架稳定性)									0.4	0.5	0.6			

考框架下的 ECEF-XYZ 坐标通过整体平移(T_x, T_y, T_z)、旋转(R_x, R_y, R_z)和缩放(s)转换到区域参考框架。在实践中,实现区域参考框架的方法通常可归纳为两类:每日七参数坐标转换和十四参数坐标转换。根据 3 个以上基准站在全球参考框架和区域参考框架中的位置,可

以解算当天的 7 个转换参数。转换连续观测得到的位置时间序列,则需要计算每天的 7 个转换参数。GAMIT/GLOBK 软件使用每日 7 个转换参数实现从全球参考框架到区域参考框架的转换。北美参考框架 NA12 是由内华达大学的研究小组建立的一个北美稳定参考框架 (Blewitt et al, 2013), 由其解算每日的 7 个转换参数, 通过互联网提供给用户, 但由于数据滞后约为 3 周, 限制了 NA12 在滑坡、大坝、大跨度桥梁、高层建筑静态监测与预警领域的应用。对于从事大型工程结构变形监测的工程技术人员, 解算每日的 7 个转换参数较为繁杂, 需要收集和处理大量的数据, 因此, 每日七参数坐标转换方法目前主要在研究领域使用, 在大型工程健康监测实践中使用较少。

地壳板块运动模型和全球参考框架的实现均基于板块运动的线性假设, 即假设观测点所在的地壳块体在全球参考框架下保持恒定的运动速度 (大小和方向)。线性的位置时间序列经 Helmert 坐标转换后仍然保持线性, 并且每个转换参数的时间序列也保持线性, 根据该结论, 美国大地测量局 (NGS) 采用了 14 个转换参数来实现位移时间序列从全球参考框架到北美参考框架 (NAD83) 的坐标转换 (Pearson et al, 2013)。14 个转换参数包括 7 个在一固定历元 (t_0) 的单日转换参数 ($T_x(t_0)$ 、 $T_y(t_0)$ 、 $T_z(t_0)$ 、 $R_x(t_0)$ 、 $R_y(t_0)$ 、 $R_z(t_0)$ 、 $s(t_0)$) 和 7 个转换参数的一次微分 (T'_x 、 T'_y 、 T'_z 、 R'_x 、 R'_y 、 R'_z 、 s')。在实际转换中, NGS 将缩放参数 $s(t_0)$ 固定为 1, 将 s' 固定为 0。本文将十四参数方法简化, 用 7 个转换参数实现位置时间序列从全球参考框架到区域参考框架的转换 (Wang et al, 2013)。该方法设定区域参考框架与 IGS 全球参考框架保持坐标系缩放比例一致, 缩放系数 (s) 设定为常数 1, s' 为 0。在历元 t_0 , 将两参考框架的坐标位置对齐, 因此, 两参考框架之间坐标的平动 ($T_x(t_0)$ 、 $T_y(t_0)$ 、 $T_z(t_0)$) 和转动 ($R_x(t_0)$ 、 $R_y(t_0)$ 、 $R_z(t_0)$) 在该历元均为 0。据此, 实现区域稳定参考框架只需 7 个参数: t_0 、 T'_x 、 T'_y 、 T'_z 、 R'_x 、 R'_y 和 R'_z 。该方法在计算过程中, 设定各基准站在区域参考框架中保持稳定, 即场地速度为 0, 因此该参考框架称作稳定参考框架。观测点在华北区域参考框架中的 XYZ 坐标可通过全球参考框架 (IGS14) 中的 XYZ 坐标由式 (1) 转换得到 (Wang et al, 2018)

$$\begin{aligned} X(t)_{\text{NChina20}} &= X(t)_{\text{IGS14}} + T'_x \cdot (t - t_0) + R'_z \cdot (t - t_0) \cdot Y(t)_{\text{IGS14}} - R'_y \cdot (t - t_0) \cdot Z(t)_{\text{IGS14}} \\ Y(t)_{\text{NChina20}} &= Y(t)_{\text{IGS14}} + T'_y \cdot (t - t_0) - R'_z \cdot (t - t_0) \cdot X(t)_{\text{IGS14}} + R'_x \cdot (t - t_0) \cdot Z(t)_{\text{IGS14}} \\ Z(t)_{\text{NChina20}} &= Z(t)_{\text{IGS14}} + T'_z \cdot (t - t_0) + R'_y \cdot (t - t_0) \cdot X(t)_{\text{IGS14}} - R'_x \cdot (t - t_0) \cdot Y(t)_{\text{IGS14}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $X(t)_{\text{NChina20}}$ 、 $Y(t)_{\text{NChina20}}$ 和 $Z(t)_{\text{NChina20}}$ 是该观测点在历元 t 相对于区域参考框架 NChina20 的 XYZ 坐标; $X(t)_{\text{IGS14}}$ 、 $Y(t)_{\text{IGS14}}$ 和 $Z(t)_{\text{IGS14}}$ 是观测点在历元 t 相对于 IGS14 参考框架的 XYZ 坐标, 由 GNSS 后处理软件解算得到, XYZ 坐标的单位为 m。 t_0 为 2020.0, 单位为年, 在该历元点, 观测点在两参考框架中的坐标位置一致。 T'_x 、 T'_y 、 T'_z 、 R'_x 、 R'_y 和 R'_z 代表 3 个平动和 3 个旋转的一次时间微分, 为常数。IGS14 到 NChina20 的 7 个坐标转换参数 t_0 、 T'_x 、 T'_y 、 T'_z 、 R'_x 、 R'_y 和 R'_z , 见表 2。

2.3 NChina20 的稳定性和使用范围

在参考框架的研究和应用领域, 对参考框架的稳定性或精度尚无广泛接受的定义, 这 2 个术语经常互用。相对于稳定的区域参考框架, 该区域内所有稳定观测点在 3 个方向 (NS、EW 和 UD) 上应当保持接近零的场地速度。精度强调由观测值估算得到的位移速度与假定的零速度之间的差异, 差异越小, 精度越高; 稳定性则强调位移偏差随时间的累积, 在某一设定的时间段内, 累积误差越大, 则稳定性越差。从本质上讲, 区域参考框架的精度取决于基

表 2 实现 NChina20 参考框架的 7 个参数

参数	单位	由 IGS14 到 NChina20
t_0	a	2020.0
T'_x	m/a	$-6.0483882 \times 10^{-3}$
T'_y	m/a	9.0745606×10^{-4}
T'_z	m/a	$-7.3147040 \times 10^{-3}$
R'_x	rad/a	$-1.8584204 \times 10^{-9}$
R'_y	rad/a	$-2.9541305 \times 10^{-9}$
R'_z	rad/a	5.8328914×10^{-9}

准站所覆盖地区的地壳块体的刚度。地壳块体的刚度随区域面积的增加和时间窗口的延长而降低,因此区域参考框架有其最佳的使用范围。

参考框架的稳定性决定了其将坐标精确地外推到过去和未来的能力,即参考框架的寿命。在实践中,通常用所有基准站相对于参考框架的均方根速度(RMS)来评估区域参考框架的精度和稳定性。表 1 列出的统计参数表明,30 个基准站在 3 个方向上的速度(NChina20)的均方根(RMS)为 0.4mm/a(EW)、0.5mm/a(NS)和 0.6mm/a(UD)。NChina20 由 2011 年 10 月~2019 年 9 月约 8 年的连续观测数据实现,将该时间窗口向前(未来观测)或向后(历史数据)拓展 6 年,由参考框架时间窗口的拓展所积累的位移误差与上述 GNSS 单日解的位移精度相当。在 20 年(2006~2025 年)的时间窗口内,由参考框架的稳定性引起的最大位移偏移(误差)在 1cm 范围内,满足绝大多数工程监测项目的需求,因此,建议 NChina20 在时间上的使用范围限于 2006~2025 年的时间窗口。NChina20 在空间上的建议使用范围限于图 4 所示的“华北活动地块”,包括鄂尔多斯地块,华北平原和鲁东-黄海地块的东部,覆盖面积约一百万平方千米,与张培震等(2003)划定的“华北活动地块”的区域基本一致。环渤海湾的 6 个 GNSS 台站,辽宁葫芦岛台(LNHL)、辽宁大连金州台(LNJZ)、辽宁丹东台(LNDD)、山东烟台台(SDYT)、山东荣成台(SDRC)和天津宝坻台(TJBD),相对于 NChina20 参考框架保持稳定(场地速度<1mm/a)。因此,NChina20 也为环渤海湾的大型工程结构健康监测和渤海湾内海洋平台的稳定性观测提供统一的、高精度的稳定参考框架。

3 季节性地面升降

GNSS 记录到的位移时间序列通常包含线性的地壳运动和周期性的季节性地面运动。稳定参考框架已经消除了线性的地壳运动,季节性地面运动往往是影响场地或工程稳定性评价的主要因素。图 2 所示的 GNSS 时间序列在 3 个方向记录到明显的季节性位移,在垂直方向尤其显著,从谷值到峰值的位移约为 3cm。根据图 2 和图 3 所示的位移时间序列,水平方向上季节性运动的峰值通常小于 5mm,与 GNSS 单日解的位移精度大体处于同一水平,一般对场地或工程稳定性评价的影响很小,因此,本文未尝试建立水平方向的季节性地面运动模型。在华北地区,季节性地面升降主要由前半年的地面抬升和后半年的地面下沉主导,地面一般在 11 月达到周期性升降的谷值(最低点),在下一年的 5~6 月达到峰值(最高点)。季节性地面升降主要由地下水位、地表温度、土壤湿度、大气压力等的季节性变化引起。季

节性的地面升降预测模型可通过位移时间序列的傅里叶分析得到

$$D_{UD}(t) \approx c_1 \sin(2\pi t) + d_1 \cos(2\pi t) + c_2 \sin(4\pi t) + d_2 \cos(4\pi t) \quad (2)$$

其中, t 代表历元, 以十进制年份单位表示; c_1 、 d_1 代表年度季节性运动的幅度; c_2 、 d_2 代表半年度季节性运动的幅度。华北地区 5 个基岩台站 20 年的垂直方向时间序列如图 5 所示, 对这 5 条位移时间序列作傅里叶分析, 得到每条时间序列的 4 个参数 c_1 、 d_1 、 c_2 和 d_2 。季节性地面升降通常被认为是区域性的地面运动, 选用 5 个台站每个系数的平均值, 得到华北地区基岩场地季节性地面升降预测模型

$$D_{UD}(t) = 0.261 \sin(2\pi t) - 0.418 \cos(2\pi t) - 0.036 \sin(4\pi t) + 0.101 \cos(4\pi t) \quad (3)$$

其中, t 代表以十进制年份为单位的时间, 季节性地面升降的度量单位为 cm。

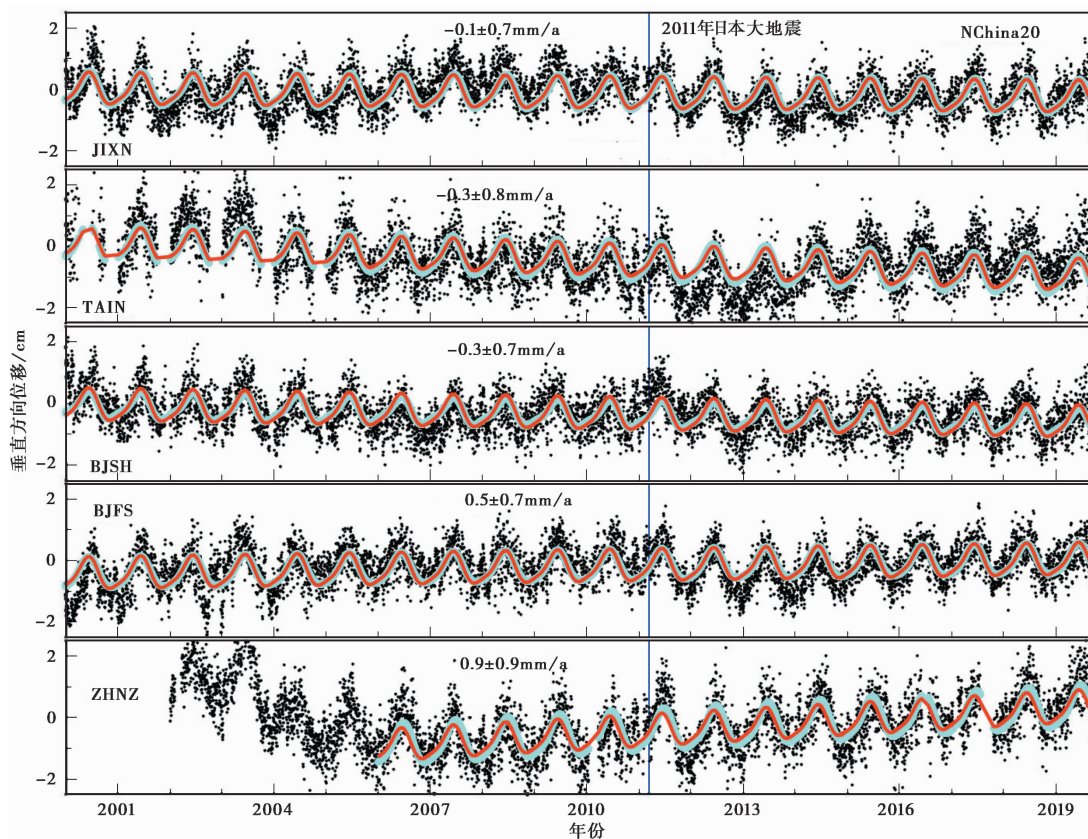


图 5 华北地区 5 个基岩台站的垂直方向地面运动位移时间序列 (NChina20)

蓝色线为由傅里叶分析得到的每条位移时间序列的地面升降模型 (式 (2)); 红色线为本文推荐的华北地区季节性地面升降预测模型 (式 (3))

地面升降模型能够相当准确地预测观测点未来的运动趋势, 对滑坡和工程结构变形监测与预警至关重要。在 2014 年北京昆仑公寓大厦的稳定性监测和预警项目实例中 (郭稳等, 2020b), 季节性地面升降模型起到了重要的作用。昆仑公寓位于北京东三环燕莎桥西侧, 包括 2 栋高约 100m 的住宅楼。2013 年 10 月, 位于昆仑公寓西侧的华都中心项目开始施工, 地下共 4 层, 拟开挖深 25m 的基坑, 基坑的东边界距离昆仑西塔的桩基仅 5m。本研究

小组在两公寓楼顶各安装 1 台 GNSS 仪器,自 2014 年 8 月开始监测,正值季节性地面升降的“下降段”,位移时间序列显示明显的下沉趋势,施工方和业主均担心公寓楼的安全。根据华北地区季节性地面升降模型(Bao et al, 2018),我们判定观测点的下沉由季节性的地面下沉所主导,不代表该公寓大厦的地基变形。2014 年 12 月 GNSS 记录到的位移时间序列开始回升,一直持续到 2015 年 6 月,消除了施工方和业主的顾虑。该观测项目持续 2 年,在建筑物上记录到的季节性地面升降与该预测模型(式(3))在幅值和相位上均有一定差别,但总体变化趋势基本一致,详细的比较可参见郭稳等(2020b)的研究。

4 NChina20 的应用

NChina20 的使用范围覆盖河北省(燕山以南)、北京市、天津市、渤海湾、山东省、江苏省、上海市、安徽省(大别山以北)、江苏省(杭州-舟山以北)、河南省、山西省、陕西省(秦岭以北、宝鸡以东)、甘肃省(平凉以东)、宁夏回族自治区(银川-吴忠-固原以东)、内蒙古自治区(乌海以东、包头-托克托以南),上述区域是中国经济规模最大、大型工程建设最活跃的地区。NChina20 为华北地区长期开展的地质灾害观测和大型工程稳定性监测提供高精度的稳定参照系统,将推动高精度 GNSS 观测技术在大型工程结构健康监测领域的应用。

根据由国土资源部、水利部、财政部等十部委联合编制的《2011~2020 年全国地面沉降防治规划》^①,中国发生地面沉降的城市超过 50 个,长江三角洲、华北平原、汾渭盆地是其中的“重灾区”。各级测绘部门和研究机构先后安装了大量的 GNSS 观测台站,观测数据由各地方机构自己保管、自行处理。数据处理通常用二次差分的方法,选用本地区的单个 GNSS 站为参考站。在实践中,参考站本身的连续性难以长期维持,长期稳定性也较难精确评价,因此整合和比较不同地区的观测结果相当困难,即使在同一研究地区,比较不同时期得到的观测结果也很困难,从而限制了 GNSS 在研究长期的(10 年尺度或更长)、跨地区的地面沉降观测领域的应用。NChina20 为整合华北地区的历史观测数据提供了一个统一的平台,也为将来开展长期的、大面积的地面沉降和高速铁路基差异沉降观测提供高精度的参照系统。

GNSS 台站在天津武清(TJWQ)记录到约 5cm/a 的地面沉降(2010~2019 年),在天津滨海(TJBH)记录到约 2cm/a 的持续地面沉降(2010~2019 年),在河北沧州(HECX)记录到约 3cm/a 的地面沉降(2010~2019 年)(Zhao et al, 2020)。位于上海和西安的 3 个 GNSS 台站观测到的长期地面沉降如图 6 所示。SHAO 台位于上海天文台,是 IGS 在中国境内的一个参考站。1994~2004 年的数据表明,该台站在垂直方向上是稳定的,但自 2005 年开始经历持续的下沉,近 15 年(2005~2019 年)的平均沉降速度为 2.5mm/a。XIAN 台位于西安临潼区,2005 年之前基本稳定,自 2006 年开始经历快速的下沉,2006~2010 年的平均沉降速度约为 23.7mm/a。XIAN 台也是 IGS 在中国境内的参考站之一,但由于严重的地面沉降,IGS 自 2010 年放弃使用该参考站。XIAA 台为陆态网在西安的一个永久台站,台站完整记录了西安市南部近 20 年的地面沉降历史。1990~2000 年,西安城区经历了显著的地面沉降,XIAA 记录到的平均沉降速度约为 7.2mm/a(1999~2010 年),随着当地政府限制地下水的开采,自 2011 年以来地面沉降变缓,近 10 年的平均沉降速度约为 1.5mm/a(2011~2019 年),表明该

^① http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/201810/t20181030_2261387.html

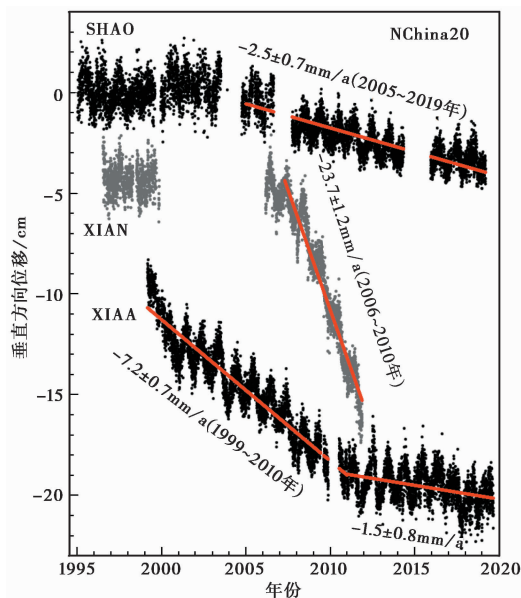


图 6 上海和西安 3 个 GNSS 台站观测到的长期地面沉降

SHAO 位于上海天文台;XIAN 位于西安临潼;XIAA 位于西安市区

地区的地下水位在持续回升,目前还低于该地区主要含水层的历史(沉降前)地下水位。XIAA 的观测数据表明当前西安采取的一系列地面沉降治理和地下水管理措施很有效。

华北地区 4 个 GNSS 台站记录到的地面沉降和抬升 ($2 \sim 3 \text{ mm/a}$) 如图 7 所示。一般来讲,用传统基于单个参考站的方法来判定 2 mm/a 左右的地面升降较为困难,因为单个参考站本身的场地稳定性很难在 $1 \sim 2 \text{ mm/a}$ 的范围内精确评价。JSYC(江苏盐城)台位于江苏省盐城市西北部的农业区,距盐城市区约 15 km 。该台站 2014 年之前的记录不连续,很难精确计算场地速度,但可以看到明显的下沉趋势,自 2014 年的观测数据表明该观测点近 6 年以来(2014~2019 年)持续抬升(含水层回弹),平均抬升速度为 $2.2 \sim 3 \text{ mm/a}$ 。江苏盐城自 1950 年以来大力开采地下水,1990~2000 年出现了大面积的地面沉降,主要由深层地下水的超采所致(顾晟彦等,2020)。当地政府自 2010 年以来,采取了一系列措施限制地下水的开采,《盐城市水资源综合规划》、《盐城市地下水压采方案》、《盐城市地下水水位超红线地区综合治理方案》等^②先后得到执行,城区及周边地下水位开始回升,地面沉降速度减缓。JSYC 台记录到的 2.2 mm/a 地面抬升表明该区域的主要含水层地下水位目前已恢复到沉降前的历史水位,这也证明当地政府采取的地下水管理措施很有效。高精度 GNSS 连续观测为地面沉降治理和合理开采地下水资源提供了可靠的第一手资料。

LNYK(辽宁营口)台位于辽宁营口市东北,距营口市中心约 30 km 。该台站在水平方向相对于 NChina20 保持静止(小于 1 mm/a),但在垂直方向自 2013 年以来观测到约 3.2 mm/a 的持续抬升。该台站位于基岩上,靠近郯庐断裂带(图 4),地下水位的升降一般不会导致基岩观测点的持续升降,抬升很可能由附近断层活动所致。

^② 盐城市人民政府网, <http://www.yancheng.gov.cn>

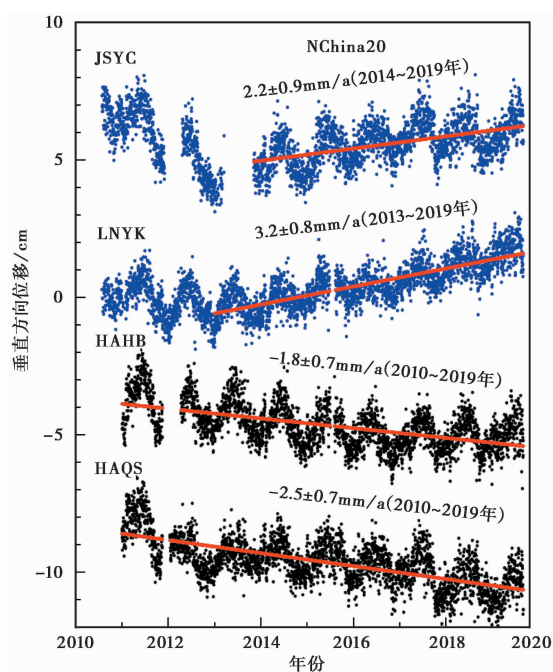


图 7 JSYC、LNYK、HAHB 和 HAQS 台站观测到的地面缓慢抬升或沉降

HAHB(河南鹤壁)台位于河南鹤壁市浚县县城西南角城乡结合部,HAQS(河南确山)台位于河南确山县北部农业灌溉区。近 10 年(2010~2019 年)的 GNSS 观测数据表明,HAHB 和 HAQS 所在区域当前经历约 2mm/a 的持续地面沉降。目前未见到有关浚县和确山县地面沉降的报道,估计观测点的轻微地面沉降主要由当地农业灌溉抽取地下水所致,地下水开采若不能得到合理的规划,地面沉降速度有可能加快。

5 结论

在过去的 20 年中,中国各级测绘、电力、交通等相关部门和高校科研院所已经安装了数以千计的 GNSS 连续观测站(姜卫平,2017),积累了大量的 GNSS 长期观测数据,为在中国建立区域参考框架提供了宝贵的基础数据。静态 GNSS 的数据处理方法已相当成熟,综合应用精密单点定位技术和区域稳定参考框架,工程技术人员经过简单的培训,就可以开展高精度的大型工程结构变形和场地稳定性监测,无需安装任何地面参考站,也不需要引入繁杂的数据处理,从而大大降低了高精度 GNSS 监测的成本。本文选用华北地区近 8 年(2011 年 10 月~2019 年 9 月)的连续观测数据,建立了华北稳定参考框架 NChina20,为在华北地区开展长期的高精度 GNSS 观测提供了统一基准,将推动高精度 GNSS 技术在滑坡、城市地面沉降长期观测和大型工程结构健康监测领域的应用。华北地区活动断层众多,地震活动频繁,在山西断陷盆地(鄂尔多斯地块的东边界)、郯庐断裂带(鲁东黄-海地块的西边界)和华北平原活动地块内部的安阳-菏泽-临沂-唐山-河间-磁县活动构造带,有史记载以来发生多次大地震(韩竹军等,2003;郑文俊等,2019),NChina20 也为观测华北地块内部及边缘的断层活动提供高精度的参照系统。

本研究的主要成果为实现华北稳定参考框架的 7 个参数(表 2)和季节性地面升降预测模型(式(3))。NChina20 的框架稳定性在水平方向约为 0.5mm/a , 在垂直方向约为 0.6mm/a 。建议 NChina20 的使用范围在空间上限于华北活动地块区(图 4), 在时间上限于 2006~2025 年的时间窗口。在解释 2006 年之前观测到的位移时间序列时, 应当考虑到参考框架的稳定性随时间的退化; 在解释 2011 年前后的位移时间序列时, 应当考虑到 2011 年日本大地震前后地壳运动速度的差异; 在解释低于 1mm/a 的场地速度时, 应当考虑到该参考框架的精度。华北稳定参考框架将定期更新, 以确保其稳定性和连续性, 并与 IGS 参考框架的未来更新同步。IGS 在 2020 年 5 月 17 日颁布了新的参考框架 Igb14^③。Igb14 具有比 IGS14 多 5 年的数据优势, 参考框架的更新对仅关注场地速度的用户影响较小。根据 IGS 将 IGS08 更新到 Igb08 的经验, IGS 大约需要 2 年左右的时间更新 2020 年 5 月 17 日之前的卫星轨道等数据, 故拟在 2023 年前后更新华北稳定参考框架, 与 Igb14 对齐。

参考文献

- 程鹏飞, 成英燕, 2018. 基于 GNSS 的 CGCS2000 数据处理技术综述. 武汉大学学报·信息科学版, **43**(12): 2071~2078.
- 程鹏飞, 成英燕, 秘金钟, 等, 2013. CGCS2000 板块模型构建. 测绘学报, **42**(2): 159~167.
- 邓起东, 冉勇康, 杨晓平, 等, 2007. 中国活动构造图(1:400 万). 北京: 地震出版社.
- 甘卫军, 李强, 张锐, 等, 2012. 中国大陆构造环境监测网络的建设与应用. 工程研究-跨学科视野中的工程, **4**(4): 324~331.
- 顾国华, 王玉星, 占伟, 等, 2015. 东日本 $M_w 9.0$ 大地震前、同震及震后地壳水平运动. 武汉大学学报·信息科学版, **40**(12): 1669~1676.
- 顾晟彦, 姚维军, 徐明钻, 等, 2020. 江苏盐城地面沉降风险评价. 中国地质灾害与防治学报, **31**(1): 36~43.
- 郭稳, 李鹏飞, 鲍艳, 等, 2020a. 基于高精度 GPS 的盾构隧道下穿河道河床变形监测. 北京工业大学学报, **46**(5): 490~499.
- 郭稳, 王国权, 鲍艳, 等, 2020b. 顾及季节性变形的 GNSS 高层建筑倾斜和沉降观测方法. 武汉大学学报·信息科学版, **45**(7): 1043~1051.
- 韩竹军, 徐杰, 冉勇康, 等, 2003. 华北地区活动地块与强震活动. 中国科学: D 辑, **33**(增刊): 108~118.
- 姜卫平, 2017. 卫星导航定位基准站网的发展现状、机遇与挑战. 测绘学报, **46**(10): 1379~1388.
- 魏子卿, 刘光明, 吴富梅, 2011. 2000 中国大地坐标系: 中国大陆速度场. 测绘学报, **40**(4): 403~410.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学: D 辑, **33**(增刊): 12~20.
- 张培震, 王琪, 马宗晋, 2002. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块. 地学前缘, **9**(2): 430~441.
- 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等, 2019. 中国大陆活动构造基本特征及其对区域动力过程的控制. 地质力学学报, **25**(5): 699~721.
- Bao Y, Guo W, Wang G Q, et al, 2018. Millimeter-Accuracy structural deformation monitoring using stand-alone GPS; case study in Beijing, China. J Surv Eng, **144**(1): 05017007.
- Bertiger W, Desai S D, Haines B, et al, 2010. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data. J Geod, **84**(5): 327~337.
- Blewitt G, Hammond W C, Kreemer C, 2018. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. Eos, 99. doi: 10.1029/2018EO104623.
- Blewitt G, Kreemer C, Hammond W C, et al, 2013. Terrestrial reference frame NA12 for crustal deformation studies in North America. J Geodyn, **72**: 11~24.
- Blewitt G, Kreemer C, Hammond W C, et al, 2016. MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection. J Geophys Res Solid Earth, **121**(3): 2054~2068.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, et al, 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements.

^③ <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2020/007917.html>

- J Geophys Res Solid Earth, **112**(B8):B08416.
- Herring T A, Melbourne T I, Murray M H, et al, 2016. Plate boundary observatory and related networks: GPS data analysis methods and geodetic products. *Rev Geophys*, **54**(4): 759~808.
- Pearson C, Snay R, 2013. Introducing HTDP 3.1 to transform coordinates across time and spatial reference frames. *GPS Solut*, **17**(1): 1~15.
- Rebischung P, Altamimi Z, Ray J, et al, 2016. The IGS contribution to ITRF2014. *J Geod*, **90**(7): 611~630.
- Soler T, Wang G Q, 2016. Interpreting OPUS-Static results accurately. *J Surv Eng*, **142**(4): 05016003.
- Wang G, Welch J, Kearns T J, et al, 2015b. Introduction to GPS geodetic infrastructure for land subsidence monitoring in Houston, Texas, USA. *Proc IAHS*, **372**: 297~303.
- Wang G, Yu J, Ortega J, et al, 2013. A stable reference frame for the study of ground deformation in the Houston metropolitan area, Texas. *J Geodetic Sci*, **3**(3): 188~202.
- Wang G Q, 2011. GPS landslide monitoring: single base vs network solutions-a case study based on the Puerto Rico and Virgin Islands permanent GPS network. *J Geodetic Sci*, **1**(3): 191~203.
- Wang G Q, Bao Y, Cuddus Y, et al, 2015a. A methodology to derive precise landslide displacement time series from continuous GPS observations in tectonically active and cold regions; a case study in Alaska. *Nat Hazards*, **77**(3): 1939~1961.
- Wang G Q, Bao Y, Gan W J, et al, 2018. NChina16; a stable geodetic reference frame for geological hazard studies in North China. *J Geodyn*, **115**: 10~22.
- Wang G Q, Liu H L, Mattioli G S, et al, 2019. CARIB18; a stable geodetic reference frame for geological hazard monitoring in the Caribbean region. *Remote Sens*, **11**(6): 680.
- Wang G Q, Turco M, Soler T, et al, 2017. Comparisons of OPUS and PPP solutions for subsidence monitoring in the greater Houston area. *J Surv Eng*, **143**(4): 05017005.
- Wang M, Shen Z K, 2020. Present-Day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications. *J Geophys Res Solid Earth*, **125**(2): e2019JB018774.
- Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al, 2001. Present-Day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements. *Science*, **294**(5542): 574~577.
- Zhao R B, Wang G Q, Yu X, et al, 2020. Rapid land subsidence in Tianjin, China derived from continuous GPS Observations(2010-2019). *Proc IAHS*, **382**: 241~247.

Establishment and Application of Stable North China Reference Frame: NChina20

*Bao Yan*¹⁾ *Wang Guoquan*²⁾ *Yu Xiao*²⁾ *Xiao Genru*³⁾ *Ding Xiaoguang*⁴⁾
*Zhao Ruibin*⁵⁾ *Gan Weijun*⁶⁾

1) Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

2) Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Houston, Houston 77204, USA

3) Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

4) Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710054, China

5) School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

6) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract We have established a stable North China reference frame, designated as NChina20, by using eight-year continuous observation data from 30 GNSS stations fixed on the North China active crustal block. NChina20 is aligned in scale with IGS14. The two coordinate systems are tied at epoch 2020.0. In this article we introduce the method of converting the positional time series with respect to IGS14 to NChina20. Applications of NChina20 in precise land subsidence and rebound monitoring are illustrated. The stability (accuracy) of NChina20 is 0.5mm/a in the horizontal directions and 0.6mm/a in the vertical direction. The stability of the reference frame degrades with the expansion of the coverage area and the time window. We recommend that the use of NChina20 is limited to the North China tectonic block within a time window of 20 years from 2006 to 2025. We have also developed a seasonal vertical ground motion model in North China using 20 years (2000~2019) of continuous observation data from 5 GNSS stations mounted on bedrock. The regional reference frame will be updated every few years to mitigate degradation with time and synchronize with the update of IGS reference frames.

Keywords: IGS14; GNSS; NChina20; Stable reference frame; North China active crustal block; Seasonal ground uplift and subsidence model