



华北地区季节性垂直位移信号提取及物理机制分析

冯腾飞¹ 沈云中¹ 王奉伟² 陈秋杰¹

¹ 同济大学测绘与地理信息学院,上海,200092

² 同济大学海洋地质国家重点实验室,上海,200092

摘要:华北地区地表垂直位移呈现显著的季节性波动。为探究其驱动源信号,利用独立分量分析方法对全球导航定位系统20个基准站的垂直位移时间序列进行时空分解,获取前6个独立分量,并与环境负载造成的垂直位移进行比较分析。结果表明,第一个独立分量呈现显著周年变化和相对均匀的空间响应,与大气负载位移时间序列的平均相关系数为0.60,两者吻合良好。第二和第三个独立分量均是周年和年内信号的组合,其空间响应反映出局部集聚特征,与华北地区水资源的分布状况相类似,合并这两个独立分量后与水文负载位移时间序列的平均相关系数为0.50。由此表明大气和水文负载是驱动华北地区季节性垂直位移的主要源信号。

关键词:华北地区;独立分量分析;季节性垂直位移;环境负载

中图分类号:P228

文献标志码:A

华北地区是中国七大地理区划之一,包括山西省、河北省、北京市和天津市,其中京津冀地区经济发达、人口密集,在中国政治、经济以及文化等方面发挥着重要作用^[1]。然而,由于各种自然和人为因素,如过度开采地下水灌溉农作物,华北地区面临着严重的地表垂直形变,社会的可持续发展也因此受到了较大影响^[1-3]。因此,必须对该地区的地表位移进行及时且有效的监测,充分了解形变的机理,从而为灾害的准确预测提供数据保障和理论支撑。

全球导航定位系统(global navigation satellite system, GNSS)是监测地表垂直形变最有效的空间大地测量技术之一,为不同时空尺度的地球物理现象研究提供了宝贵的基础数据^[4]。利用GNSS数据解算的坐标时间序列定义为一组按照时间顺序排列的基准站坐标^[4],其中包含了丰富的构造及非构造信号,后者主要表现为地表质量重分布、基岩热膨胀效应、共模误差等因素导致的季节性变化^[2,5],准确地估计GNSS季节性位移并识别相应的源信号有助于深入理解固体地球形变与外层质量变化之间的相互作用。通常情

况下,首先假定季节性信号的振幅为常数,然后通过最小二乘方法进行估计,然而恒定的振幅与真实季节性激发源呈现的非均匀变化相悖。因此,以经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)^[6]、主成分分析(principal component analysis, PCA)^[7-8]和奇异谱分析(singular spectrum analysis, SSA)^[9]为主的统计分析方法受到了广泛关注,它们可在无任何先验信息的条件下将GNSS时间序列分解为若干个正交分量,并提取其中振幅随时间变化的季节性分量。然而,上述方法仅考虑了时间序列的方差和协方差二阶统计量,未顾及到更高阶统计信息,由此获得的季节性分量很大程度上是多个物理源信号的混合^[5, 10]。

若将GNSS时间序列视为来自不同物理源的独立信号的线性混合,由于混合模式未知,GNSS源信号提取实际是一个盲源分离问题。独立分量分析(independent component analysis, ICA)是处理该问题的有效方法^[10-11],它在PCA的基础上引入高阶统计量,使分解的成分尽可能相互独立,从而有效提高了潜在源信号的可识别

收稿日期:2022-04-02

项目资助:国家自然科学基金(41974002, 42061134010)。

第一作者:冯腾飞,博士生,主要从事大地测量数据处理工作。1911212@tongji.edu.cn

通讯作者:沈云中,博士,教授。yzshen@tongji.edu.cn

性。近年来,ICA已成功应用于分析各类地球物理信号,如陆地水储量^[12-13]、GNSS共模误差^[10, 14-15]、地震信号^[16]等。鉴于ICA方法在信号分析中的独特能力,本文以华北地区为研究对象,利用ICA方法对20个GNSS基准站的垂直位移时间序列进行分析,探讨各独立分量的时空变化特性,评估与环境负载信号的相关性,由此确定驱动华北地区季节性垂直位移的主要源信号。

1 数据获取与处理

1.1 GNSS时间序列

本文通过中国大陆构造环境监测网络(crustal movement observation network of China, CMONOC)获取了20个GNSS基准站的垂直位移时间序列(<http://www.cgps.ac.cn>),时间跨度为2011-01-01—2019-11-30,站点位置分布如图1所示。

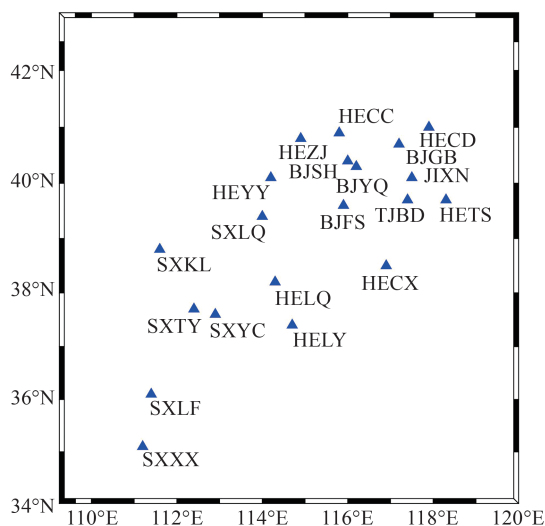


图1 研究区域GNSS站点分布

Fig. 1 Distribution of GNSS Stations in Study Area

数据预处理包括:根据台站日志文件修正设备故障和更换等引起的非地球物理偏移,同时通过地震统计信息(<http://www.csi.ac.cn/>)改正由同震及震后引发的偏移,改正量为偏移前、后各7天平均值的差值;利用ICE6G-D模型^[1],通过球谐系数法^[17]估计冰川均衡调整对地壳垂直运动产生的效应,并将其从各站点时间序列中扣除,该效应在华北地区表现为长期变化趋势,范围为0.27~0.31 mm/a;基于四分位间距统计量检测异常值并标记为缺失数据,经计算得到各时间序列缺失比例的平均值为6.20%。

1.2 环境负载数据

环境负载主要指大气负载(atmospheric loading, ATML)、水文负载(hydrologic loading, HYDL)以及非潮汐海洋负载(non-tide ocean loading, NTOL)^[4, 18]。根据以往研究^[2, 5, 19],非潮汐海洋负载在华北地区诱发的垂直形变非常小,且时间序列较为复杂,因此本文暂不考虑。大气负载垂直位移取自德国地学研究中心利用非潮汐大气表面压力数据研制的格网数据产品^[20](<http://rz-vm115.gfz-potsdam.de:8080/repository>),时间分辨率为3 h,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,对该格网数据产品进行克里金空间插值得到各站点位移时间序列,扣除其中的线性趋势后通过滑动平均将序列的时间分辨率转换为12 h。

重力场恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)卫星及后续计划GFO(GRACE follow-on)自发射以来,利用其数据解算的时变重力场模型已实现了全球或区域地表物质迁移的高精度、高时效监测^[18]。本文采用德克萨斯大学空间研究中心提供的2011-01—2019-11期间RL06月重力场数据表征水文负载,数据格式为96阶次球谐系数,且已扣除了海潮、固体潮、极潮、非潮汐大气和非潮汐海洋等影响,因此可反映陆地水的质量变化。相关后处理包括:因为GRACE/GFO无法监测地心运动,且对二阶项系数不敏感,所以在球谐系数中回加了一阶项系数,并替换了其中的 C_{20} 及 C_{30} 系数^[21];结合P4M6去相关滤波和高斯平滑技术(半径取300 km)移除南北条带并抑制高频噪声^[22];利用ICE6G-D模型移除冰川均衡调整效应,以保证与GNSS的可比性;通过球谐系数法计算水文负载在各站点引起的垂直形变并扣除形变序列中的线性趋势^[17-18]。

为进一步验证GRACE/GFO模型估计水文负载位移的可靠性,分别利用地表流量模型(land surface discharge model, LSDM)^[20]和全球陆面数据同化系统的流域陆面模型(catchment land surface model, CLSM)^[23]计算水文负载造成的垂直位移。首先将两种水文模型的格网数据分别转化为球谐系数,截断至96阶次,保持与GRACE/GFO一致,然后利用P4M6和高斯平滑技术进行滤波,最后通过球谐系数法分别得到基于LSDM和CLSM模型的水文负载位移。GRACE/GFO、LSDM及CLSM三种模型获取的各站点平均垂直位移的时间序列如图2所示,其中阴影部分表

示 GRACE 和 GFO 之间的数据缺失时段。由图 2 可以看出, GRACE/GFO 与两种水文模型获取的平均位移时间序列较为一致, GRACE/GFO 与 CLSM 和 LSDM 的相关系数分别为 0.66、0.60, 具有较好的一致性, 表明了 GRACE/GFO 模型能够准确地估计水文负载位移。

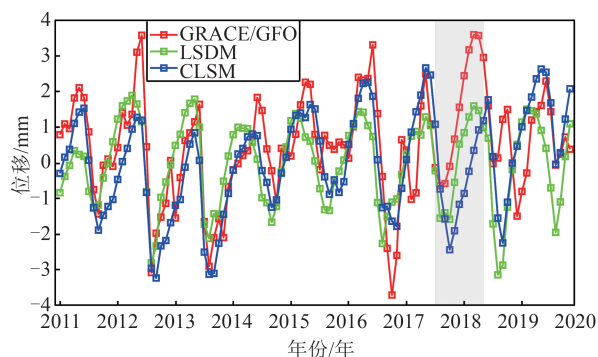


图 2 三种模型获取各站点平均垂直位移的时间序列

Fig. 2 Time Series of Average Vertical Displacement
Derived from Three Models

2 ICA 方法

ICA 方法是一种盲源分离技术, 可通过最大化高阶统计量将混合的 GNSS 时间序列分解为若干个统计独立的源信号^[24]。设 $X_{m \times n}$ 为扣除趋势后的 GNSS 坐标时间序列矩阵, m 为观测历元数, n 为台站数。首先, 通过 PCA 进行矩阵分解, 计算式为:

$$X_{m \times n} = P_{m \times n} E_{n \times n}^T \quad (1)$$

式中, P 和 E 的列向量分别称为主成分量 (principal component, PC) 和特征向量, 两者均按特征值由大到小对应排列。

若前 r ($r < n$) 个方差占比较大的 PC 代表 GNSS 中的信号^[8], 则式 (1) 可变换为:

$$X_{m \times n} = P_{m \times r} E_{r \times n}^T \quad (2)$$

P 矩阵中各列向量虽然互不相关, 但并不独立。因此, 利用酉矩阵 W 对 P 矩阵进一步旋转, 式 (2) 扩展为:

$$X_{m \times n} = P_{m \times r} W_{r \times r} W_{r \times r}^T E_{r \times n}^T = S_{m \times r} A_{r \times n}^T \quad (3)$$

式中, $S = PW$, 其每一列向量表示一个独立的时间分量; $A = EW$, 其列向量通常称为空间响应^[10]。每个时间分量乘以相应的空间响应即表示一个独立分量 (independent component, IC)。本文采用特征矩阵联合近似对角化算法估计酉矩阵 W , 该算法具有较好的鲁棒性, 其详细过程参见文献^[12]。

考虑到数据缺失的干扰, 特别是缺失比例较大的站点 (如 SXKL 站缺失率达 26.58%), 传统的

迭代或插值方法可能会引入虚假信息, 导致提取的信号产生偏差。因此, 本文采用文献^[8, 24]提出的改进方法求解式 (1) 中的主成分, 该方法无需预先插值, 且效果优于传统插值方法。

3 GNSS 季节性垂直位移时空分解

首先, 通过最小二乘法拟合 GNSS 垂直位移时间序列, 获取各序列的长期趋势。拟合函数的计算式为^[5]:

$$y(t) = y_0 + bt + \sum_{j=1}^2 [c_j \sin(2\pi ft) + d_j \cos(2\pi ft)] + \epsilon(t) \quad (4)$$

式中, y_0 是偏移量; b 是长期趋势; t 为历元数; c_j, d_j 是谐波分量系数; $\sum_{j=1}^2 [c_j \sin(2\pi ft) + d_j \cos(2\pi ft)]$

表示季节项, 包括周年 ($f=1$) 和半年 ($f=2$) 变化, 其振幅为 $\sqrt{c_j^2 + d_j^2}$; ϵ 是残差。

剔除长期趋势后, 仅利用式 (4) 的季节项函数对去趋势后的 GNSS 序列拟合周年和半年信号, 结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 所有时间序列的周年振幅远大于半年振幅, 范围分别为 1.67~4.46 mm 和 0.18~1.27 mm。

然后, 利用 ICA 方法对 GNSS 季节性时间序列进行时空分解, 根据特征值大小将主成分降序排列后, 计算其累计方差占比。GNSS、大气和水文负载位移分解时主成分的累计方差占比如图 4 所示。由图 4 可知, 前 6 个 GNSS-PC 累计方差占比达 86%, 在很大程度上已能表示所需的季节性特征, 因此对前 6 个 GNSS-PC 进一步分解得到 6 个 GNSS-IC。

鉴于 IC 排列顺序具有随机性且方差均为 1, 采用文献^[5, 19]定义的贡献率对 6 个 GNSS-IC 重新排序, 获得的时间分量和空间响应如图 5 所示, 其中红色箭头的长度和方向分别表示空间响应的量级和符号, 箭头向上为正, 向下为负, 绿色虚线框表示具有空间集聚特征的局部区域。为使结果更加直观, 将每个 GNSS-IC 的空间响应值除以绝对值最大的响应值进行归一化, 而时间分量乘以该归一化因子实现标准化, 因此所有的空间响应值均介于 -100%~100% 之间。此外, 为了准确判定 GNSS-IC 的周期特性, 计算其时间分量的功率谱, 如图 6 所示。

由图 5 可以看出, GNSS-IC1 是显著的周年信号, 其空间响应方向完全一致, 且响应强度在整体上相对均匀, 由北至南有缓慢递增的趋势。

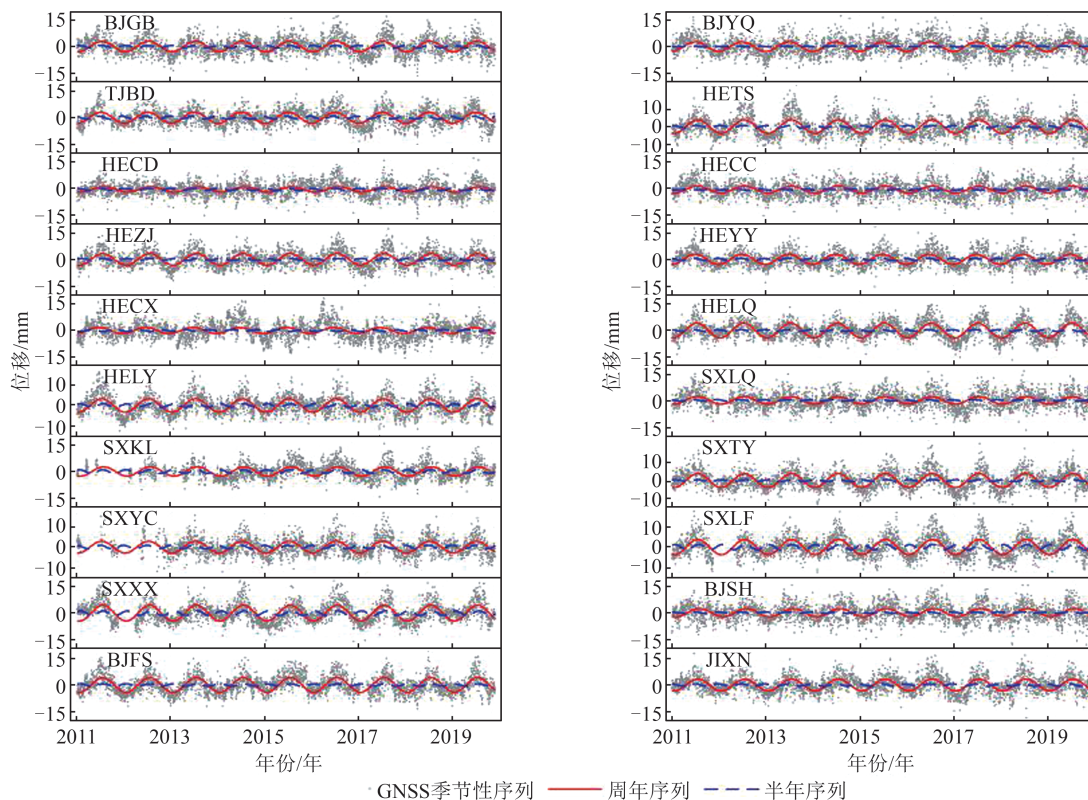


图3 各台站季节性垂直时间序列及拟合的周年和半年信号

Fig. 3 Seasonal Vertical Time Series and Fitted Annual and Semi-annual Signals

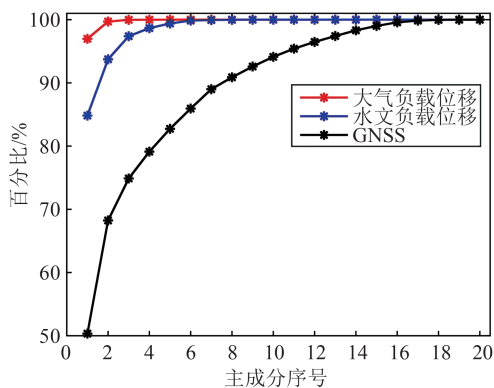


图4 GNSS、大气和水文负载位移的主成分累计方差占比

Fig. 4 Cumulative Variance Percentages of PCs in Decomposition of GNSS, ATML and HYDL Displacement

由图6可以看出,GNSS-IC2和GNSS-IC3均呈现出明显的周年变化,且还包含了一些年内信号,尤其是GNSS-IC2,存在明显的半年周期。尽管GNSS-IC2和GNSS-IC3的空间响应在整个区域内表现出符号一致性,但其量级并非完全系统或完全随机,反而具有局部集聚特征(空间集聚特征判定依据为局部区域的空间响应具有相同方向且量级差异小于10%^[10]),见图5中绿色虚线框内站点。该分布特征与华北地区的水资源分布状况较类似^[3, 25-26],由于降水的时空分布极不均匀,各子区域的人类活动也不尽相同,如山西省大

量的煤矿开采、河北省南部广泛的农业种植、京津地区快速的工业发展等,导致华北各子区域水资源损耗差异较大^[26],由此推断GNSS-IC2和GNSS-IC3可能是针对不同类型水文质量变化的形变响应。GNSS-IC4~GNSS-IC6的季节性特征较弱,其空间响应分布也更为复杂,应是GNSS站点坐标中的共模误差^[7,10],需要进一步分析。总体而言,利用ICA分解华北地区季节性垂直位移能够有效提取隐含的季节性周期变化,并反映不同季节性信号的空间分布迥异性。

4 GNSS季节性垂直位移源信号分析

4.1 环境负载位移时空滤波

采集的地球物理数据必定会受到噪声污染,因此大气和水文负载位移也需要进行相应的ICA滤波^[10, 14-15],求解的ICs分别如图7、图8所示,其中红色箭头的含义与图5一致,图8中时间分量的阴影部分表示GRACE和GFO之间的数据缺失时段。

对于大气负载位移,前2个ATML-IC累计方差占比达99.71%(图4)。从图7可以看出,ATML-IC1是纯粹的周年信号,且空间响应在整个区域中呈现出高度一致性;ATML-IC2与AT

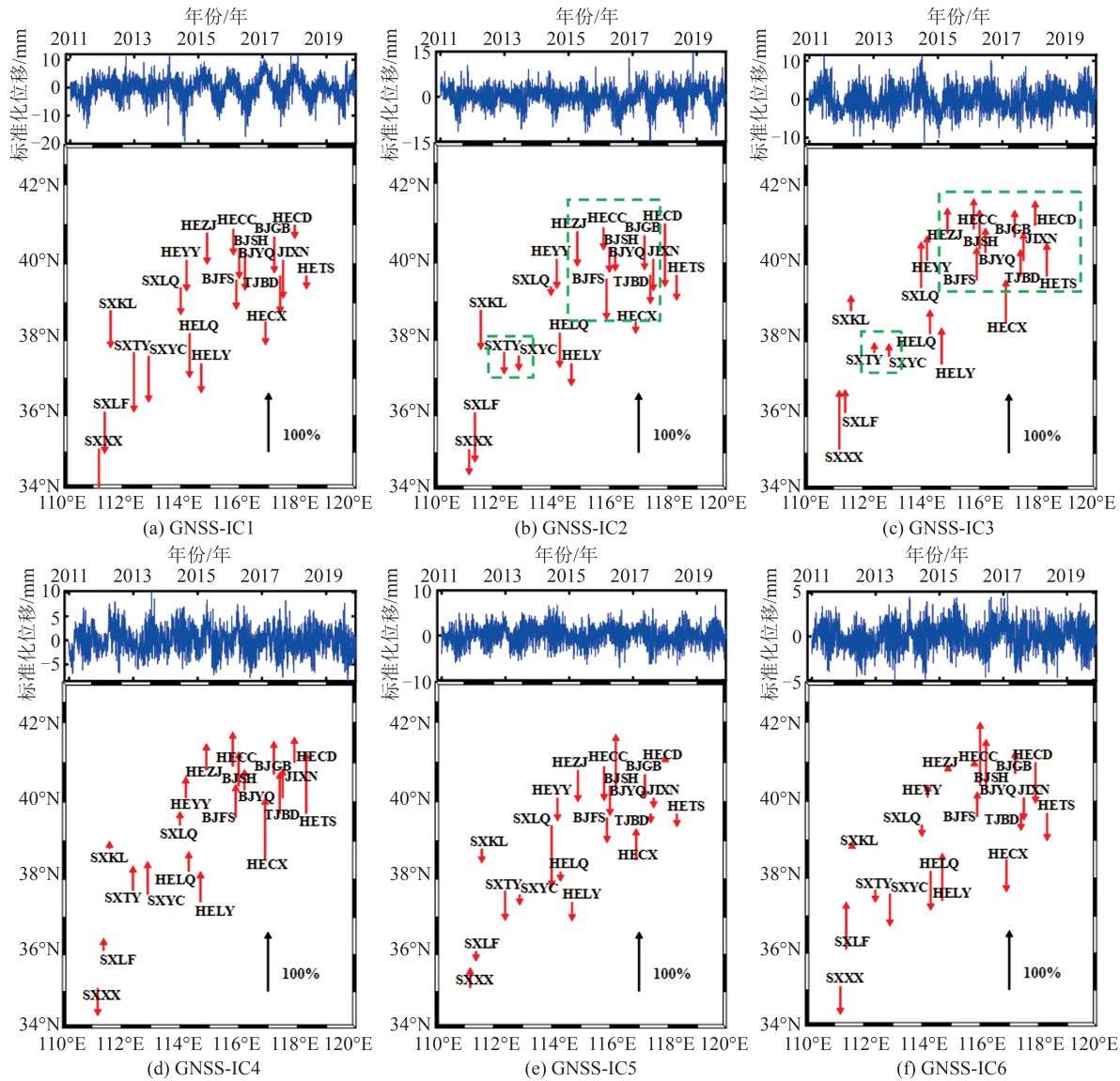


图5 前6个GNSS-IC的时间分量和空间响应

Fig. 5 Temporal Components and Spatial Response of the First Six GNSS-ICs

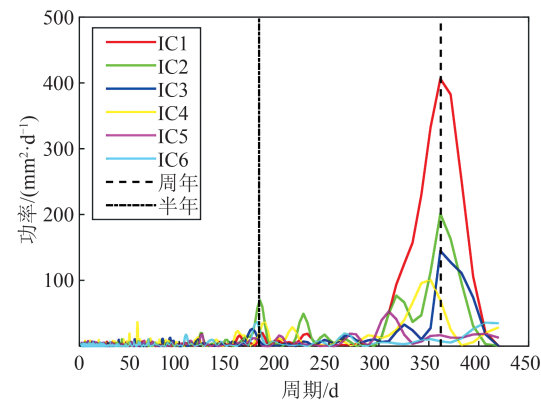


图6 前6个GNSS-IC时间分量的功率谱

Fig. 6 Power Spectra of Temporal Components of the First Six GNSS-ICs

ML-IC1类似,但时间分量中还包含一些高频信号;ATML-IC3的空间响应呈现阶梯状分布,由

北向南逐渐减小,然而其时间分量明显由高频噪声主导。因此,本文仅利用前2个ATML-IC重构大气负载位移时间序列。

对于水文负载位移,前3个HYDL-IC累计方差占比约97.36%(图4)。从图8可以看出,HYDL-IC1的时间分量较平稳且振幅最强,具有显著的周年变化,其空间响应也呈现出较好的一致性;反观HYDL-IC2和HYDL-IC3,两者的时间分量在整个时段内波动较大(如HYDL-IC2中2017年,HYDL-IC3中2011—2013年),年周期性较差但年内变化较为丰富。HYDL-IC2的强空间响应主要聚集于太行山沿线及北京市周边,表明该区域存在致使水文变化明显的自然或人类活动;HYDL-IC3的空间响应则表现出南北相反的特点,反映了某水文分量在华北地区南北部分

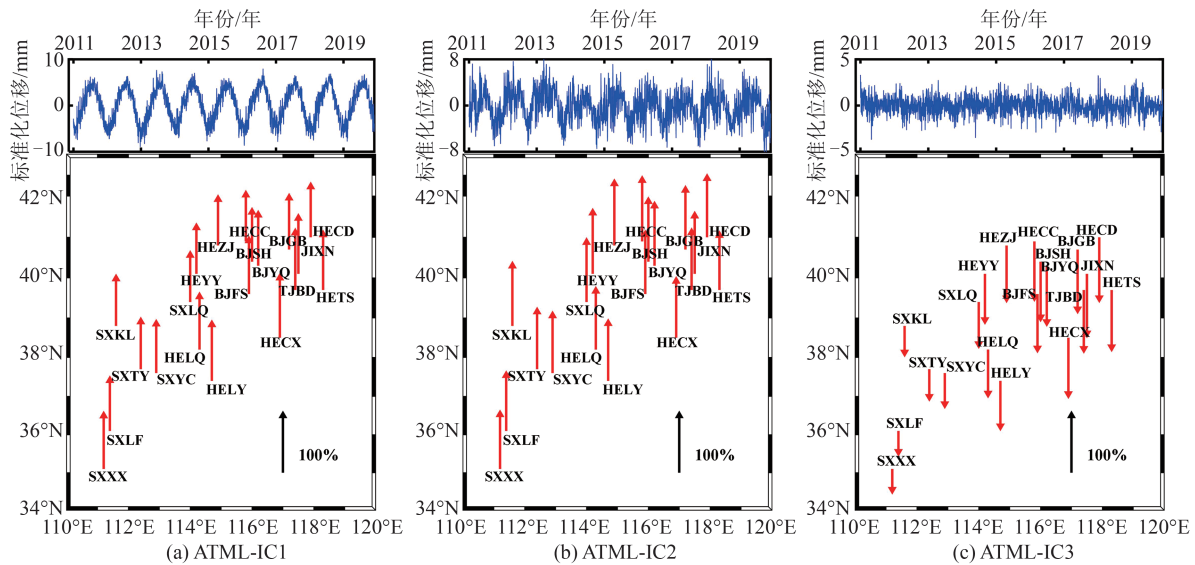


图 7 前 3 个 ATML-IC 的时间分量和空间响应

Fig. 7 Temporal Components and Spatial Response of the First Three ATML-ICs

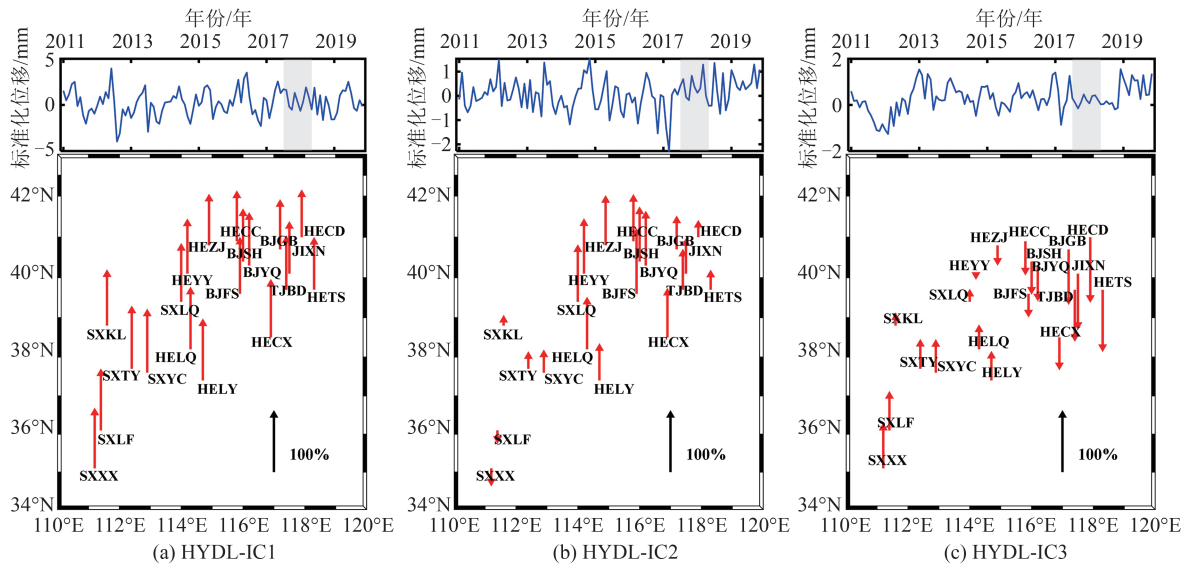


图 8 前 3 个 HYDL-IC 的时间分量和空间响应

Fig. 8 Temporal Components and Spatial Response of the First Three HYDL-ICs

别处于补给和损耗状态。综上,本文选择前 3 个 HYDL-IC 重构水文负载位移时间序列。

4.2 GNSS-IC 与环境负载垂直位移的比较

GRACE/GFO 数据仅能估计总水文质量变化(即地表水、雪水、土壤水、地下水等水文分量的质量变化之和)引起的形变,而 GNSS-IC2 和 GNSS-IC3 可能是对不同水文分量变化的形变响应,因此将 GNSS-IC2 和 GNSS-IC3 合并为 GNSS-IC2/3,再将其与水文负载位移时间序列进行比较,同时将 GNSS-IC1 与大气负载位移时间序列进行比较,计算各站点 Pearson 相关系数,结果如图 9 所示。

由图 9(a)可知,GNSS-IC1 与大气负载位移

在整体上较为吻合,区域内各站点相关系数比较接近,范围为 0.48~0.63,平均值为 0.60,表明大气负载是华北地区季节性垂直位移最重要的驱动源。由图 9(b)可知,GNSS-IC2/3 与水文负载位移存在较好的关联性,相关系数平均值为 0.50,说明水文负载是华北地区季节性垂直位移另一个重要的驱动源。然而,相关系数分布反映出明显的南北差异,较大值主要位于南部,这与华北地区不同的地下水开采方式密切相关^[1,27]。南部地下水主要开采自潜土层,虽然损耗量较大,但易受到降水的补给,因此干扰地表位移季节性变化的程度有限。反之,中北部地下水主要存储于深土层,长期的过度开采致使地下水损耗极为严

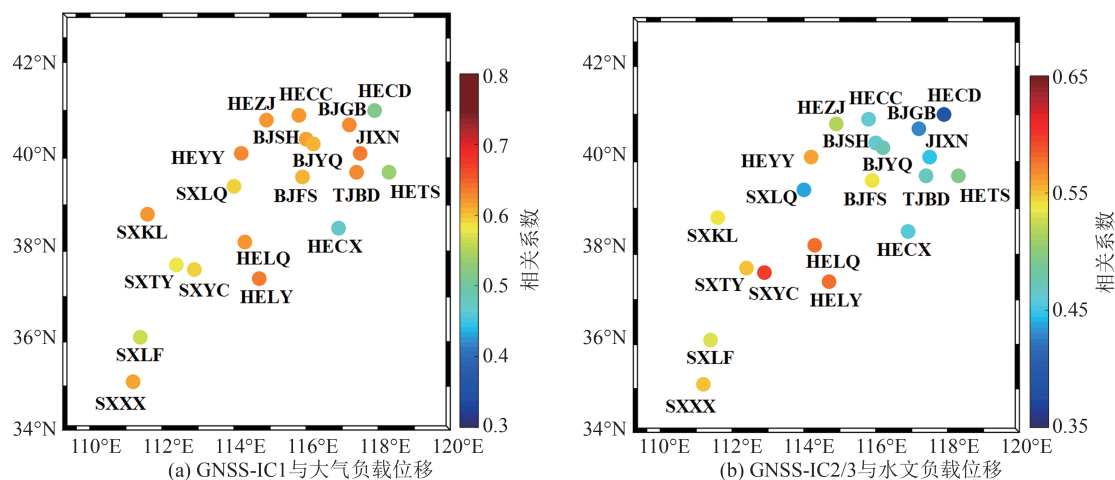


图9 GNSS-IC与环境负载位移的相关系数

Fig. 9 Correlation Coefficients Between GNSS-ICs and Environmental Loading Displacements

重且难以补给,形成了多个地下水沉降漏斗,从而产生了更为复杂的地表形变。

站点 HECD、HETS、HECX 的两组相关系数均显著小于其他站点,可能是受当地效应影响较大所致。此外,本文尝试将 GNSS-IC(IC2、IC3)与 HYDL-IC(IC1、IC2、IC3)以及利用地下水、土壤水计算的垂直位移进行交叉比较,但并未发现较明显的相关性。因此,ICA 获取的分量能够反映何种程度的真实物理源信号还待商榷。

5 结 语

本文基于 ICA 方法分析了 2011—2019 年华北地区 20 个 GNSS 基准站的季节性垂直位移时间序列的时空变化特性,并确定了其主要的源信号,得出结论如下:

1) 利用 ICA 分解季节性垂直位移能够有效探测其中隐含的周期信号,并且反映各信号迥异的分布特性。其中 GNSS-IC1 为显著的周年信号,空间响应呈现相对均匀的分布特征;GNSS-IC2 和 GNSS-IC3 均包含了周年和年内周期信号,但空间响应反映出局部集聚特征,与该地区不均匀的水资源分布状况有关。

2) 利用 ICA 对大气负载位移进行时空分解,有效分离了其中的周年信号及高频噪声,表明了 ICA 可作为一种可靠的信号滤波方法。此外,在很大程度上分离了水文负载位移的周年和年内变化,且空间响应分布反映了不同水文分量变化造成的地表垂直位移。

3) GNSS-IC1 与大气负载位移时间序列吻合较好,各站点的平均相关系数为 0.60,说明大气负载是华北季节性垂直位移最重要的源信号;

GNSS-IC2/3 与水文负载位移时间序列在各站点的平均相关系数为 0.50,说明水文负载是重要程度仅次于大气负载的源信号。

上述结果体现了 ICA 方法在 GNSS 时间序列信号提取中的良好表现。然而,本文尚未分离出其他因素诱发的季节性位移,如非潮汐海洋负载、基岩及观测墩热膨胀效应等,后续需进一步分析,使结果更加全面、客观。

参 考 文 献

- [1] Wang L S, Chen C, Du J S, et al. Detecting Seasonal and Long-Term Vertical Displacement in the North China Plain Using GRACE and GPS[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(6): 2905-2922
- [2] Li S Y, Shen W B, Pan Y J, et al. Surface Seasonal Mass Changes and Vertical Crustal Deformation in North China from GPS and GRACE Measurements[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2020, 11(1): 46-55
- [3] Pang Y J, Wu B, Cao Y P, et al. Spatiotemporal Changes in Terrestrial Water Storage in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Region from GRACE Satellites[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020, 8(3): 295-307
- [4] Jiang Weiping, Wang Kaihua, Li Zhao, et al. Prospect and Theory of GNSS Coordinate Time Series Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2112-2123 (姜卫平, 王锴华, 李昭, 等. GNSS 坐标时间序列分析理论与方法及展望[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 2112-2123)
- [5] Yan J, Dong D N, Bürgmann R, et al. Separation of Sources of Seasonal Uplift in China Using Independent Component Analysis of GNSS Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*,

- 2019, 124(11): 11951-11971
- [6] Chang X. Reconstruction of Gappy GPS Coordinate Time Series Using Empirical Orthogonal Functions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(12): 9020-9033
- [7] Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Spatiotemporal Filtering Using Principal Component Analysis and Karhunen-Loeve Expansion Approaches for Regional GPS Network Analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111: B03405
- [8] Shen Y Z, Li W W, Xu G C, et al. Spatiotemporal Filtering of Regional GNSS Network's Position Time Series with Missing Data Using Principle Component Analysis [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(1): 1-12
- [9] Khazraei S M, Amiri-Simkooei A R. On the Application of Monte Carlo Singular Spectrum Analysis to GPS Position Time Series [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9): 1401-1418
- [10] Ming F, Yang Y X, Zeng A M, et al. Spatiotemporal Filtering for Regional GPS Network in China Using Independent Component Analysis [J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(4): 419-440
- [11] Hyvärinen A, Oja E. Independent Component Analysis: Algorithms and Applications [J]. *Neural Networks: The Official Journal of the International Neural Network Society*, 2000, 13(4/5): 411-430
- [12] Forootan E, Kusche J. Separation of Global Time-Varying Gravity Signals into Maximally Independent Components [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(7): 477-497
- [13] Wang Haibo, You Wei, Fan Dongming, et al. Using ICA to Extract the Water Storage Variations Signals of the Okavango Delta [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 93-103 (王海波, 游为, 范东明, 等. 利用 ICA 方法提取奥卡万戈三角洲水储量变化信号 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(1): 93-103)
- [14] Hou Zheng, Guo Zengchang, Du Jiusheng. Research on Three Spatial-Temporal Filtering Methods for Small Scale Regional GNSS Network [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(7): 135-140 (侯争, 郭增长, 杜久升. 小尺度区域 GNSS 网三种时空滤波方法研究 [J]. 测绘科学, 2018, 43(7): 135-140)
- [15] Li Fei, Li Wenhao, Zhang Shengkai, et al. Spatiotemporal Filtering for Regional GNSS Network in Antarctic Peninsula Using Independent Component Analysis [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(9): 3279-3295 (李斐, 李文浩, 张胜凯, 等. 基于独立分量分析的南极半岛 GNSS 网区域滤波 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(9): 3279-3295)
- [16] Wang Chenyan, You Wei, Fan Dongming. Using Independent Component Analysis to Detect the Gravity Changes in the Indian Ocean Earthquakes of 2004 and 2012 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(11): 4142-4155 (王陈燕, 游为, 范东明. 利用独立成分分析检测 2004 年和 2012 年印度洋地震的重力变化 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(11): 4142-4155)
- [17] Wahr J, Molenaar M, Bryan F. Time Variability of the Earth's Gravity Field: Hydrological and Oceanic Effects and Their Possible Detection Using GRACE [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B12): 30205-30229
- [18] Kusche J, Schrama E J O. Surface Mass Redistribution Inversion from Global GPS Deformation and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Gravity Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110: B09409
- [19] Liu B, Dai W J, Liu N. Extracting Seasonal Deformations of the Nepal Himalaya Region from Vertical GPS Position Time Series Using Independent Component Analysis [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(12): 2910-2917
- [20] Dill R, Döbrowsky H. Numerical Simulations of Global-Scale High-Resolution Hydrological Crustal Deformations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(9): 5008-5017
- [21] Loomis B D, Rachlin K E, Wiese D N, et al. Replacing GRACE/GRACE-FO with Satellite Laser Ranging: Impacts on Antarctic Ice Sheet Mass Change [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(3): e2019GL085488
- [22] Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, et al. 2005 Drought Event in the Amazon River Basin as Measured by GRACE and Estimated by Climate Models [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: B05404
- [23] Rodell M, Houser P, Jambor U. The Global Land Data Assimilation System [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 381-394
- [24] Feng T F, Shen Y Z, Wang F W. Independent Component Extraction from the Incomplete Coordinate Time Series of Regional GNSS Networks [J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1569
- [25] Cao Yanping, Qin Fen, Pang Yingjun, et al. Spatiotemporal Changes in Vegetation and Hydrological Factors in the North China Plain from 2002 to 2016 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5): 1560-1571 (曹艳萍, 秦奋, 庞营军, 等. 2002—2016 年

- 华北平原植被生长状况及水文要素时空特征分析[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1560-1571)
- [26] Feng T F, Shen Y Z, Chen Q J, et al. Groundwater Storage Change and Driving Factor Analysis in North China Using Independent Component Decomposition[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127708
- [27] Guo H P, Zhang Z C, Cheng G M, et al. Groundwater-Derived Land Subsidence in the North China Plain[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1415-1427

Signal Extraction and Physical Mechanism Analysis of the Seasonal Vertical Displacement in North China

FENG Tengfei¹ SHEN Yunzhong¹ WANG Fengwei² CHEN Qiujie¹

1 College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

2 State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Objectives: North China is an important social and economic area in China but suffers from severe surface deformation. Monitoring the surface displacement effectively and timely can provide data basis for understanding the deformation mechanism and predicting disasters. However, the surface vertical displacement in North China shows significant seasonal fluctuations. Hence, this paper aims to analyze the spatiotemporal feature of seasonal vertical displacement and determine the driving sources. **Methods:** Firstly, the vertical time series of 20 global navigation satellite system (GNSS) stations from January 2011 to November 2019 are decomposed by independent component analysis. Secondly, the first six independent components (ICs) are derived and compared with the vertical displacements caused by environmental loadings. **Results:** The results show that GNSS-IC1 presents obvious annual variation, as well as a relative uniform spatial response, which is highly consistent with the displacement time series derived from atmospheric loading, and the average correlation coefficient at all stations is 0.60. GNSS-IC2 and GNSS-IC3 are both the mixed signals constrained by annual and intra-annual periods, while the spatial responses reflect locally clustered characteristics, which corresponds to the distribution of water resources in North China. After combining GNSS-IC2 and GNSS-IC3 as GNSS-IC2/3, the average correlation coefficient between GNSS-IC2/3 and the hydrological loading displacement time series at all stations is 0.50. **Conclusions:** The temporal component of each IC is generally less clustered by different time cycles and the spatial response shows distinct localized characteristics. Atmospheric and hydrological loadings are the primary driving sources of seasonal vertical displacement in North China. However, the seasonal displacements induced by other effects, including non-tide ocean loading and thermal expansion effect of bedrock and observation pillar, are not extracted and need further analysis.

Key words: North China; independent component analysis; seasonal vertical displacement; environmental loading

First author: FENG Tengfei, PhD candidate, specializes in geodetic data processing. E-mail: 1911212@tongji.edu.cn

Corresponding author: SHEN Yunzhong, PhD, professor. E-mail: yzshen@tongji.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41974002, 42061134010).

引文格式: FENG Tengfei, SHEN Yunzhong, WANG Fengwei, et al. Signal Extraction and Physical Mechanism Analysis of the Seasonal Vertical Displacement in North China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 866-874. DOI:10.13203/j.whugis20220097(冯腾飞, 沈云中, 王奉伟, 等. 华北地区季节性垂直位移信号提取及物理机制分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(6): 866-874. DOI:10.13203/j.whugis20220097)