

# 基于哨兵数据的贵阳市地面沉降分析

杨萍<sup>1</sup>, 邓兴<sup>2</sup>, 张宏泽<sup>3</sup>, 周洋<sup>4</sup>

- (1. 贵州省测绘产品质量监督检验站, 贵州 贵阳 550001;
2. 贵阳市测绘院, 贵州 贵阳 550000;
3. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025;
4. 青岛四洲重工设备有限公司, 山东 青岛 266300)

**摘要:**针对城市地面沉降现状,以贵阳市为研究区,以2019~2021年72期C波段的Sentinel-1A卫星影像为数据源,利用SNAP-STaMPS处理链开展了城市地表的形变监测,获取了研究区的地表形变信息。结果表明:贵阳市沉降主要发生在西北部区域,中心城区有抬升的趋势,沉降区域零散分布在北部区域;东部地区整体较为稳定,在龙洞堡机场区域探测到明显的沉降现象,可为规划建设、城市地质安全以及沉降防控等提供参考。

**关键词:**哨兵数据;沉降分析;SNAP-STaMPS处理链

中图分类号:TP79

文献标识码:A

文章编号:1674-9944(2023)10-0263-05

DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2023.10.037

## Settlement Analysis in Guiyang City Based on Sentinel Data

Yang Ping<sup>1</sup>, Deng Xing<sup>2</sup>, Zhang Hongze<sup>3</sup>, Zhou Yang<sup>4</sup>

- (1. Guizhou Surveying and Mapping Product Quality Supervision and Inspection Station, Guizhou, Guiyang 550001, China;
2. Guiyang Surveying and Mapping Institute, Guizhou, Guiyang 550000, China;
3. School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guizhou, Guiyang 550025, China;
4. Qingdao Sishou Heavy Industry Equipment Co., Ltd., Shandong, Qingdao 266300, China)

**Abstract:** For the current situation of urban land subsidence, in this paper, taking Guiyang City as the research area and Sentinel-1A satellite images in the C-band of the 72nd phase from 2019 to 2021 as the data source, the SNAP-STaMPS processing chain was used to monitor the deformation of the urban surface and obtain the deformation information of the study area. The results show that the settlement of Guiyang City mainly occurs in the northwest area; the central urban area has a tendency to rise, and the settlement area is scattered in the northern area. The eastern region is relatively stable as a whole, and obvious settlement phenomena have been detected in the Longdongbao airport area, which can provide a reference for planning and construction, urban geological safety, and settlement prevention and control.

**Key words:** sentinel data; settlement analysis; SNAP-STaMPS processing chain

## 1 引言

地面沉降是世界各地许多城市或地区最严重的地质环境问题之一,其对建筑物、道路和桥梁等基础设施造成严重破坏,影响人们的生命财产安全<sup>[1]</sup>。

地面沉降作为一种地质灾害,具有沉降速度慢、持续时间长、影响范围广、产生机制复杂和防治难度大等特点,严重的地面沉降易造成地上或地下建筑物和基础设施的破坏<sup>[2]</sup>。世界范围内许多国家与地区正遭受地面沉降的影响,如墨西哥,北京和上海等。我

收稿日期:2023-04-17

作者简介:杨萍(1972-),女,高级工程师,研究方向为测绘产品质量检测检查与评价、电子信息、电气工程等。

通讯作者:邓兴(1972-),男,高级工程师,研究方向为测绘产品质量管理体系监测与评价、测绘技术应用研究、地理信息等。

国是遭受地面沉降较为严重的国家之一,贵州省又是我国地质灾害发生最频繁的省份之一,据贵州省政府发布的《2020年度贵州省地质灾害防治方案》可知,截至2019年底,贵州全省已查明地质灾害隐患点10833处,遍及全省88个县(市、区、特区),地质灾害高发、易发区域面积占全省国土面积的77%。

对地面沉降进行监测是开展沉降控制工作的基础。人们提出并实施了不同的技术来检测地面沉降,包括水准测量、GPS和GNSS,上述原位测量技术以单点或局域网测量的形式来获取高精度的地面沉降信息,但存在监测点位易受干扰、监测周期长、监测成本高和监测点位稀疏等问题<sup>[3]</sup>。现阶段,更多先进的测绘遥感技术应用于地面沉降监测中。其中,星载合成孔径雷达差分干涉测量(differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)技术采用主动式微波传感器,能够实现全天候、全天候的大范围监测,基于相位测量技术能够实现cm级的测距精度,其不仅克服上述传统技术在地面监测中的局限性,且效率高、成本低<sup>[4]</sup>。许强等基于InSAR技术进行了延安新区的地面沉降时空演化特征分析<sup>[5]</sup>,陆超然基于星载InSAR技术探测了贵州山区的地质灾害隐患点<sup>[6]</sup>,何秀凤等基于InSAR技术进行了连盐高铁的沉降监测<sup>[7]</sup>,白林等基于InSAR技术反演邯郸平原地表形变<sup>[8]</sup>。

岩溶地区地面沉降具有复杂的成因、复杂的演变过程和不同的时空分布,监测和分析岩溶地区地表形变对区域可持续发展具有重要意义。本研究通过Sentinel-1A数据,基于SNAP-STaMPS处理链,利用STaMPS技术获取了贵阳市2019~2021年期间的地表形变信息,以期为贵阳市的规划建设 and 沉降防控提供科学依据。

## 2 实验部分

### 2.1 研究区概况

贵阳市地处贵州省中部,是贵州省经济、文化中心。研究区覆盖贵阳市部分区域,地跨东经 $106^{\circ}32' \sim 106^{\circ}97'$ ,北纬 $26^{\circ}30' \sim 26^{\circ}76'$ ,覆盖面积约 $2600 \text{ km}^2$ ,如图1中的蓝色实线所示。研究区地处黔中典型岩溶山区,属高原中山丘陵地貌,平均海拔高度约为1100 m,区内跨扬子准地台中黔北台隆和黔南台陷2个次级构造单元,地层以寒武系和

三叠系为主,研究区属亚热带湿润温和型气候,区内土壤类型丰富,植物种类繁多<sup>[9]</sup>。研究区内河流水系为长江流域乌江水系思南以上区和珠江流域红柳江水系红水河蒙江上游区,区内地下水资源丰富,岩溶水占90%以上,地下水主要通过降水入渗进行补给。

### 2.2 数据源

通过阿拉斯加卫星设施分布式主动存档中心(<https://asf.alaska.edu>)获取了贵阳市2019~2022年的72幅Sentinel-1A单视复数格式的SAR影像。其中,C波段Sentinel-1A数据采用IW(interferometric wide swath)的成像方式,幅宽为240 km,波长为5.6 cm,空间分辨率为 $5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ <sup>[10]</sup>。IW模式为陆地监测的主要作业模式,其通过渐进扫描地形观测(terrain observation by progressive scan, TOPS)成像模式获取SAR数据, TOPS模式取代了传统ScanSAR模式,其几乎一致的SNR和分布式目标模糊率解决了扇形和方位角变化的模糊性问题,每幅SAR影像包含3个子带(IW1、IW2和IW3)数据<sup>[10]</sup>。所使用的Sentinel-1A数据在升轨模式下沿轨道55自南向北飞行,数据框架为82,在北京时间18:59对贵州区域进行数据采集,覆盖研究区的IW2和IW3区域如图1所示。

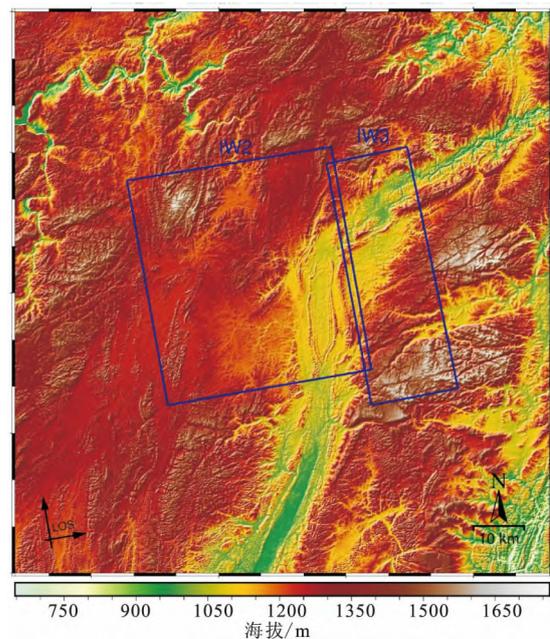


图1 IW2和IW3基本情况

### 2.3 研究方法

#### 2.3.1 SNAP预处理

SNAP(sentinel application platform)由欧空

局开发,建立在先前的开源工具箱上,整个处理流程使用 SNAP 图形生成器(graph processing tool, GPT)将不同功能进行组合,处理链以 XML 格式

文件保存<sup>[11]</sup>。实验通过 snap2stamps 脚本进行自动处理,脚本可通过 Zenodo 存储库获得,处理流程如图 2 所示。

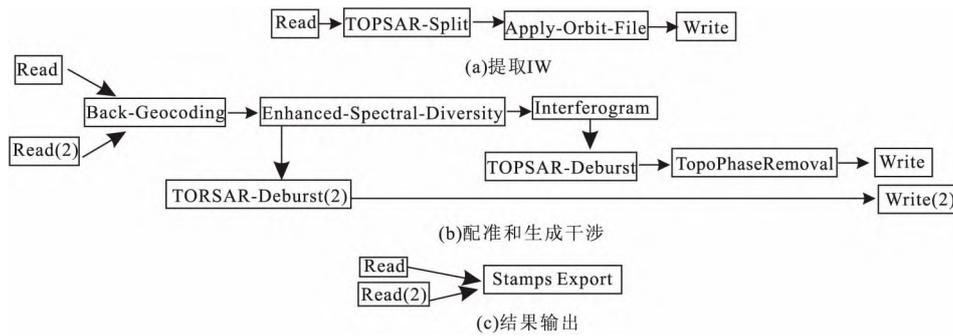


图 2 基于 SNAP 的数据预处理

### 2.3.2 斯坦福永久散射体 StaMPS 技术

StaMPS(stanford method for persistent scatterers)技术利用干涉相位的空间相关性来寻找相位稳定的像元,并且识别它们无须事先假设其变形率的时间变化行为<sup>[12~14]</sup>。其具体步骤可概括为<sup>[13]</sup>:

(1)差分干涉图生成和几何相位校正。不同时间获取的  $N+1$  幅影像能够形成  $N$  幅干涉图,选择使所有干涉图总相干性最大的影像作为主影像,使用基于振幅的算法估计影像对之间的位置偏移,通过加权最小二乘法估计将主影像映射到其他各影像的映射函数;基于映射函数使用 12 点提升余弦插值核将剩余的  $N$  幅影像重采样到主影像雷达坐标系上;基于复共轭相乘和 DEM 地形相位模拟最终生成原始差分干涉图。本研究选取 2021 年 8 月 26 日的影像作为主影像,进而生成 71 对干涉像对,主辅影像和干涉像对的时空基线如图 3 所示。

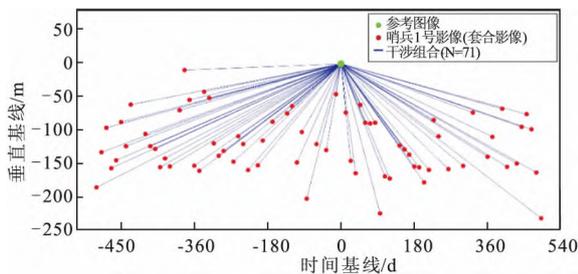


图 3 时空基线

几何相位校正。首先,使用平地相位移除后的干涉图来校正每个像元的相位;然后,将 DEM 转换到雷达坐标系中来估计由于真实表面与参考椭球体的偏差而产生的相位。

(2)相位稳定性估计。首先,基于振幅稳定性和相位稳定性之间的统计关系选择一组初始候选

点,Hooper 等采用 Ferretti 等对 ADI 的定义<sup>[15]</sup>,以 0.4 的阈值选择初始候选点,被选初始候选点作为一个像元子集被称为永久散射体候选点(persistent scatterer candidate,PSC)。接下来,通过相位分析评估 PSC 点的相位稳定性。

(3)PS 点筛选。在相位稳定性估计的迭代中计算时间相干性  $\gamma_x$  的均方根变化,由于 ADI 和相位稳定性之间存在关联,通过 PSC 点的  $\hat{\phi}_{A,x}$  和  $\gamma_x$  能够更准确地计算其可能是 PS 点的概率,一旦每个 PSC 点的  $\gamma_x$  均方根值收敛或其变化小于给定阈值(一般为 0.005),结束迭代过程并得到所有 PSC 点的估值  $\gamma_x$ 。

(4)位移量估计。在准确的相位解缠前应当去除导致相邻 PS 点绝对相位差大于  $\pi$  的相位估计值,通常假设相邻 PS 点满足奈奎斯特-香农采样定理。接下来,基于三维相位解缠算法对 PS 点进行相位解缠,解缠相位可写为:

$$\hat{\phi}_{x,i} = \phi_{D,x,i} + \phi_{A,x,i} + \Delta\phi_{S,x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i} + \Delta\phi_{N,x,i} + 2k_{x,i}\pi \quad (1)$$

式(1)中,  $\hat{\phi}_{x,i}$  为解缠相位;  $\phi_{D,x,i}$  为 PSC 点在雷达 LOS 向上的相位差;  $\Delta\phi_{\theta,x,i}$  为观测角误差产生的残余相位;  $\phi_{A,x,i}$  为 2 次采集之间由于大气延迟差异而产生的相位;  $\Delta\phi_{S,x,i}$  为卫星轨道测量偏差导致的轨道误差相位;  $\Delta\phi_{N,x,i}$  为噪声相位,其由散射体的变化、热噪声、配准错误和相位中心在方位向位置不准确组成;  $k_{x,i}$  为未知整周模糊数。

如果相位解缠足够精确,第  $i$  幅差分干涉图中大多数 PS 点的  $k_{x,i}$  将是相同的整数。然而,在相位解缠完成后,式(1)中仍存在掩盖  $\phi_{D,x,i}$  的干扰项,干扰项的空间相关部分会使结果产生偏差,而空间不相关部分在后续的变形建模中被模拟成噪声。

此外,大气相位通过通用大气校正在线服务系统 (generic atmospheric correction online service, GACOS) 进行估计和去除<sup>[16]</sup>。将最终估计的相位乘以校正因子即可转换为位移量。

### 3 结果

采用 StaMPS 技术获取了 Sentinel-1A 卫星沿视线方向 (line of sight, LOS) 的贵阳市平均形

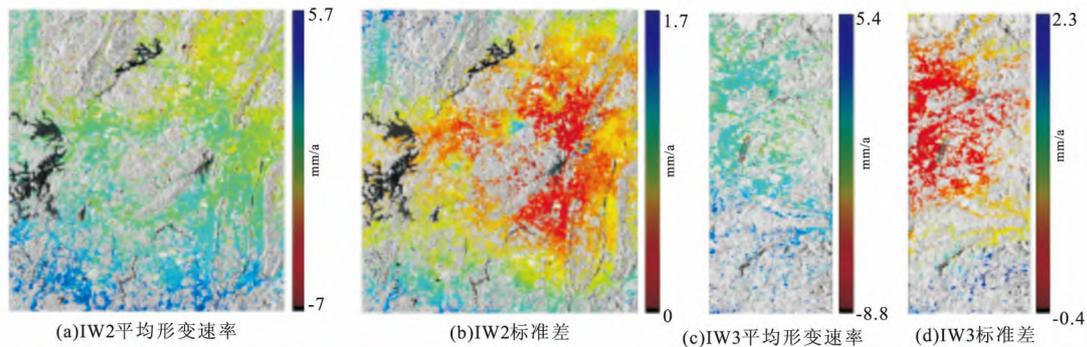


图4 LOS向平均形变速率和标准差

通过去除大气、轨道、DEM 误差后的 LOS 向平均形变速率揭示贵阳市形变特征, IW2 和 IW3 上去除大气、轨道、DEM 误差后的 LOS 向平均沉降速率如图 5 所示。由图 5 可知, 贵阳市 LOS 向平均沉降速率为  $-9.3 \sim 5.1$  mm/a, 沉降主要发生在西北部区域; 在 IW2 上的中心城区探测到的抬升趋势, 沉降区域零散分布在北部区域; IW3 整体较为稳定, 在龙洞堡机场区域探测到明显的沉降现象。此外, 还结合谷歌卫星影像, 对沉降区域进行定性分析。结果表明所识别到的沉降区域大多具有明显的地面工程活动, 发现贵阳北部区域具有明显的工程活动现象, 龙洞堡机场的沉降区域有剧烈的工程活动。

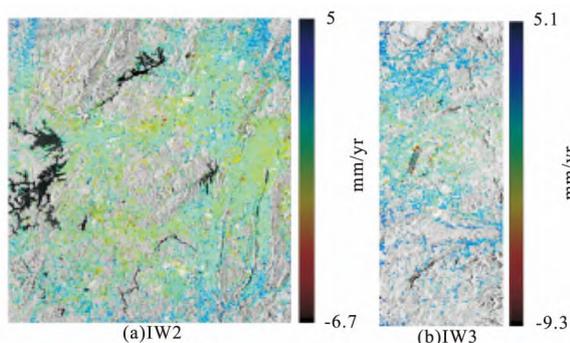


图5 去除大气、轨道、DEM 误差后的 LOS 向平均形变速率

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文基于 2019~2021 年的 72 期 C 波段的

变量, LOS 向平均沉降速率和标准差如图 4 所示, 其上覆盖的点集为 PS 点, 在 IW2 上识别到的 PS 点为 182134 个, 在 IW3 上识别到的 PS 点为 45820 个。由图 4 可知, PS 点并未落在水面、茂密的植被和光滑的地面上, 贵阳市发生地面沉降的区域主要集中在西北部。此外, LOS 向平均沉降速率和标准差变化幅度较小, 这表明结果稳定可靠。

Sentinel-1A 卫星数据, 利用 SNAP-STaMPS 处理链获取贵阳市地表形变信息, 结果表明: 贵阳市整体呈稳定状态, 仅在部分区域发现沉降现象, 谷歌卫星影像表明沉降区域具有新建区域的形变特征。利用 InSAR 技术进行地表形变监测, 能够大面积、快速了解城市的安全状态, 可为相关部门进行规划建设、城市地质安全以及沉降防控提供技术支持和依据。

### 4.2 讨论

研究表明, 相对稳定城市区域的地面沉降主要是由工程建设导致<sup>[17, 18]</sup>。近几十年来, 贵阳市快速的社会和经济转型使得大量人口涌入城市, 人口迁移促进了城市向外扩张, 这点在贵阳市的西北部区域尤为明显, 该区域进行了大量的工程建设活动, 而沉降区域也大多位于该区域, 推测城市的工程建设活动是导致区域性沉降的原因之一。此外, 贵阳市在快速城市化和工业化发展进程中往往伴随着地下水的开采<sup>[19]</sup>。研究表明, 地下水的开采会导致易受影响含水层系统的压实, 进而导致地面沉降的发生<sup>[20]</sup>。接下来, 可结合土地覆盖变化和地下水资料进行更为详细的分析。

### 参考文献:

- [1]朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717-1733.
- [2]秦同春, 程国明, 王海刚. 国际地面沉降研究进展的启示[J]. 地质通报, 2018, 37(Z1): 503-509.
- [3]王洲. GNSS 与 InSAR 地面形变监测深度融合[D]. 兰州: 兰州

- 交通大学, 2021.
- [4]李振洪, 朱武, 余琛, 等. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1485—1519.
- [5]许强, 蒲川豪, 赵宽耀, 等. 延安新区地面沉降时空演化特征时序 InSAR 监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 957—969.
- [6]陆超然. 基于星载 InSAR 技术的贵州山区地质灾害隐患探测与形变分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [7]何秀凤, 高壮, 肖儒雅, 等. 多时相 Sentinel-1A InSAR 的连盐高铁沉降监测分析[J]. 测绘学报, 2021, 50(5): 600—611.
- [8]白林, 李振洪, 宋莎, 等. 利用时序 InSAR 技术反演邯郸平原区地表形变与含水层参数[J]. 地球物理学报, 2022, 65(9): 3351—3362.
- [9]杨应增. 岩溶地下水对城市土地利用及景观格局演变的响应过程研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [10]Torres R, Snoeij P, Geudtner D, et al. GMES Sentinel-1 mission[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 120(15): 9—24.
- [11]Haley M, Ahmed M, Gebremichael E, et al. Land subsidence in the Texas coastal bend: Locations, Rates, Triggers, and Consequences[J]. Remote Sensing, 2022, 14(1): 192.
- [12]Hooper A, Zebker H, Segall P, et al. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(23).
- [13]Hooper A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(16).
- [14]Hooper A, Bekaert D, Spaans K, et al. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation[J]. Tectonophysics, 2012, 514: 1—13.
- [15]Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8—20.
- [16]Yu C, Li Z, Penna N T, et al. Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar Observations [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(10): 9202—9222.
- [17]Yang M, Wang R, Li M, et al. A PSI targets characterization approach to interpreting surface displacement signals: A case study of the Shanghai metro tunnels[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 280: 113150.
- [18]Wang R, Yang M, Dong J, et al. Investigating deformation along metro lines in coastal cities considering different structures with InSAR and SBM analyses[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 115: 103099.
- [19]宋小庆. 影响贵阳地下空间开发的环境地质因素分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017(S2 vo 13): 503—507.
- [20]Bakon M, Czikhhardt R, Papco J, et al. remotIO: A Sentinel-1 Multi-Temporal InSAR Infrastructure monitoring service with automatic updates and data mining capabilities[J]. Remote Sensing, 2020, 12(11): 1892.
- (上接第 262 页)
- [4]王东辉, 倪化勇, 李鹏岳, 等. 城市地下空间资源综合利用实践: 以成都市地质环境图集(2017)数据集为例[J]. 中国地质, 2019, 46(S2): 21—29.
- [5]刘凤梅, 黄长生, 赵信文. 支撑服务广州市规划建设与绿色发展资源环境图集数据集[J]. 中国地质, 2019, 46(S2): 102—109.
- [6]程飞, 成昆凤. 《成渝城市群综合发展地图集》的设计与特点[J]. 地矿测绘, 2020, 36(1): 10—13.
- [7]张掖市自然资源局. 关于自然资源调查监测工作的几点思考 [EB/OL]. (2019-7-17) [2023-3-8]. [http://www.zhangye.gov.cn/gtj/dzdt/gzdt/201907/t20190717\\_245266.html](http://www.zhangye.gov.cn/gtj/dzdt/gzdt/201907/t20190717_245266.html).
- [8]秦建英. 安泽县王村河流域耕地景观及其影响因素分析[D]. 太原: 山西师范大学, 2017.
- [9]冯磊. 基于高分辨率卫星遥感的城市典型地物变化监测[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [10]张雪颖, 任健. 陕西省供电营业区图集的设计与编制[J]. 测绘技术装备, 2012, 14(4): 37—40.
- [11]张宏刚. 测区检校场在面阵相机航测生产中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [12]李磊, 徐宗学, 李艳利. 流域生态水文专题图集的制作[J]. 测绘科学, 2013, 38(4): 175—177, 183.
- [13]中国地质调查局. 中国地质调查局自然资源综合调查实施方案汇报会综述[EB/OL]. (2018-6-4) [2023-3-31]. [https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201806/t20180604\\_459138.html](https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/201806/t20180604_459138.html).
- [14]杜东, 刘宏伟, 马震. 京津冀一体化协同发展, 地质调查工程先行[J]. 地球, 2022(4): 18—23.
- [15]夏真, 林进清, 郑志昌. 海岸带海洋地质环境综合调查方法[J]. 地质通报, 2005, 24(6): 570—575.
- [16]张宏伟, 戴利国. 关于《包头市地图集》编制的若干思考[J]. 城市勘测, 2012(5): 102—104.
- [17]林昱, 杜清运, 杨龙. 基于 ArcGIS for Maritime 的海事测绘信息数据库构建[J]. 地理信息世界, 2016, 23(5): 22—27.
- [18]杨叶. 浅析《山西省地理国情监测成果图集》的设计和编制[J]. 经纬天地, 2020(4): 95—99.
- [19]刘大海, 马雪健, 邢文秀, 等. “基本自然资源区”制度研究[J]. 海洋开发与管理, 2018(10): 3—9.
- [20]地理监测平台. 全国海岸带综合保护利用规划[EB/OL]. (2019-11-6) [2023-3-31]. <http://www.dsac.cn/News/Detail/27442>.