

引文格式: 李东, 侯西勇. 利用 Sentinel-1A 数据监测地表形变案例分析 [J]. 测绘通报, 2020(3): 118-122. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0091.

# 利用 Sentinel-1A 数据监测地表形变案例分析

李东<sup>1,2</sup>, 侯西勇<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003;

2. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003)

**摘要:** 雷达卫星结合 InSAR 技术已广泛应用于高精度地表形变监测领域。本文选取 2017 年九寨沟地震为研究案例, 利用 Sentinel-1A 地震前后的单视复数影像, 基于 D-InSAR 技术获取该次地震的同震形变场。结果显示: 震中西北侧表现出相对均匀的下沉现象, 沉降漏斗区雷达视线向最大沉降量达 25.1 cm; 东南侧呈现不均匀抬升状态, 地表破碎较为明显, 最大抬升量为 11.6 cm。研究表明基于 Sentinel-1A 数据的 D-InSAR 技术可以为地震形变场的定量分析提供一种快速有效的手段, 为阐释地震发震机理及评估受灾情况提供必要的支撑, 具有广阔的应用前景。

**关键词:** Sentinel-1A; D-InSAR; 地表形变; 九寨沟; 地震

中图分类号: P22

文献标识码: A

文章编号: 0494-0911(2020)03-0118-05

## A case study of how to measure surface deformation using Sentinel-1A data

LI Dong<sup>1,2</sup>, HOU Xiyong<sup>1,2</sup>

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;

2. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

**Abstract:** Radar satellites combined with InSAR technology have been widely used in the field of high-precision surface deformation monitoring. In this paper, Sentinel-1A single look complex images, before and after the Jiuzhaigou  $M_s$  7.0 earthquake are chosen to derive the seismic deformation field using the D-InSAR method. The results show that the northwest side of the epicenter displays a relatively uniform subsidence. In the subsidence funnel area, the maximum settlement is 25.1 cm in the line of sight direction. While in the southeast side of the epicenter, the broken surface shows an uneven uplift, and the maximum lifting amount is 11.6 cm. The research shows that based on Sentinel-1A data, the D-InSAR technology can provide a fast and effective means for the quantitative analysis of seismic deformation field. It can provide necessary information for explaining the earthquake mechanism and assessing the disaster situation. There would be broad application prospects in the field of surface deformation survey in the future.

**Key words:** Sentinel-1A; D-InSAR; surface deformation; Jiuzhaigou; earthquake

地震是危害人类生命财产安全的重大地质灾害之一<sup>[1]</sup>。对地震引发的地表形变进行定量分析是研究地质灾害触发机制和评估受灾情况的重要途径<sup>[2]</sup>。稀疏的 GPS 和强震测量数据所获取的观测数据空间分辨率较低, 无法满足地表形变的监测需求。D-InSAR 技术能够快速、准确地获取震区大范围地表形变信息, 在此基础上分析地震造成的地面破裂状况, 进而反演断层的几何参数等多种信息。自文献[3]首次利用 D-InSAR 技术获取 Landers 地震的同震形变场以来, 该技术得到了相关学者的关注, 并被迅速发展及广泛应用<sup>[4-11]</sup>。欧空局于 2014 年发射且数据实施免费开放的 Sentinel-1A 卫星, 重

访周期为 12 d 弥补了国内数据短缺和更新速度慢等问题。该数据采用 C 波段, 对地表形变的敏感度较好, 在地震形变监测及灾害应急响应中拥有很大优势<sup>[2]</sup>。本文基于 Sentinel-1A 数据从遥感学角度阐释 D-InSAR 技术在地震形变监测中的应用。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分四川九寨沟发生  $M_s$  7.0 级地震, 震中位于  $103.82^\circ\text{E}$ 、 $33.20^\circ\text{N}$ 。本次地震造成 25 人死亡, 景区受到严重破坏。该地震区多为原始林区且区域地质条件复杂, 震中处于塔藏

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-07-03

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2019M652487); 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所)开放基金(2018KFJJ05); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19060205)

作者简介: 李东(1985—), 男, 博士后, 主要研究方向为 InSAR 地表形变监测与分析。E-mail: dli@yic.ac.cn

通信作者: 侯西勇。E-mail: xyhou@yic.ac.cn

断裂、岷江断裂、雪山断裂、虎牙断裂等活动断裂围闭的空震区<sup>[12-13]</sup>,如图1所示。该区地处高海拔深切峡谷山区,河谷切割深度多在1000 m以上。震中附近GPS观测点分布稀疏,且100 km范围内无水准路线通过,使得以地面观测站为基础的常规地壳形变观测技术较难实施<sup>[14]</sup>。

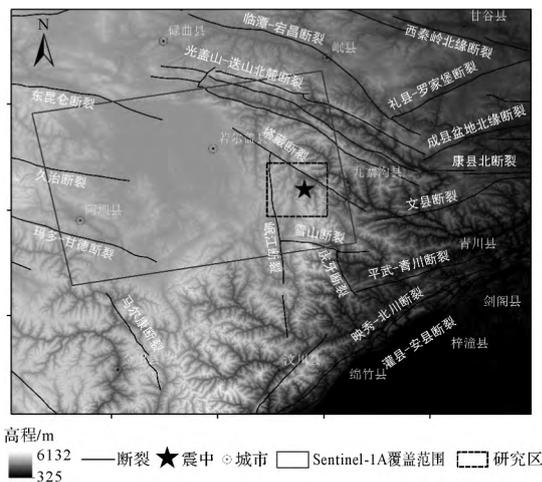


图1 九寨沟震区地质背景

## 1.2 D-InSAR 形变监测原理

D-InSAR 形变监测是采用相同地区形变前后两幅不同时相的雷达影像,通过差分干涉处理得到干涉相位中形变部分,使得差分相位信息能够直接反映地表形变量<sup>[15]</sup>。本文选取二轨法实现 D-InSAR 形变监测,其优点是满足干涉条件的两幅 SAR 影像和 DEM 比较容易获取,其原理详见文献[15—16]。

## 1.3 数据来源

(1) SAR 数据 本文选取地震前(2018-07-30)与地震后(2018-08-11)的两景升轨影像(IW 模式单视复数影像, VV 极化,轨道号为128)组成干涉像对。影像的雷达波入射角为 $39.3^\circ$ ,时间基线为12 d,空间垂直基线为36.79 m,远低于临界基线值,具有较高的空间相关性,适合同震形变探测。

(2) 精准轨道数据 含有误差的轨道信息造成基线误差以残差条纹的形式存在于干涉图中。因此,使用卫星精密轨道数据对轨道信息进行修正,可有效去除因轨道误差引起的系统性误差。POD 精密定轨星历数据距离 GNSS 下行21 d后可以使用,是 Sentinel-1 卫星精确的轨道数据,其定位精度优于5 cm。

(3) 参考 DEM 本文使用30 m分辨率的 SRTM 数字高程模型数据,作为二轨法中的外部

DEM,用于去除地形相位并进行相位解缠。

## 1.4 形变信息提取方法

D-InSAR 技术反演形变信息,其主要过程如下:

(1) 影像对配准 结合轨道和地形数据的图像配准技术对影像进行配准<sup>[17]</sup>。该方法基于外部 DEM 信息生成主辅影像方位向与距离向偏移量的多项式,利用该多项式将粗配准后的重采样辅影像再次重采样,从而达到精配准的目的<sup>[14]</sup>。

(2) 干涉图生成 采用多视处理对两景影像的相位信息进行干涉处理,得到原始干涉图。差分干涉处理中,分别使用轨道参数、外部 DEM、滤波处理对参考椭球相位趋势、地形相位信息及噪声进行去除。

(3) 相位解缠 分离出差分干涉相位后,需通过相位解缠来获取地表形变量。本研究选取最小费用流算法(minimum cost flow, MCF)。当有大面积的低相干或是其他限制增长的因素而使解缠困难时,该算法可以取得比区域增长法更好的结果。

(4) 地理编码 相位解缠得到整周模糊度,将仅包含有形变信息的差分干涉相位图转为雷达视线方向的形变量,然后把 SAR 坐标系下的形变图地理编码到 WGS-84 坐标投影下,最终得到基于地理坐标的 LOS 向形变图。

## 2 结果分析

按照上述数据处理方法,对九寨沟震区进行 D-InSAR 反演,获得震区约 $4100 \text{ km}^2$ 范围内的相干系数图、差分干涉图及 LOS 方向形变图。

图2(a)为差分干涉结果的相干系数图,颜色越亮,其相干系数越接近于1,表明干涉相关性越好。总体而言,震区西南侧保持了一定的相干性,而由于山高坡陡、植被茂密,震区东北侧存在一定区域的失相干。统计结果(如图2(b)所示)显示,研究区内接近70%以上的区域相关系数在0.5以上,差分干涉结果整体相关系数较高,能够保证相位解缠结果的准确度。

采用基于 Delaunay 三角网的 MCF 算法,得到九寨沟地震同震形变的干涉图像(如图3(a)所示)。干涉图像中一个黑白周期表示 $2\pi$ 的相位变化,相当于 LOS 向形变的等值线。一个黑白周期的变化反映地物沿 LOS 向发生了半个波长的位移量,即每个条纹代表2.8 cm 的 LOS 形变。差分干涉图中,黑白的周期性变化反映地表形变量大小,条纹越稀疏、黑白变化越缓慢,则形变梯度就越小;反之,地表形变梯度就越大<sup>[18]</sup>。干涉图像显示:干涉条纹以塔藏

断裂为东北侧约束边界,向西南向发散;干涉条纹呈碟状,条纹区中间较为密集;其长轴方向为北西向,长约40 km。形变干涉图中,相对于临近震中区域,

远离震中的区域干涉条纹率相对较高,震中西北侧条纹数量明显多于东南侧,说明西北侧的形变梯度较大。

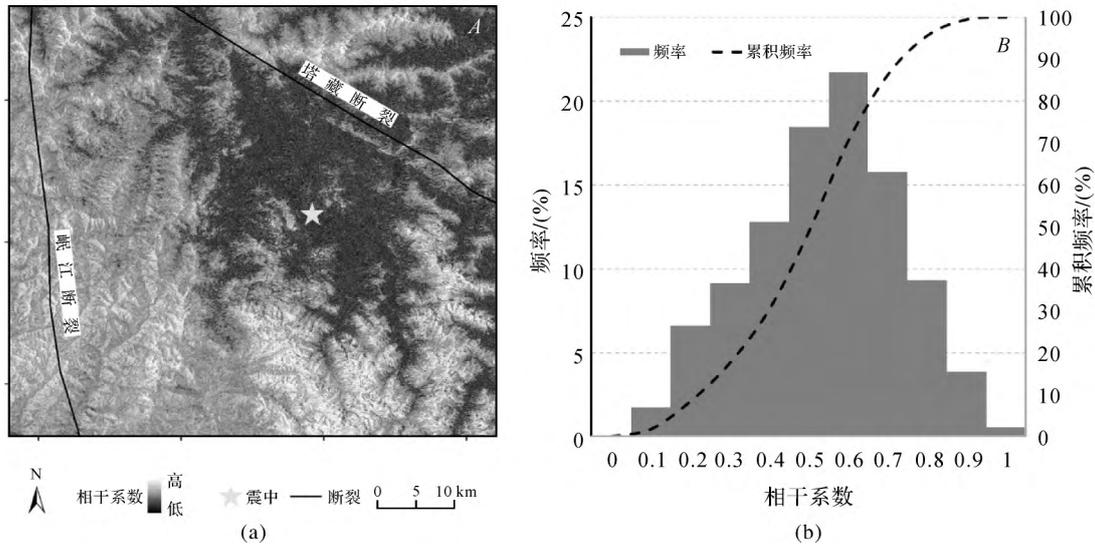


图2 震区 D-InSAR 相干系数图及统计结果

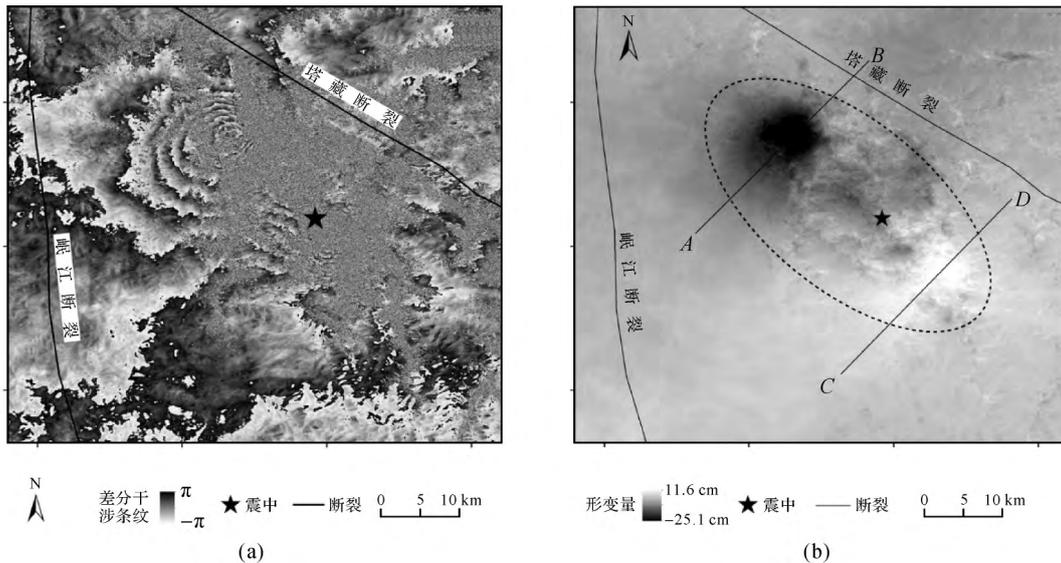


图3 九寨沟震区 InSAR 干涉条纹图及 LOS 向形变场

相位解缠前采用自适应滤波方法减少相位噪声,每个相位值的整周模糊度经解缠处理后均得到还原,图3(b)为最终得到的九寨沟地震同震形变图像,可以看出 Sentinel-1 卫星 SAR 数据可以清晰监测到此次地震的同震形变场,能够直接反映地表 LOS 方向的形变量。该升轨同震形变图显示:此次地震引起的地表形变主要集中在两个区域,形变区呈不对称分布,震中西北方向为一个近似圆形的 LOS 向下沉区,最大下沉量达 25.1 cm;而震中东南方向存在较为明显的上升区,最大上升量为

11.6 cm,该量值是水平变形与垂直变形在 LOS 投影的结果,与前人研究结果基本一致<sup>[17,19]</sup>。

此次地震对地表形变影响较大的范围为图3(b)中长椭圆所示,形变场长轴方向为 NW 向,基本平行于塔藏断裂。统计结果(见表1)显示该区沉降量大于 10 cm 的面积达 111.8 km<sup>2</sup>,占椭圆区域面积的 12.8%;抬升量大于 10 cm 的为 40.4 km<sup>2</sup>,占 4.6%。由此可见,地表大面积沉降是此次九寨沟地震造成的主要破坏结果。

表1 九寨沟震区 LOS 向形变量统计结果

形变量/cm	面积/km <sup>2</sup>	百分比/(%)
<-20	6.062	0.70
-20~-15	33.993	3.90
-15~-10	71.711	8.23
-10~-5	260.426	29.88
-5~0	249.965	28.68
0~5	208.921	23.97
5~10	40.164	4.61
>10	0.268	0.03

为更好地对同震形变场及地表破坏程度有直观认识,在垂直于形变长轴方向截取2个剖面(长约32 km)进行分析,得到图4所示的地表连续形变趋势。图中,AB剖面通过LOS向沉降区,该剖面曲线

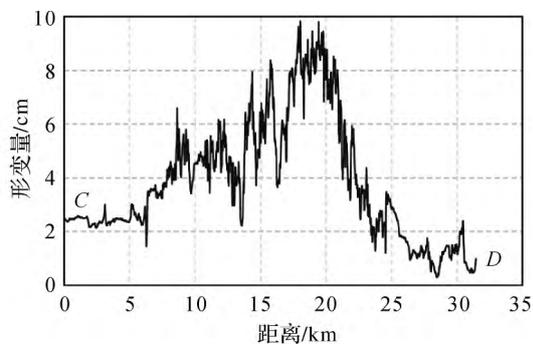
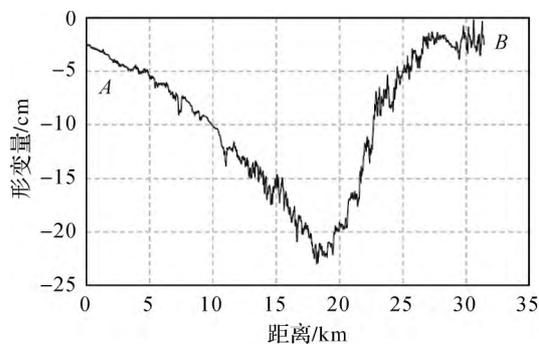


图4 震区形变场剖面图

### 3 结语

本文以九寨沟地震形变为研究对象,利用 Sentinel-1A 卫星影像,采用 D-InSAR 技术成功获取了此次地震的同震形变场。结果表明:研究中采用的 Sentinel-1A 卫星数据成像质量较好,数据对的空间基线较小,适合同震形变场反演;此次地震造成的主要地表形变区约为 870 km<sup>2</sup>,地震区域 LOS 方向最大沉降和最大抬升形变量分别为 -25.1 cm 和 11.6 cm; Sentinel-1A 数据结合 D-InSAR 技术适用于大范围地表形变监测,其形变量测量精度可达厘米级,能够提供的量测点密度远远高于传统形变监测手段。今后随着新型高分辨率和短重访周期的 SAR 传感器的研发,InSAR 技术将会获取更高时空分辨率的地表形变信息,尤其在地震灾害监测领域具有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

[1] 董文,沈占锋,程希萌.基于高分辨率遥感目标特征库的地震灾情快速评估方法[J].地球信息科学学报,

整体光滑连续、跳变较少,最大沉降量为 23.0 cm; CD 剖面通过 LOS 向抬升区,该剖面曲线总体连续,但跳点较多,最大抬升量为 9.8 cm。由此分析可知,震中西北侧在地震之后呈现相对均匀的下沉趋势,地表呈现沉降漏斗状;震中东南侧在地震之后呈不均匀抬升状态,地表破碎较为明显。

综合图3、图4可知,D-InSAR 技术获取的九寨沟同震形变场基本能够反映该次地震的地表位移情况。此次地震造成的同震形变场发生在塔藏断裂、岷江断裂与虎牙断裂交汇处,地震引起的形变在空间上较为连续,没有出现陡变现象。主要形变区域呈 NW 向的长椭圆形态,震中西北侧形变量大于东南侧。

2016,18(5):699-707.

- [2] 杨亚夫,朱建军,王永哲,等.利用 Sentinel-1A 数据、D-InSAR和沿轨干涉技术获取2016年高雄 M<sub>s</sub>6.7地震三维形变场[J].大地测量与地球动力学,2017,37(4):339-343.
- [3] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. Nature, 1993, 364(6433): 138-142.
- [4] MICHEL R, AVOUAC J P, TABOURY J. Measuring near field coseismic displacements from SAR images: application to the Landers Earthquake [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(19): 3017-3020.
- [5] BURGMANN R. Deformation during the 12 November 1999 Duzce, Turkey, Earthquake, from GPS and InSAR data [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(1): 161-171.
- [6] BECHOR N B D, ZEBKER H A. Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(16): 275-303.
- [7] LIU G, LI J, XU Z, et al. Surface deformation associated

- with the 2008  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake from ALOS L-band SAR interferometry [J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation, 2010, 12 (6): 496-505.
- [8] 王永哲, 朱建军, 李志伟, 等. 利用 PALSAR 数据反演 2010 年玉树地震断层的同震滑动分布 [J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 27-33.
- [9] 刘洋, 许才军, 温扬茂, 等. 2008 年大柴旦  $M_w$ 6.3 级地震的 InSAR 同震形变观测及断层参数反演 [J]. 测绘学报, 2015, 44(11): 1202-1209.
- [10] 王慧玲, 张永志, 郭大同, 等. 利用 ALOS 数据获取汶川  $M_s$ 8.0 地震的震前形变 [J]. 测绘通报, 2017(7): 39-44.
- [11] 韩鸣, 张永志, 程冬, 等. 多视角 InSAR 数据解算 2017 两伊地震三维同震形变场 [J]. 测绘通报, 2019(4): 75-78.
- [12] 程强, 胡朝旭, 杨绪波. 九寨沟地震区公路沿线地质灾害发育规律及防治对策 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4): 114-120.
- [13] 姚鑫, 周振凯, 李凌婧, 等. 2017 年四川九寨沟  $M_s$ 7.0 地震 InSAR 同震形变场及发震构造探讨 [J]. 地质力学学报, 2017, 23(4): 507-514.
- [14] 季灵运, 刘传金, 徐晶, 等. 九寨沟  $M_s$ 7.0 地震的 InSAR 观测及发震构造分析 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4069-4082.
- [15] 白泽朝, 徐青, 靳国旺, 等. 利用 Sentinel-1A 数据反演 2016 年青海门源 MW 5.9 地震的同震形变场及断层参数 [J]. 地震, 2017, 37(3): 12-21.
- [16] 黄其欢, 何秀凤. D-InSAR 技术及其在监测地表形变中的应用 [J]. 全球定位系统, 2005(3): 19-23.
- [17] 王家庆, 单新建, 张国宏, 等. 2017 年九寨沟  $M_s$ 7.0 地震 InSAR 同震形变场与断层滑动分布反演 [J]. 华北地震科学, 2018, 36(2): 1-7.
- [18] 张瑞, 刘国祥, 于冰, 等. 基于 ALOS PALSAR 数据进行雷达差分干涉提取玉树地震同震地表形变场 [J]. 测绘科学, 2012, 37(4): 13-16.
- [19] 单新建, 屈春燕, 龚文瑜, 等. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0 级地震 InSAR 同震形变场及断层滑动分布反演 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 4527-4536.

(责任编辑: 郭新新)

(上接第 100 页)

- [6] 叶远智, 张朝忙, 邓轶, 等. 我国自然资源、自然资源资产监测发展现状及问题分析 [J]. 测绘通报, 2019(10): 23-29.
- [7] 吴勤书, 赵卓文, 张时智. 新时代测绘地理信息服务于自然资源管理的思考 [J]. 测绘通报, 2019(S1): 168-170.
- [8] 桂德竹, 程鹏飞, 文汉江, 等. 在自然资源管理中发挥测绘地理信息科技创新作用研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2019, 44(1): 97-100.
- [9] 杨静, 张德礼. 适应自然资源统一管理的林地调查标准研究 [J]. 上海国土资源, 2018, 39(3): 69-72.
- [10] 周朝虎. 探讨测绘地理信息服务自然资源管理 [J]. 工程技术研究, 2018(11): 139-140.
- [11] 张维宸. 组建“自然资源部”的来龙去脉 [EB/OL]. 2018-03-19. <http://www.cnmn.com.cn/shownews1.aspx?id=388917>.
- [12] 中共中央. 中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定 [EB/OL]. 2013-07-02. <http://politics.people.com.cn/n/2013/1115/c1001-23559327.html>.
- [13] 自然资源部. 自然资源部职能配置、内设机构和人员编制规定 [EB/OL]. 2019-04-25. [http://gi.mnr.gov.cn/201812/t20181204\\_2376067.html](http://gi.mnr.gov.cn/201812/t20181204_2376067.html).
- [14] 董祚继. 关于新时代自然资源工作使命的思考 [J]. 国土资源, 2018(4): 13-17.
- [15] 自然资源部. 自然资源现行标准目录 (截止 2019 年 4 月) [EB/OL]. 2019-06-30. [http://gi.mnr.gov.cn/201904/t20190428\\_2407262.html](http://gi.mnr.gov.cn/201904/t20190428_2407262.html).
- [16] 自然资源部. 自然资源科技创新发展规划纲要 [EB/OL]. 2018-09-25. [http://www.mnr.gov.cn/gk/tzgg/201811/t20181113\\_2364664.html](http://www.mnr.gov.cn/gk/tzgg/201811/t20181113_2364664.html).
- [17] 曾庆华, 陈成鑫. 大数据时代社会治理的创新发展路径 [J]. 人民论坛, 2018(6): 64-65.

(责任编辑: 纪银晓)