

刘珠妹,张景发,李盛乐.2000—2018年全国形变台站周边环境时空变化特征及对垂直摆观测影响分析[J].地震工程学报, 2021,43(3):583-593.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.583

LIU Zhumei, ZHANG Jingfa, LI Shengle. Spatio-temporal Variation Characteristics of Surrounding Environment and Associated Impact on Vertical Pendulum Observation of Deformation Stations in China from 2000 to 2018[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3): 583-593. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.583

2000—2018年全国形变台站周边环境时空变化特征及对垂直摆观测影响分析

刘珠妹^{1,2}, 张景发³, 李盛乐²

(1. 中国地震局工程力学研究所(工程与工程振动重点实验室), 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室, 湖北 武汉 430071;

3. 中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室, 北京 100085)

摘要: 利用中国自主研发的全球首套 30 m 分辨率 GlobeLand30 地表覆盖产品调查全国定点形变台站周边 5 km 范围内的土地覆盖类型分布。应用地类面积/变化率、类型转入转出率等指标分析研究区各类型的转移规律,并辅以 MODIS 土地覆盖年数据集从全国和分区角度揭示 2001—2018 年间各土地类型时空变化格局,最后以垂直摆倾斜观测为例,探索台站周边土地覆盖变化总量与仪器观测背景噪声的关系。结果表明:(1)中国定点形变台站周边 5 km 范围内主要以耕地、森林为主。2000—2010 年间,人造地表占比从 11.8% 升高至 14.5%,而耕地和草地面积分别减少了 2.2% 和 1.6%。研究区内耕地转为人造地表的面积最大,共计 525 km²。(2)中国大陆各地震区内台站周边土地覆盖变化格局不同,华北地震区的耕地降低和人造地表增长最为剧烈;新疆地震区以草地类型的降低和裸地类型的升高为主;东北地震区草地类型增长而人造地表稍有下降。(3)2001—2018 年间,研究区森林面积在波动中缓慢升高;耕地面积则持续减少,尤其在 2005—2016 年间,减少幅度增大;人造地表类型则是逐年持续、稳定的增加。(4)2016 年全国垂直摆倾斜仪观测背景噪声与台站周边全年的土地覆盖变化总量有一定的相关性,但华南地震区内台站由于受到海洋运动的影响,其仪器的噪声水平与周边环境变化不成正相关。

关键词: 土地覆盖变化; 地震分区; 垂直摆倾斜仪; 背景噪声

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)03-0583-11

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.583

Spatio-temporal Variation Characteristics of Surrounding Environment and Associated Impact on Vertical Pendulum Observation of Deformation Stations in China from 2000 to 2018

LIU Zhumei^{1,2}, ZHANG Jingfa³, LI Shengle²

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering & Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology,

收稿日期: 2019-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(42004044)

第一作者简介: 刘珠妹(1987—),女,博士生,防灾减灾及防护工程专业,主要研究方向为遥感减灾应用。E-mail: ailiuzhumei@163.com。

China Earthquake Administration, Wuhan 430071, Hubei, China;

3. Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract: This paper investigated the temporal and spatial change of land cover type within 5 km around the deformation stations in China by using the GlobeLand30 product and MODIS-MCD12Q1 land cover dataset from 2000 to 2018. Then taking the vertical pendulum observation as an example, the relationship between the total land cover changes around deformation stations and the background noise of instrument observation was explored. The results showed that: (1) Cultivated land and forest are the main land types within 5 km around the fixed deformation stations in China. From 2000 to 2010, the proportion of artificial surface increased from 11.8% to 14.5%, while the area of cultivated land and grassland decreased by 2.2% and 1.6%, respectively. The area of cultivated land converted to man-made surface is the largest in the study area, with a total value of 525 km². (2) The decrease of cultivated land and the increase of man-made surface are the most severe in North China seismic region; the decrease of grassland type and the increase of bare land type are the main types in Xinjiang seismic region; the increase of grassland type and the decrease of man-made land surface are slightly in Northeast China seismic region. The change of land cover around stations in different seismic regions of mainland China is different. The area of cultivated land decreased while the artificial surface increased acutely in North China; Xinjiang seismic zone was mainly decreased in grassland and increased in bare land; the grassland in Northeast seismic zone increased while the artificial surface decreased slightly. (3) During 2001—2018, the forest area in the study area increased slowly and the cultivated land continued to decrease, especially in 2005—2016; the artificial surface continued to increase steadily year by year. (4) In 2016, the background noise observed by the vertical pendulum tiltmeter had a certain correlation with the total annual land cover change around the station. However, due to the influence of ocean motion, the noise level of the instruments in South China seismic zone was not positively related to the change of surrounding environment.

Keywords: land cover change; seismic zonation; vertical pendulum tiltmeter; background noise

0 引言

我国各类固定地震监测台站的建设为防震减灾工作和地震科研提供了大量连续、可靠的观测数据。然而各类观测仪器受场地内外环境的影响巨大,虽然在早期台站选址建设采取了必要措施,远离或隔绝干扰源。但随着飞速发展的城市化进程,我国地震台站的观测环境受到周边环境影响的案例时有发生^[1-3],严重影响了地震数据监测工作的有序开展。

现如今地震台站环境的监察往往是由当地台站主导,发现观测数据异常后,通过人工巡视核实异常原因后上报给主管部门,再通过行政手段与城建等部门协商解决,并没有形成常规的、固定周期的调查方法^[4-7]。传统的以实地勘察为主的调查方式具有明显的时空局限性,而遥感调查手段以经济、宏观、周期性为主要特点,可为地震台站周边环境研究提供多时相、大范围的动态变化信息。自 20 世纪 80 年代以来,航空航天遥感技术已越来越广泛应用于

大尺度范围内的土地覆盖类型调查^[8-9],并在气象领域进一步应用到城市化进程与台站监测数据质量影响的研究中。如文献^[10]利用 Landsat TM 遥感影像监测我国 1970 年以来气象台站温度记录,认为气象站被动进入城市内部,使气温观测结果最高上升了 0.09^[10]。文献^[11]研究证明,气象台站的观测环境变化导致了风速资料序列均一性受到影响。孙敏等^[12]利用 NCEP/NCAR 资料定量考察了城镇气象站点土地利用类型改变对区域温度气候趋势的贡献。地震领域尚未有利用遥感资料进行大尺度台站环境与观测质量的研究分析。

本文利用国家基础地理信息中心陈军等^[13]研制而成的全球首套 30 m 分辨率地表覆盖数据 GlobeLand30-2000/2010 两期产品,以及美国波士顿大学提供的 MODIS 每年一期 500 m 分辨率的全球土地覆盖数据集(MCD12Q1)对我国 251 个定点形变台站周边土地覆盖环境进行调查,研究全国及分区

2001—2018 年土地覆盖变化的时空格局特征及类型转移规律,以垂直摆倾斜观测为例,试图了解台站周边环境变化对仪器观测数据质量的影响。

1 数据来源

1.1 研究区

我国地震台站的数字化观测可追溯到 2001 年前后的“九五”数字化改造,在此之后各前兆学科手段的数字化观测仪器相继建设,至“十五”数字化观测项目实施后,我国台站基本上采用数字自动观测仪器和数采系统,观测数据不存在人为读数影响。本文选取了这一阶段改造完成的包含形变测项(水平摆/垂直摆/水管/钻孔等倾斜类测项、洞体/钻孔/体应变等应变类测项)的 251 个地震台站,研究 2000—2018 年台站周边土地覆盖环境变化。

根据《地震台站观测环境技术要求》(GB/T 19531.3-2004),影响地壳形变观测的干扰源包括海洋、水库、湖泊、建筑、工厂等载荷变化干扰源,铁路、公路、机场、采石采矿、冲压作业等震动干扰源,以及地面塌陷、沉降、抽(注)水等引起的水温地质环境变化干扰。以上干扰源对地应力、地倾斜观测仪器的最小影响距离在 0.5~4 km 不等^[14]。而本文所采用的全国形变台站经纬度数据来自前兆台网数据库,考虑到坐标的定位精度,本文选择以台站为中心、以 5 km 为半径的缓冲区作为研究区域。

1.2 数据来源与预处理

GlobeLand30 是由我国研制成功的世界首套 30 m 分辨率全球地表覆盖产品。该套产品以美国陆地资源卫星(Landsat TM/ETM+)影像为主,辅助有中国环境减灾卫星(HJ-1)和北京一号(BJ-1)多源影像数据,采用基于“像素分类、对象提取和知识检核”的 POK 方法研制而成^[14]。目前 GlobeLand30 已完成 2000、2010 两期基准产品。该数据覆盖南北纬 80°内的陆地范围,包括耕地、森林、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川和永久积雪等 10 种地表覆盖类型。地表覆盖数据产品配准精度达 1 像素,分类误判率结果低于 10%,显著高于其他全球地表覆盖产品^[13]。其中水体总体精度达到 92.09%,人造地表总体分类精度达到 86.97%,耕地分类精度达到 83.06%^[14],满足本次实验的精度要求。该数据由国家基础地理信息中心获取。

GlobeLand30 数据是在 WGS84 坐标系下,采用 UTM 投影的 6°分带形式,在南北纬 60°区域内,

按照 5°(纬度)×6°(经度)大小进行分幅。由于本文研究区域为中国大陆,因此选择北半球 43°~53°带,北纬 15°~50°的 2000 及 2010 年两期各 51 幅产品进行拼接,并将原始 UTM 投影批量转化为以 105°为中央经线的 Albers 等面积投影,方便全国台站周围土地面积的属性提取和横向对比。由于调查面积较小,采用等面积投影方法所求得的实测面积与理论面积最接近,其误差在 0.01%~0.02%以内,满足本实验的要求。

另外,GlobeLand30 产品虽然空间精度较高,但时间分辨率明显不足,无法揭示土地覆盖类型的年度动态变化。因此本文引入美国波士顿大学提供的 MODIS 土地覆盖产品(MCD12Q1)弥补单期分类影响无法获取地区季相变化信息的不足。该产品空间分辨率为 500 m,持续时间从 2001 年到 2018 年,其总体分类精度达到 78.3%^[15]。该数据能反映耕地、裸地、林地、灌木、草地等类型的季相变化信息,可以完成具体台站周边环境的多时序动态监测工作。

本文数据计算与处理采用了 Google Earth Engine^[16]云平台空间数据计算引擎在线完成。Google Earth Engine 具有大规模云计算能力,可轻松访问高性能计算资源,处理海量地理空间数据集。它不仅提供了相应的算法函数库,还提供了众多公开的空基/天基影像数据、环境气候、地形、社会经济等在线数据集,如 MODIS MCD12Q1 产品无需下载到本地即可利用基于 Web 的交互式开发环境完成各类计算和统计工作。

2 研究方法

2.1 台站环境变化评价指标

本文采用面积数量、地类变化率以及类型转换率指标,定量描述形变台站环境类型格局和类型转移速率和趋势。其中类型转换率又包括类型转入率和类型转出率,由转移矩阵形式表示。

地类变化率,也称为土地利用动态度,常用来表示在一个时间段中某种土地利用类型变化幅度和速率^[17-18]:

$$K = \frac{A_b - A_a}{A_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_a 为研究初期 A 类型的面积(km²); A_b 为研究末期 A 类型的面积(km²); T 为研究时段(年)。

类型转入率指的是一定时间段内,其他土地利用类型转入该类型的面积占该类型变化后面积的比重:

$$C_{in} = \frac{InA}{A_b} \tag{2}$$

类型转出率指的是一定时间段内,该类型转出成其他土地利用类型的面积占该类型原本面积的比重:

$$C_{out} = \frac{OutA}{A_a} \tag{3}$$

其中: InA 为其他类型转化为 A 类型的面积(km^2); $OutA$ 为 A 类型转化为其他类型的面积(km^2)。

土地利用转移矩阵^[19] 是马尔可夫在土地利用领域的应用,用来描述区域内不同土地利用类型的相互转化的结构和趋势特征,其表达式为:

$$L_{ij} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \cdots & L_{nn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中: i, j 为研究初期和研究末期的土地利用类型; n 表示土地利用的类型数。

2.2 多源数据一致性分析方法

由于 MODIS 年时序土地覆盖分类产品与 GlobeLand30 产品空间分辨率差异较大,因此不能采用逐像素对比验证的方法判断两套数据的一致性。考虑到本文分析的是台站周边土地覆盖类别比例及其变化趋势,因此以 GlobeLand30—2010 产品为基准,从两套产品的土地类型比例以及面积的面积一致性准则^[20] 评价 MODIS 产品的可信度:

表 1 MODIS 与 GlobeLand30 类别转换体系表

Table 1 The reclassified system combined MODIS and GlobeLand30 products

统计类别编码	统计类别	GlobeLand30 类别	MODIS 类别
1	森林	森林	常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、有林草地、稀树林地
2	耕地	耕地	农业与自然植被镶嵌体
3	草地	草地	草地
4	灌木	灌木地	郁闭灌木林、稀疏灌木林
5	湿地	湿地	永久湿地
6	裸地	苔原、裸地、冰川和永久积雪	冰川、裸地与稀疏植被
7	水体	水体	水体
8	人造地表	人造地表	城市与建筑用地

2.3 形变观测资料质量分析方法

现有研究证明,地表覆盖改变、建设工程土方开挖造成的环境载荷变化可对倾斜、应变等形变观测数据造成明显的异常及背景噪声^[4,23-25],龚丽文等^[26]、邱泽华等^[27] 对环境载荷对倾斜分量的影响进行了定量的模型计算。但由于仪器噪声的形成因素众多,难以对单一成因进行实际数据的对比和验证。

面积差异率(Class percent disagreement):

$$CD_i = \left| \frac{X_i - Y_i}{A} \right| \times 100\% \tag{5}$$

类别一致性(Class percent agreement):

$$CA_i = 1 - \left| \frac{X_i - Y_i}{A} \right| \times 100\% \tag{6}$$

式中: r 表示所有土地覆盖分类类别数; X_i 表示统计区域内 GlobeLand30 产品第 i 类别的总面积; Y_i 表示统计区域内 MODIS 产品第 i 类别的总面积; A 表示统计区域总面积。

此外,由于 MODIS 采用国际地圈生物圈计划(IGBP)分类系统,共分为常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林等 17 类(Hansen, 2000),与 GlobeLand30 产品的 10 类不同。并且两套产品对各土地覆盖类型的定义不同,如 GlobeLand30 对于森林的描述为“乔木覆盖且树冠盖度超过 30% 的土地,包括落叶阔叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、常绿针叶林、混交林,以及树冠盖度为 10%~30% 的疏林地”,而 IGBP 对森林类型的定义为“树冠盖覆盖度超过 60%”。

因此为了便于横向比较,需将两种产品的类别统一。由于 MODIS 产品在非匀质的类别,尤其是混合植被分类差异性较大,但在水体、人工建筑、裸地等类别差异性小^[15],因此,综合 LCCS 分类体系^[21] 和中国土地覆盖融合分类系统^[22] 将两者类别转化列于表 1。

赵莹^[23] 利用功率谱密度分析计算了 2016 年全国形变台网垂直摆倾斜仪的背景噪声水平 SNM :

$$SNM = \lg(meanPSD) + 1.5 \tag{7}$$

$$PSD = \frac{\Delta t}{N} \left| \sum_{j=1}^n x(j) \exp(2\pi i(j-1)(k-1)/N) \right|^2 \tag{8}$$

式中: $x(j)$ 为垂直摆倾斜仪记录; Δt 为采样间隔; N 为采样点总数。计算结果表示,全国垂直摆倾斜仪

的背景噪声值分布在 0.005~2.534 之间。

本文利用上述研究结果,对 2016 年全国垂直摆倾斜仪的背景噪声和仪器周边 5 km 范围内全年的土地覆盖类型变化幅度进行分级对比,背景噪声值按 $[0,0.1)$ 、 $[0.1,1.5]$ 和 $(1.5,\infty)$ 从低到高分为 3 个等级。而土地覆盖类型变化幅度则按照 $(0,1]$ 、 $(1,3]$ 、 $(3,5]$ 、 $(5,\infty)$ (单位: km^2)从小到大分为 4 个等级,从全国和分区角度探究垂直摆倾斜测量与仪器周边环境变化是否存在空间和强度上的相关性。

3 结果与分析

3.1 2000—2010 年全国形变台站周边用地总体变化特征

台站周边 5 km 区域 2000 年和 2010 年土地覆

盖状况如表 2 所列。从表中可以看出,台站周边土地覆盖以耕地、森林为主,占到了 60%左右;其次是草地和人造地表;其他灌木、裸地、水体、湿地类别总量占比不到 10%。2000—2010 年间土地覆盖类型的变化量为人造地表>耕地>草地>灌木>裸地>湿地>水体>森林。其中耕地、草地面积减少最为剧烈,分别达到 437.72 km^2 和 316.52 km^2 ,占总量的 2.1%和 1.6%;人造地表类型面积则显著增加,总面积增加了 550.17 km^2 ,占比从 2000 年的 11.8%升高到 14.5%;灌木、裸地类型分别增加了 113.62 km^2 、106.18 km^2 ,升高幅度占总量的 0.6%。2000—2010 年,灌木类型变化速率明显,达到 8.21%;其次为人造地表和湿地类,变化速率分别为 2.37%和-2.01%。

表 2 2000 年及 2010 年全国形变定点台站周边 5 km 土地覆盖面积总量统计*

Table 2 Statistics of total land cover area within 5 km around national deformation stations in 2000 and 2010

土地覆盖 类型	2000 年		2010 年		变化面积 / km^2	地类变化率 /%
	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%		
耕地	7 551.65	38.3	7 113.93	36.1	-437.72	-0.58
森林	4 607.66	23.4	4 615.12	23.4	7.46	0.02
草地	3 364.08	17.1	3 047.56	15.5	-316.52	-0.94
灌木	138.31	0.7	251.93	1.3	113.62	8.21
湿地	64.26	0.3	51.34	0.3	-12.92	-2.01
水体	392.06	2.0	380.87	1.9	-11.19	-0.29
人造地表	2 316.92	11.8	2 867.09	14.5	550.17	2.37
裸地	1 110.50	5.6	1 216.68	6.2	106.18	0.96

* 所调查范围不包括苔原、冰川和永久积雪两类,另外排除了海域和无数据区。

利用土地覆盖转移矩阵来说明研究区内的各土地覆盖类型的转入和流向(表 3)。在 2000—2010 年间,研究区内主要是耕地、人造地表、森林、草地之间的转化。其中耕地转为人造地表的面积最大,约 525 km^2 。其次是草地和森林之间的相互转化,

但草地到森林的转化面积大于森林到草地的转化。此外,另有部分草地转出为灌木、裸地、人造地表和耕地类型。因此总体来说人造地表和森林的总量均为上升趋势,而耕地和草地的总量则大幅度减小。

表 3 2000—2010 年研究区内土地覆盖类型转换矩阵(单位: km^2)

Table 3 Conversion matrix of land cover type in 2000 and 2010 (Unit: km^2)

土地类型	耕地	森林	草地	灌木	湿地	水体	人造地表	裸地
耕地	6 681.49	160.85	118.9	8.52	6.02	40.1	525.02	10.39
森林	131.71	4 214.01	177.68	32.03	0.62	15.25	35.74	0.53
草地	116.35	218.35	2 655.93	116.75	5.61	11.76	114.69	124.5
灌木	4.17	31.86	12.49	87.26	0	0.52	1.91	0.03
湿地	3.46	0.65	7.48	0.34	29.36	17.66	1.33	0.24
水体	46.8	11.28	8.44	1.36	5.63	294.78	18.16	3.27
人造地表	117.8	14.35	14.68	1.08	0.12	8.58	2 154.03	5.76
裸地	23.71	0.85	23.63	0.27	0.01	4.45	10.83	1 046.74

进一步统计各类型的转入转出率,以说明各类型转变的剧烈程度(图 1)。全国形变台站周边有 88%耕地类型保持不变;约 12%的耕地转出为人造地表、森林、草地和水体类型;但只有 6%的其他类

型转入为耕地,其转出率明显大于转入率。91%的森林类型保持不变,主要是与耕地、草地和少量灌木类型的转换。灌木和湿地类型转入转出率较为剧烈,有 37%的灌木类型转为森林、耕地和草地类型,

其转入来源也主要是草地、森林和耕地类型,外部转入占到了最终灌木面积的 65%左右。有超过 50% 的湿地转为了水体、草地和耕地类型,但只有 38% 的上述类型转入湿地类型,因此湿地类型虽总面积占比不大,但其转入转出率最为剧烈。

3.2 2000—2010 年形变台站周边用地类型空间变化特征

考虑到我国大陆区域地球动力学环境和区域地震活动性时空强上的关联性,早在“九五”时期,我国大陆地区便被划分为东北、华北、华南、新疆、青藏高原等 5 个一级地震区^[28]。由于各地震区内台站数

量不一,因此分别统计各地震区形变台站周边土地覆盖类型面积均值在 10 年间的变化情况(图 2)。

除新疆、东北地震区外,各区耕地和人造地表类型均呈现“此增彼降”的情况,其中华北地震区耕地面积减少最大,平均每台站周边 5 km 范围内减少 2.64 km²;而人造地表类型增长最大,平均为 3.4 km²,华南地震区变化幅度次之。新疆地震区人造地表和耕地类型面积均略有增长,类型变化集中在草地和裸地两类;草地面积平均减少 5.9 km²,而裸地面积平均增加 5.2 km²。东北地震区草地和人造地表类型的变化与其他四区相反,草地类型面积增

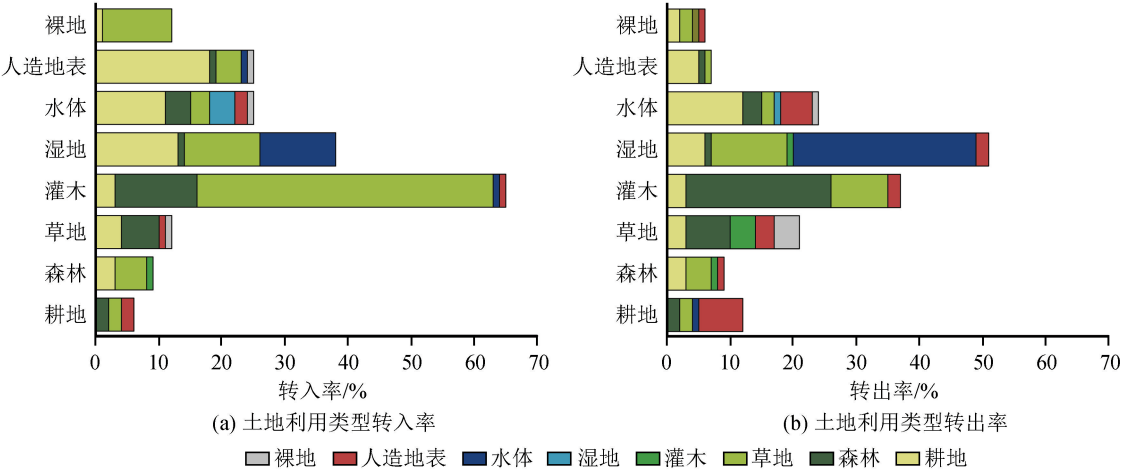
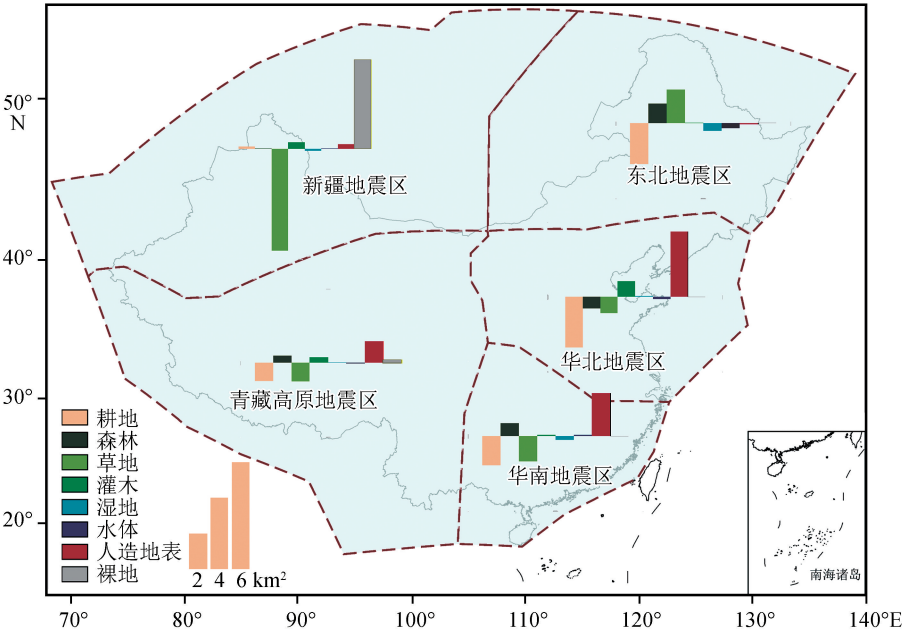


图 1 2000—2010 年研究区内土地覆盖类型转入转出率
Fig.1 Transfer rate of land cover type in the study area from 2000 to 2010



行政界线数据来自国家基础地理信息中心 1 : 100 万全国基础地理数据库(2017 版)

图 2 2000—2010 年全国大陆地震分区各土地覆盖类变化
Fig.2 Land cover changes among 5 seismic zones in 2000 and 2010

长了 17.9%，而人造地表稍有减少，面积变化率为 -0.4%。

由于影响区域土地覆盖类型时空变化的驱动因素既包括地形、气候等自然因素，也包括社会经济发展、政策引导等人为因素。研究区内，华北、华南地区经济发展水平高，人造地表的面积增长得较多；东北地区由于经济水平负增长原因，人造地表面积还稍有减少；而新疆地区由于荒漠化比较严重，草地面积降低，裸地面积增长。

3.3 2001—2018 年全国形变台站周边用地时间变化趋势

本文利用 Google Earth Engine 平台提供的 MODIS-MCD12Q1 数据集对上述台站周边 5 km 内的土地覆盖类型进行年序变化调查。首先根据 2.2 节的数据一致性比较方法，利用 GlobeLand30-2010 对该产品的一致性精度进行检验。

图 3 统计了 2010 年 MODIS 产品和 GlobeLand30-2010 产品在每个台站统计区不同类型上的平均面积及类型一致性。从统计结果可知，两种产品在灌木、湿地、裸地类型的面积总数差异不大，面积差异率相差不到 1%。而林地、草地、水体、人造地表的面积总数稍有差异，但类别一致性均在 90% 以上，可认为总体一致；耕地类别面积差异最大，达到 10 km²，占总面积的 12.4%。这可能是因为两种产品对耕地类型的定义差异较大造成的。GlobeLand30 产品对耕地定义遵循联合国 FAO 标准，不仅包括常规农作物，也包括牧草种植地、果树、茶园、咖啡园等灌木类经济作物^[29]，比遵循 IGBP 标准的

MODIS 产品耕地包含范围大。总体来说，两类产品存在差异，但保持了总体上的一致性。

利用年度 MODIS 土地覆盖分类数据可以得到 2001—2018 年所有台站周边 5 km 范围内的平均土地覆盖类型的逐年变化信息，见图 4 和图 5。除草地和裸地类型外，其他类型的年度变化趋势与 GlobeLand30 保持基本一致。森林面积在 2004 年以前略有降低，之后在波动中缓慢升高，这与我国森林面积缓慢净增长的整体趋势^[8]一致。耕地面积整体呈萎缩趋势，尤其可以看到 2005—2016 年间，耕地面积减少幅度增大，说明这一形势在近 10 年中是加剧的，也符合现有区域性耕地研究^[29-30]。人造地表类型的变化则是逐年增加，过去近 20 年内其增长速度基本保持不变，说明全国范围内建设用地的扩张在持续的、稳定的进行。此外，灌木类型和湿地类型在

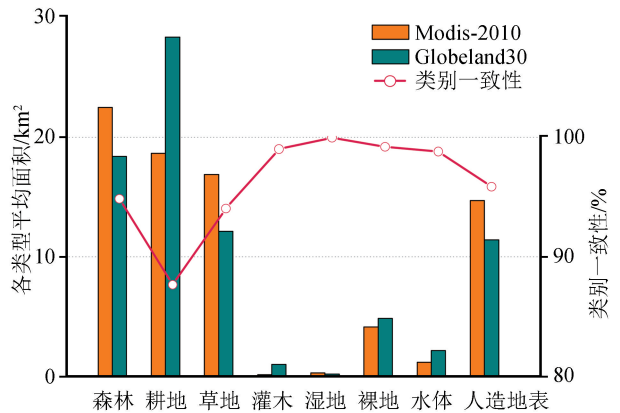


图 3 MODIS-2010 与 GlobeLand30-2010 的一致性检验

Fig.3 Consistency test of MODIS-2010 and GlobeLand30-2010

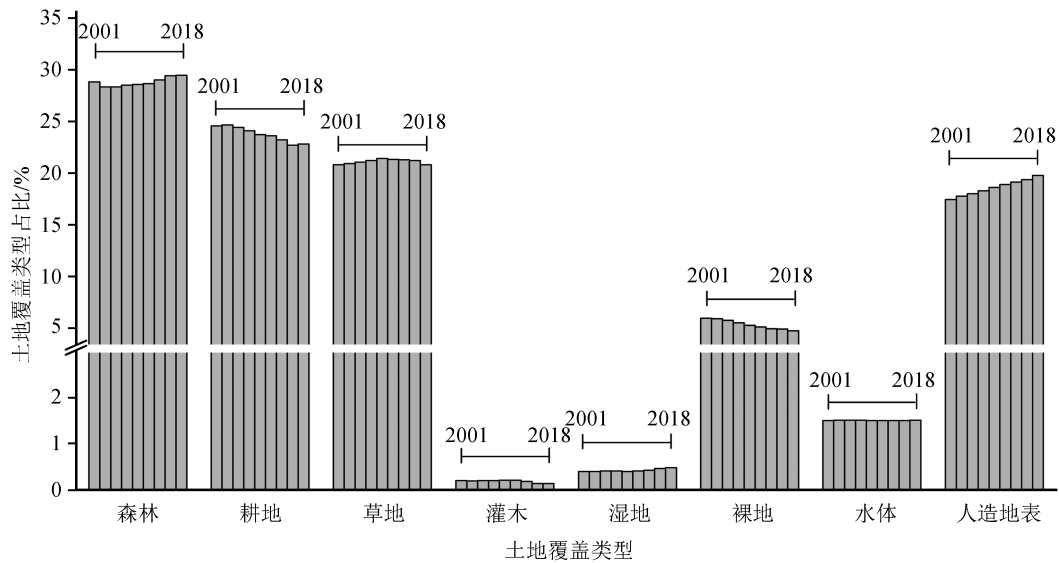
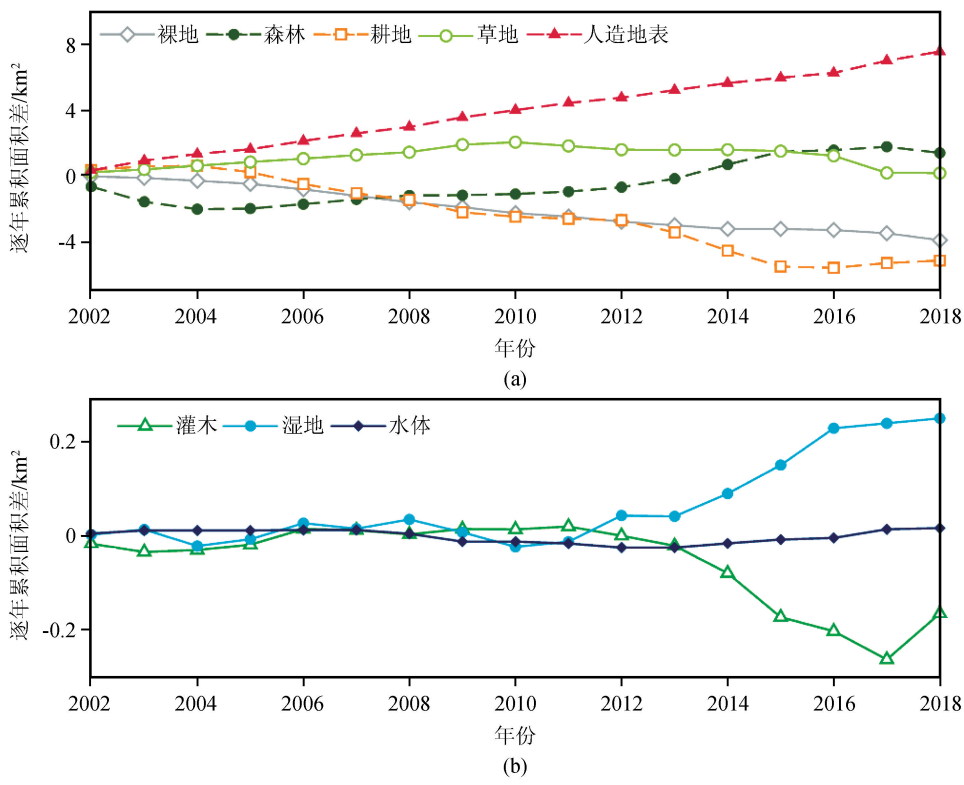


图 4 2001—2018 台站周边土地覆盖类型面积变化

Fig.4 Changes of land cover area around deformation stations from 2001—2018



(纵轴数值表示横轴年份与 2001 年的对应类型面积差)

图 5 2002—2018 年台站周边土地覆盖逐年面积累积差

Fig.5 The accumulated difference of land cover around stations year by year from 2002 to 2018

2001—2010 和 2010—2018 两个阶段的变化差异性较大,分别为“前增后降”和“前降后增”。但由于该类型在台站周边土地覆盖中占比较小,因此总量差异不大。草地与裸地类型与 GlobeLand30 产品对应类型变化趋势不一致,这可能是两种产品本身分类标准和分类精度的不一致造成的。

3.4 土地类型转化对台站观测数据质量影响分析

为探究台站周边环境变化对仪器观测数据质量的影响,本文以台网垂直摆倾斜仪为例,对比分析文献[23]中计算的 2016 年全台网该仪器背景噪声 SNM,以及台站周边 5 km 内 2016 年全年土地覆盖变化总量的关系(图 6)。可以看到 57%的低水平噪声($SNM<0.1$)台站周边全年土地覆盖类型的变化在 1 km^2 以内;而对于高水平噪声($SNM>1.5$)的台站,土地覆盖类型的变化在 1 km^2 以内的仅有 25%,变化大于 5 km^2 的台站达到 33%。噪声水平介于 $0.1\sim1.5$ 之间的台站数量最多^[23],这些台站中有 40%周边土地类型变化在 1 km^2 以内,另外 37%的台站周边土地类型变化为 $1\sim3\text{ km}^2$,剩余 33%的台站周边土地类型变化超过 3 km^2 。从统计结果可见,垂直摆倾斜仪背景噪声与周边环境变化相关,但变化强度不足以达到显著正相关。周边环境稳定

(年变化在 1 km^2)的台站较大概率背景噪声较低。由以往研究可知,形变仪器受气压、海潮、降雨、人为进洞干扰等多方面影响^[25,31-32],地表环境载荷因素仅是影响背景噪声的因素之一。

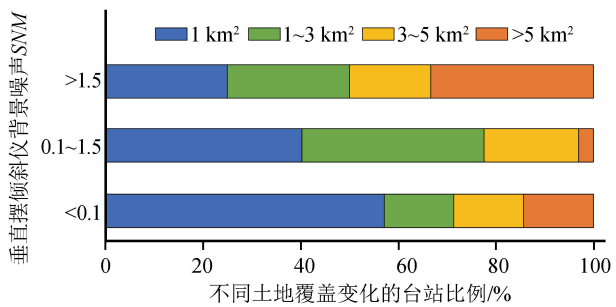


图 6 垂直摆倾斜仪背景噪声与周边土地覆盖变化关系

Fig.6 Relationship between background noise of vertical pendulum tiltmeter and surrounding land cover change

在空间分布上对比 2016 年中国大陆各地震区的平均面积变化和平均噪声水平的关系可见图 7。除华南地震区以外,东北、华北、青藏和新疆地震区内垂直摆倾斜仪的平均噪声水平变化趋势均与台站周边平均土地类型变化趋势一致。华南地震区内台

站平均土地类型变化仅为 1.68 km^2 , 低于华北地震区 (2.04 km^2) 和青藏地震区 (1.89 km^2), 但其内台站平均噪声水平为 0.88, 高于华北地震区的 0.83 和青藏地震区的 0.71。这可能是由于华南地震区内台站/仪器数量较多, 另外较多台站处于临海地区, 除受仪器本身影响以外, 还受到海洋运动的影响, 因此噪声较高。这与沿海地区的部分台站噪声水平较高的已有结论^[23]相符。

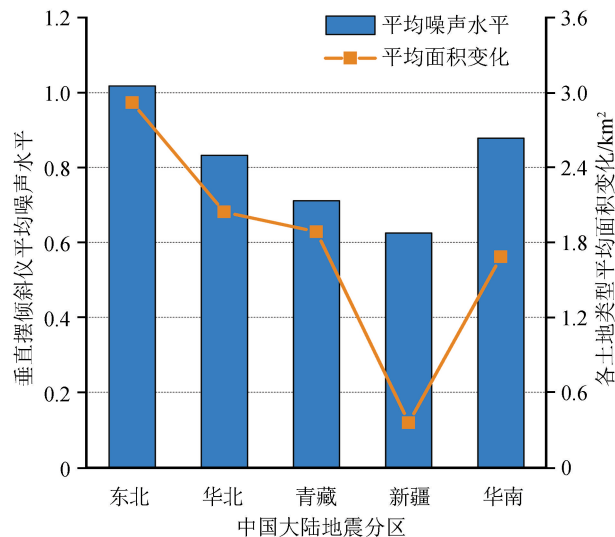


图 7 不同地震分区垂直摆倾斜仪背景噪声与台站周边土地覆盖变化的关系

Fig. 7 Relationship between the background noise of vertical pendulum tiltmeter in different seismic zones and the surrounding land cover changes

理论上, 距离仪器越近的地表活动或载荷变化对仪器观测数据质量产生的影响越大。现有研究对土石开挖、水体变化和仓库载货变化对形变观测干扰进行了定量计算及实地验证, 其选择的干扰源或模型计算大多在仪器周边数百米范围内^[4, 25, 27]。本文受限于土地利用数据精度 (500 m) 和台站位置精度 (0.01° , 定位误差在 $1 \sim 2 \text{ km}$ 左右), 无法进行微地形地貌分析。因此后续工作将尝试选择 30 m 分辨率的土地利用数据, 针对典型台站进行进一步的研究。

4 结论

(1) 我国定点形变台站周边 5 km 范围内土地覆盖类型主要以耕地、森林为主, 其次为草地和人造地表。2000—2010 年期间, 耕地、草地面积不断减少, 分别减少了总量的 2.2% 和 1.6%; 人造地表和森林类型以增长为主, 其中人造地表类型面积增长较

明显, 从总量的 11.8% 增长到 14.5%。

研究区内主要是耕地、人造地表、森林、草地之间的转化。其中耕地转为人造地表的面积最大, 其次是草地和森林之间的相互转化, 但总体来说森林的总量略有增加。这与中国陆地区域土地覆盖时空格局变化是一致的。

(2) 各地震区内台站周边土地覆盖类型变化格局不同。华北地震区台站周边耕地面积平均减少 2.64 km^2 , 而人造地表类型增长剧烈, 高达 3.4 km^2 ; 华南地震区变化幅度次之, 耕地的减少和人造地表的增加平均在 2 km^2 左右。东北地震区与其他四区土地类型变化趋势不同, 草地面积增长了 17.9%, 而人造地表稍有减少。单比较面积增长最大的人工建筑类可知, 有 67.73% 的台站临近有新增人工建筑, 变化最大的浙江东阳台新增人工建筑面积达 29 km^2 ; 减少量最大的为黑龙江鹤岗台, 10 年内人工建筑减少了 11.47 km^2 。

(3) 利用 MODIS 年序土地覆盖产品研究了研究区内土地覆盖的时间变化趋势。该产品经过与 GlobeLand30 产品的精度检验, 除耕地类别外, 其他类型的面积一致性均在 90% 以上。研究结果表明, 2001—2018 年间, 研究区森林面积在波动中缓慢升高; 耕地面积则持续减少, 尤其在 2005—2016 年间减少幅度增大; 人造地表类型则是逐年持续、稳定的增加。以上结果均与现有区域性研究结果一致。

(4) 2016 年全形变台网垂直摆倾斜仪背景噪声 SNM 与该台站周边全年的土地覆盖变化总量有一定的相关性。57% 的低水平噪声台站周边全年土地覆盖类型的变化在 1 km^2 以内, 而仅有 25% 高水平噪声的台站土地覆盖类型的变化在 1 km^2 以内, 33% 的台站周边环境变化在 5 km^2 以上。此外对比全国不同地震区内的仪器平均噪声水平和平均面积变化可知, 大部分区域两者变化是一致的, 即当年度环境变化较大的台站仪器噪声水平也高, 但华南地震区由于受到海洋运动的影响, 其内台站仪器的噪声水平要高于内陆区域。

致谢: 感谢国家基础地理信息中心提供 GlobeLand30 全球 30 m 土地覆盖数据产品; 感谢中国地震台网中心前兆台网部提供台站资料; 感谢中国地震局形变台网中心赵莹博士提供 2016 年度垂直摆倾斜仪背景噪声数据; 感谢基于 GIS 的分析预报系统 (MapSIS) 提供全国地震分区资料。

参考文献(References)

- [1] 刘海刚,程树岐,王帅合,等.新形势下地震台站观测环境和设施保护浅析[J].防灾减灾学报,2019,35(1):88-92.
LIU Haigang, CHENG Shuqi, WANG Shuaihe, et al. Analysis on the observation environment and facilities protection of seismic stations under new circumstance [J]. Seismological Research of Northeast China, 2019, 35(1): 88-92.
- [2] 申俊,刘敬华,左天惠.浅谈地震台站监测设施和观测环境保护[J].高原地震,2018,30(1):69-72.
SHEN Jun, LIU Jinghua, ZUO Tianhui. Discussion on the protection of facilities in seismic stations and observation environment [J]. Plateau Earthquake Research, 2018, 30(1): 69-72.
- [3] 黄顺英.三起地震台站观测环境保护案例分析[J].高原地震,2018,30(4):49-52.
HUANG Shunying. Analysis on three cases of environmental protection in seismic stations [J]. Plateau Earthquake Research, 2018, 30(4): 49-52.
- [4] 孙伶俐,李明,蒋玲霞,等.湖北省潮汐形变观测异常及干扰识别[J].大地测量与地球动力学,2013,33(增刊1):36-40.
SUN Lingli, LI Ming, JIANG Lingxia, et al. Anomaly recognition of tidal deformation and disturbance factors in Hubei Province [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33 (Suppl): 36-40.
- [5] 孙伶俐,罗俊秋,吕品姬,等.十堰台数字化水管仪倾斜潮汐观测质量评定[J].大地测量与地球动力学,2011,31(增刊1):59-63.
SUN Lingli, LUO Junqiu, LU Pinji, et al. Quality evaluation of tilt tide observation with digital water tube at Shiyan seismostation [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31 (Suppl): 59-63.
- [6] 史凯,蔡艺,吴东,等.南京市地震台站监测设施和观测环境保护的实践与探索[J].防灾减灾学报,2015,31(4):83-88.
SHI Kai, CAI Yi, WU Dong, et al. Discussion and practice of monitoring facilities and observation environment protection in seismic station in Nanjing [J]. Seismological Research of Northeast China, 2015, 31(4): 83-88.
- [7] 贾华,秦波,起卫罗.云南省地震台站观测环境保护典型案例及探讨[J].国际地震动态,2016(5):25-28.
JIA Hua, QIN Bo, QI Weiluo. Typical cases and discussion on seismic station observation environment protection in Yunnan Province [J]. Recent Developments in World Seismology, 2016 (5): 25-28.
- [8] HANSEN M C, POTAPOV P V, MOORE R, et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change [J]. Science, 2013, 342(6160): 846-850.
- [9] RAN Y H, LI X, LU L. Evaluation of four remote sensing based land cover products over China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(2): 391-401.
- [10] SHAO Q, SUN C, LIU J, et al. Impact of urban expansion on meteorological observation data and overestimation to regional air temperature in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(6): 994-1006.
- [11] 刘学锋,江滢,任国玉,等.河北城市化和观测环境改变对地面风速观测资料序列的影响[J].高原气象,2009,28(2):433-439.
LIU Xuefeng, JIANG Ying, REN Guoyu, et al. Effect of urbanization and observation environment change on wind speed trend in Hebei Province, China [J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(2): 433-439.
- [12] 孙敏,汤剑平,许春艳.中国东部地区城市化及土地用途改变对区域温度的影响[J].南京大学学报(自然科学),2011,47(6):679-691.
SUN Min, TANG Jianping, XU Chunyan. Impact of urbanization and land-use change on regional temperature in eastern China [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2011, 47(6): 679-691.
- [13] 陈军,陈晋,廖安平,等.全球30 m地表覆盖遥感制图的总体技术[J].测绘学报,2014,43(6):551-557.
CHEN Jun, CHEN Jin, LIAO Anping, et al. Concepts and key techniques for 30 m global land cover mapping [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(6): 551-557.
- [14] 陈军,廖安平,陈晋,等.全球30 m地表覆盖遥感数据产品—GlobeLand30 [J].地理信息世界,2017,24(1):1-8.
CHEN Jun, LIAO Anping, CHEN Jin, et al. 30-Meter global land cover data Product—GlobeLand30 [J]. Geomatics World, 2017, 24(1): 1-8.
- [15] HEROLD M, MAYAUX P, WOODCOCK C E, et al. Some challenges in global land cover mapping: an assessment of agreement and accuracy in existing 1 km datasets [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2538-2556.
- [16] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, et al. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.
- [17] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等.2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J].地理学报,2018,73(5):789-802.
LIU Jiyuan, NING Jia, KUANG Wenhui, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 789-802.
- [18] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].地理科学进展,1999,18(1):81-89.
WANG Xiulan, BAO Yuhai. Study on the methods of land use dynamic change research [J]. Progress in Geography, 1999, 18 (1): 81-89.
- [19] 刘瑞,朱道林.基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J].资源科学,2010,32(8):1544-1550.
LIU Rui, ZHU Daolin. Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix [J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1544-1550.
- [20] GIRI C, ZHU Z L, REED B. A comparative analysis of the

- global land cover 2000 and MODIS land cover data sets[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(1): 123-132.
- [21] ANTONIO Di Gregorio, LOUISA J M Jansen. Land cover classification system (LCCS): Classification concepts and user manual[Z]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2000.
- [22] 冉有华, 李新, 卢玲. 基于多源数据融合方法的中国 1 km 土地覆盖分类制图[J]. 地球科学进展, 2009, 24(2): 192-203.
- RAN Youhua, LI Xin, LU Ling. China land cover classification at 1 km spatial resolution based on a multi-source data fusion approach[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(2): 192-203.
- [23] 赵莹. 全台网垂直摆倾斜仪背景噪声水平分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(8): 869-874.
- ZHAO Ying. Research on background noise level of vertical pendulum tiltmeter in China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(8): 869-874.
- [24] 吕琳, 孙伶俐, 蒋玲霞, 等. 武汉及周边地区数字化形变观测资料质量分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(2): 97-102.
- Lǚ Lin, SUN Lingli, JIANG Lingxia, et al. Analysis of deformation observation data change characteristics in Wuhan and its surrounding area[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2019, 40(2): 97-102.
- [25] 尹晶飞, 苏小芸, 张震峰, 等. 浙江省地倾斜观测常见干扰浅析[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(3): 60-66.
- YIN Jingfei, SU Xiaoyun, ZHANG Zhenfeng, et al. The analysis of usual interference in observation of crustal deformation in Zhejiang Province[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2016, 37(3): 60-66.
- [26] 龚丽文, 邓志辉, 陈丽娟, 等. 基于台址构造环境的有限元建模分析——以黔江台为例[J]. 地震学报, 2019, 41(1): 80-91.
- GONG Liwen, DENG Zhihui, CHEN Lijuan, et al. Analyses of finite element model based on station's tectonic environment: taking Qianjiang station for example[J]. Acta Seismologica Sinica, 2019, 41(1): 80-91.
- [27] 邱泽华. 倾斜观测载荷干扰源最小“安静”距离理论分析[J]. 地震, 2004, 24(4): 80-86.
- QIU Zehua. Theoretical study on the least “Quiet” distance between a borehole tilt observatory site and surficial mechanical disturbance sources[J]. Earthquake, 2004, 24(4): 80-86.
- [28] 陆远忠, 李胜乐, 邓志辉, 等. 基于 GIS 的地震分析预报系统[M]. 成都: 成都地图出版社, 2002.
- [29] 胡琼, 吴文斌, 项铭涛, 等. 全球耕地利用格局时空变化分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(6): 1091-1105.
- HU Qiong, WU Wenbin, XIANG Mingtao, et al. Spatio-temporal changes in global cultivated land over 2000—2010[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(6): 1091-1105.
- [30] 陈迪, 吴文斌, 周清波, 等. 亚洲耕地利用格局十年变化特征研究[J]. 中国农业科学, 2018, 51(6): 1106-1120.
- CHEN Di, WU Wenbin, ZHOU Qingbo, et al. Changes of cultivated land utilization pattern in asia from 2000 to 2010[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(6): 1106-1120.
- [31] 邢喜民, 张涛. 分段回归在剔除精河、库尔勒水平摆气象因素影响的探索[J]. 地震工程学报, 2015(2): 623-628.
- XING Ximin, ZHANG Tao. Subsection regression method for removing meteorological factors in the Jinghe, Korla horizontal pendulum[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015(2): 623-628.
- [32] 袁曲, 许裕之, 吕品姬, 等. 宜昌台三类地倾斜仪观测数据的对比研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(6): 1536-1544.
- YUAN Qu, XU Yuzhi, Lǚ Pinji, et al. A comparative study of the observation data from three kinds of ground tiltmeter at Yichang station, China [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1536-1544.