

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.109>



基于遥感解译的盐湖地区输电线路杆塔地面沉降易发性评价

金必晶¹, 殷坤龙¹, 桂 蕾^{1*}, 赵斌滨^{1,2}, 郭宝瑞¹, 曾韬睿¹

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100080

摘要: 跨越察尔汗盐湖地区的750 kV柴鱼输电线路是国家西部能源运输通道上重要的一环, 受盐湖地区特殊的地质环境与人类活动影响, 使得部分杆塔塔基发生不均匀沉降, 严重威胁到输电线路的安全运行。针对盐湖地区目前存在的杆塔地基变形破坏问题, 利用小基线集合成孔径雷达干涉测量(SBAS-InSAR)技术对杆塔基础变形失稳前2018年的Sentinel-1A数据开展遥感解译, 获取了盐湖地区地面沉降分布情况。基于频率比法, 筛选出与地面沉降相关性较强的8种评价因子构建盐湖地区地面沉降易发性评价指标体系, 采用多层感知器神经网络(MLPNN)、逻辑回归(LR)、贝叶斯网络(BN), 对比分析了盐湖地区地面沉降的易发性评价效果和精度。评价结果表明, MLPNN、LR、BN的评价精度均较高, 分别为0.85、0.84、0.82。这表明, 通过遥感解译获得地面沉降样本数据与机器学习相结合的方法是盐湖地区输电线路杆塔地面沉降易发性评价的有效手段; 同时, 评价结果可为输电线路杆塔监测、运行管理及新塔选址提供参考。

关键词: 盐湖地区; 杆塔地基变形破坏; 遥感; 频率比; 机器学习。

中图分类号: P627

文章编号: 1000-2383(2024)02-538-12

收稿日期: 2022-11-25

Susceptibility Assessment of Land Subsidence of Transmission Line Towers in the Salt Lake Area Based on Remote Sensing Interpretation

Jin Bijing¹, Yin Kunlong¹, Gui Lei^{1*}, Zhao Binbin^{1,2}, Guo Baorui¹, Zeng Taorui¹

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. China Electric Power Research Institute, State Grid Corporation of China, Beijing 100192, China

Abstract: The 750 kV Chaiyu transmission line across the Qarhan Salt Lake area is an important part of the energy transportation channel in the western part of the country. Affected by the special geological environment and human activities in the salt lake area, some tower foundations have uneven settlement, which seriously threatens the safe operation of the transmission line. Aiming at the problem of deformation and failure of tower foundation in salt lake area, small baseline integrated aperture radar interferometry (SBAS-InSAR) technology was used to carry out remote sensing interpretation of Sentinel 1A data in 2018 before the deformation and instability of tower foundation, and the distribution of ground subsidence in salt lake area was obtained. Based on

基金项目: 国家电网公司总部管理科技项目(No. 52280721000A), 合同编号: SGQHDKY0SBJS2100034。

作者简介: 金必晶(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事环境地质灾害风险评价与管理方面研究工作。ORCID: 0000-0002-3397-7534. E-mail: begin@cug.edu.cn

* 通讯作者: 桂蕾, E-mail: lei.gui@cug.edu.cn

引用格式: 金必晶, 殷坤龙, 桂蕾, 赵斌滨, 郭宝瑞, 曾韬睿, 2024. 基于遥感解译的盐湖地区输电线路杆塔地面沉降易发性评价. 地球科学, 49(2): 538—549.

Citation: Jin Bijing, Yin Kunlong, Gui Lei, Zhao Binbin, Guo Baorui, Zeng Taorui, 2024. Susceptibility Assessment of Land Subsidence of Transmission Line Towers in the Salt Lake Area Based on Remote Sensing Interpretation. *Earth Science*, 49(2): 538—549.

the frequency ratio method, eight evaluation factors with strong correlation with land subsidence were selected to construct the evaluation index system of land subsidence susceptibility in the salt lake region. The multi-layer perceptron neural network (MLPNN), logical regression(LR) and Bayesian network(BN) were used to compare and analyze the evaluation effect and accuracy of land subsidence susceptibility in the salt lake region. The evaluation results show that the evaluation accuracy of MLPNN, LR and BN is high, which are 0.85, 0.84 and 0.82, respectively. This shows that the method of combining the sample data of land subsidence obtained by remote sensing interpretation with machine learning is an effective means for evaluating the susceptibility of ground subsidence of transmission line towers in the salt lake region. At the same time, the evaluation results can provide reference for transmission line tower monitoring, operation management and new tower location.

Key words: salt lake region; deformation and failure of tower foundation; remote sensing; frequency ratio; machine learning.

0 引言

随着国家电网“五纵五横”输电工程建设的推进,输电线路跨越距离长,地质环境复杂,杆塔的安全稳定运行面临极大挑战。地面沉降是我国常见的地质灾害灾种之一,它是由各种自然和人为因素引起的地表随时间变化的下降变形(王智济,1986;晏同珍,1989),可造成影响区输电杆塔、道路、管道以及建筑物不同程度的破坏(Holzer and Galloway, 2005)。青海省察尔汗盐湖地区,受盐田开采和极端降雨气候影响,地面沉降广泛发育,影响大(罗友弟,2010;宁展望,2014),尤其对输电杆塔稳定性造成了严重威胁(魏占元,2007;祁兆鑫等,2021)。因此,开展盐湖地区地面沉降灾害易发性评价对保障输电线路安全具有重要意义。

传统的地面沉降数据获取主要以水准测量、GPS测量等为主(Fergason *et al.*, 2015),其时耗长、成本高不利于开展大范围的长期监测。而随着合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术的发展,它已成为一种快捷有效的地面沉降监测手段(Moreira *et al.*, 2013),并得以广泛应用。例如,Zhang(Zhang *et al.*, 2018)利用InSAR技术获得了郑州市2014—2016年地面沉降的分布情况;许强(2021)通过SBAS-InSAR技术对延安新区地面沉降的空间演化进行了分析;Xiang *et al.*(2022)利用SBAS-InSAR技术对察尔汗盐湖地区地面沉降的分布进行了研究,揭示了盐湖地区盐渍土对地面变形的影响;祝昕刚和明生(2021)利用时序InSAR技术获得了广州市从化区高压输电线路区域附近的地表变形情况,提出了地面变形的影响因素,对输电线路灾害防控具有一定的指导意义。虽然遥感解译可以获取区域地面沉降的时空变形差异(Shi *et al.*, 2020),但受解译点密度和精度控制,成果难以直接用于输电线路杆塔点地面沉降成因分析、线路稳定性管控和新修输电杆塔

选址规划(Du *et al.*, 2021;高霞霞等,2021)。因此,盐湖地区需将地面沉降遥感解译成果与影响沉降的地质环境因子结合,开展地面沉降易发性评价,以此来实现地面沉降多发区的输电线路杆塔稳定性监测与管控。

在地面沉降易发性评价方面,已有学者通过将遥感解译与机器学习相结合的手段来获得地面沉降易发性结果。例如,Bianchini *et al.*(2019)利用多时序InSAR获得地面沉降数据后,采用频率比(FR)和模糊逻辑(FL)两种并行方法,评估和测绘意大利托斯卡纳地区的地面沉降易发性;Hakim *et al.*(2020)在通过时序InSAR获得雅加达地面沉降的数据后利用逻辑回归(LR)、多层感知器神经网络、AdaBoost算法与LogitBoost算法对雅加达地区地面沉降进行评价发现,各个机器学习算法性能均较优;Fadhillah *et al.*(2020)利用InSAR技术获得韩国首尔地区的地面沉降数据后,利用Bagging、逻辑回归(LR)和Multiclass Classifier三种集成机器学习模型,分析了韩国首尔地区地面沉降易发性的结果及主要地铁线路的易发性等级。

通过上述研究可以发现,采用遥感解译获得地面沉降样本数据与机器学习相结合的手段是一种简便快捷的地面沉降易发性评价方法。鉴于盐湖地区输电线路长、跨度大,隐患点不易察觉的特点;加之目前国内外对盐湖地区由于地面沉降所引发的输电线路杆塔变形破坏易发性研究较少。因此,本文针对盐湖地区近年来由于矿物盐的开采及自然因素所导致盐渍土地基沉降所引发的杆塔变形破坏问题,以青海省察尔汗盐湖区为例,针对该线路杆塔变形破坏最为强烈的2018年卫星数据对输电线路左右各5 km研究区范围开展遥感解译,并结合输电线路相关规范,获得盐湖地区地面沉降灾害点数据。通过分析引起该区地面沉降的关键影响因素,构建地面沉降易发性评价指标体系。采用多层

感知器神经网络模型 (MLPNN)、逻辑回归模型 (LR)、贝叶斯网络模型 (BN) 3 种分析模型展开盐湖地区易发性评价结果对比验证, 确定了最优评价模型, 获得了盐湖地区输电线路沿线地面沉降灾害易发性分区图。研究成果对指导该线路杆塔地面沉降监测、防护和新修杆塔选址具有重要的参考价值。

1 模型原理介绍

1.1 SBAS-InSAR 技术

输电线路地处西北内陆盐渍土地区, 其地表裸露, 植被覆盖率较低。因此相对于植被覆盖度较高的地区, 利用合成孔径雷达 (InSAR) 技术开展地面永久散射体监测效果更好, 但考虑到数据源的大气效应与研究区气候特点, 选取稳定性好、准确性高的小基线集合成孔径雷达干涉测量 (SBAS-InSAR) 技术对研究区地面沉降进行监测 (Chen *et al.*, 2018)。其主要技术原理如下: 假定在时间 t_1, t_2, \dots, t_n 内获得同一区域 N 幅 SAR 影像, 并任意选择一幅影像作为主影像进行配准。根据干涉组合条件, 在短基线距的条件下形成 M 幅干涉条纹图, 且有 M 满足:

$$\frac{N}{2} \leq M \leq \frac{N(N-1)}{2}. \quad (1)$$

对于任意干涉图 α , 在去除平地及地形相位影响后, 第 x 个像素的干涉相位可表示为:

$$\begin{aligned} \delta\varphi_{x,\alpha} = & \\ & \varphi_{x,\alpha}(t_B) - \varphi_{x,\alpha}(t_A) \approx \delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{def}} + \delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{topo}} + \\ & \delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{atm}} + \delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{noise}}, \end{aligned} \quad (2)$$

假设在时间 t_A 和 t_B ($t_B > t_A$) 为 α ($\alpha = 1, 2, \dots, M$) 干涉图对应的 SAR 影像获取时间; $\delta\varphi_{x,\alpha}$ 为某一像素点处的干涉相位, $\varphi_{x,\alpha}(t_A)$ 和 $\varphi_{x,\alpha}(t_B)$ 分别是像素点在 t_A 和 t_B 时刻对应于 t_0 时刻的相位, $\delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{def}}$ 为 $t_A \sim t_B$ 时刻之间视线向的形变相位 $\delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{topo}}$ 为地形相位误差, $\delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{atm}}$ 为大气相位误差, $\delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{noise}}$ 为噪声引起的相位误差。其中, $\delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{def}}$ 、 $\delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{topo}}$ 、 $\delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{atm}}$ 可进一步表示为:

$$\delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{def}} = \frac{4\pi}{\lambda} [d_{x,\alpha}(t_B) - d_{x,\alpha}(t_A)], \quad (3)$$

$$\delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{topo}} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B \perp_{x,\alpha} \Delta h}{R \sin \theta}, \quad (4)$$

$$\delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{atm}} = \delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{atm}}(t_B) - \delta\varphi_{x,\alpha}^{\text{atm}}(t_A), \quad (5)$$

式中: λ 为雷达波长; R 为斜距; $B \perp$ 为垂直基线; Δh 为 DEM 高程差; θ 为入射角。

对 M 幅干涉条纹图进行三维时空相位解缠即可求出不同 SAR 获取时间的形变速率 (d_{LOS}), 而研究区输电杆塔的地面变形主要以垂直方向为主。因此, 在对研究区地面沉降的变形分析时忽略水平方向的位移, 利用局部入射角将雷达视线方向转为垂直方向, 以此获得研究地面沉降 (d_v) 的数据 (许强等, 2021)。

$$d_v = \frac{d_{\text{LOS}}}{\cos \theta}. \quad (6)$$

1.2 多层感知器神经网络模型

多层感知器神经网络模型 (MLPNN) 是一个前向型的层状结构, 其主要由输入层、输出层和隐藏层组成 (Buscema, 2002)。通常情况下, 输入的样本数据分为训练样本、测试样本、验证样本。训练样本用来训练神经网络、估计神经网络参数; 测试样本用来防止过度训练; 验证样本用来独立评估最终的神经网络。多层感知器网络模型通过训练学习把输入数据映射到输出上, 进而形成多层感知器的神经网络模型。最终神经网络会根据输入的样本数据, 设置的参数建立最合适的拟合模型, 以确保此模型能应用于其它同类数据中。在模型中将第一层隐藏层设置 28 个神经元节点, 第二层隐藏层设置 20 个神经元节点并训练后得到所需的多层感知器模型。

1.3 逻辑回归模型

逻辑回归模型 (LR) 是研究二分类因变量常用的多元统计分析方法 (张钟远等, 2022); 常常被视作在寻找描述一个因变量和几个自变量之间相关性最好的模型之一 (Hakim *et al.*, 2020)。其公式如下:

$$f(x) = \text{logit}(p) = \ln \left(\frac{p}{1-p} \right) = c_0 + c_1 x_1 + c_n x_n, \quad (7)$$

$$p = \frac{1}{1 + e^{-f(x)}} + \frac{1}{1 + e^{-(c_0 + c_1 x_1 + \dots + c_n x_n)}}. \quad (8)$$

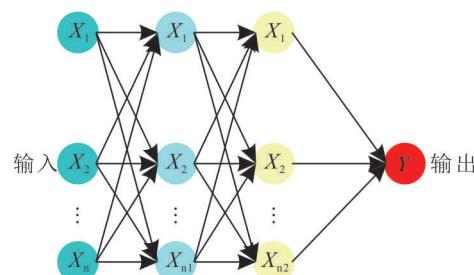


图 1 多层神经网络结构

Fig.1 Multilayer neural network structure

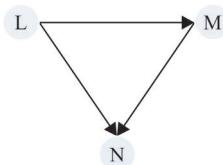


图2 简单的贝叶斯网络结构

Fig.2 Simple Bayesian network structure

$f(x)$ 是一个线性组合函数 $\text{logit}(p)$, p 是发生沉降的概率, $1-p$ 是不发生沉降的概率, $x_1, x_2 \dots x_n$ 是输入变量, c_0 是模型截距, c_1, \dots, c_n 是回归的近似系数.

1.4 贝叶斯网络模型

贝叶斯网络模型(BN)是由条件概率与有向无环图组成的一个有向无循环网络;网络的结构和网络参数可以从数据中训练获得. 其计算公式如下:

$$P(L, M, N) = P(L) * P(M|L) * P(N|L, M), \quad (9)$$

$P(L)$ 是先验概率, 即没有父节点的条件概率, $P(M|L)$ 是条件概率, 即 M 在 L 个条件下的发生概率, $P(N|L, M)$ 是条件概率, 即 N 在 L 和 M 个条件下的发生概率(Han *et al.*, 2019). 其模型结构如图2, 其中节点 L 是子节点 M 和 N 的父节点, 节点 M 是子节点 N 的父节点, 两个节点之间的箭头表示边.

1.5 频率比模型

利用频率比法来对地面沉降评价因子进行空间相关性分析, 找出各因子与地面沉降发生情况之间的相关性并提高因子分级的准确性(郭子正, 2019; Hakim *et al.*, 2020; 黄发明等, 2020; 李文彬等, 2021).

$$\text{频率比} = \frac{\text{地面沉降面积比}}{\text{分类面积比}}. \quad (10)$$

2 研究区概况及数据准备

2.1 研究区概况

研究区 750 kV 输电线路起于大柴旦委员会附近, 沿 215 国道途经察尔汗盐湖并在察尔汗车站附近跨过 215 国道和青藏铁路, 逐渐转向金属镁大道至 750 kV 柴达木变电站, 总长约 170 km. 线路沿南北向穿越了整个察尔汗盐湖区, 其中位于盐湖区域的线路长度约占总线路的 50% (图 3). 由于研究区输电线路地处柴达木盆地, 受喜马拉雅山、唐古拉山和昆仑山脉的影响, 西南暖湿气流难以进入, 降水量稀少, 其河流水源补给大多来自于季节性的高山融雪水, 季节性的水位变化易对盐渍土的稳定性

产生影响, 造成土体应力的改变. 研究区主要以第四系的化学沉积物、风沉积物及冲积物为主. 其中, 中部盐湖地区由于地势相对低洼, 在长期的地地质作用下形成了以盐渍土为主的化学沉积物, 在外界影响因素作用下极易发生盐渍土地基的溶陷变形, 加之强烈的矿物盐开采严重威胁到该地区输电线路的安全稳定运行; 根据前期现场踏勘结果显示, 输电线路中变形最为严重的 107~110 号杆塔正位于中部盐湖地区.

2.2 数据来源

研究区采用 40 m × 40 m 分辨率的栅格作为基本评价单元, 数据源主要包括:(1)全国地质资料馆下载的研究区 1:5 万地形图、1:25 万地质图;(2)研究区输电线路勘察资料;(3)国家青藏高原科学数据中心土地利用总体规划图;(4)ASF 官网 Sentinel-1A 数据及其精密轨道文件.

2.3 遥感解译及地面沉降点数据准备

研究区输电线路杆塔变形破坏主要发生在 107~110 号杆塔之间如图 4b, 其中图 4c 展示了 107 号塔的变形情况. 因此, 选取该线路杆塔变形破坏最为显著的 2018 年降轨 Sentinel-1A 数据基于 SBAS-InSAR 技术开展研究区地面变形遥感解译. 结果显示, 研究区变形主要集中于中部盐湖地区如图 4a. 遥感解译对于相干性较弱的物体如:水体、植被等解译效果较差, 因此利用克里金插值法对研究区遥感解译结果进一步插值处理(Hakim *et al.*, 2020), 得到图 4d 的全区地面沉降变形分布图, 以作为地面沉降易发性评价的灾害点数据. 根据《750 kV 架空送电线路施工及验收规范》中允许基础顶面间高差为 5 mm 及研究区 2018 年的解译数据, 故将遥感解译所得研究区沉降速率点小于 -5 mm/a 的沉降点设置为 1, 大于 -5 mm/a 的非沉降点设置为 0, 并在非沉降点中随机选取与沉降点相同数目的点数组成建模所需的样本数据. 随后将地面沉降数据随机的分为两部分, 其中 70% 的地面沉降数据用于模型训练, 剩余 30% 的数据用于验证模型的性能.

3 评价因子分析

盐湖地区广泛分布着盐渍土, 盐渍土易受外界条件影响发生溶陷与盐胀(祁兆鑫等, 2021). 因此, 盐湖地区地面沉降变形不仅要考虑其基础地质条件的控制作用, 如地形地貌、基础地质条件; 还应考

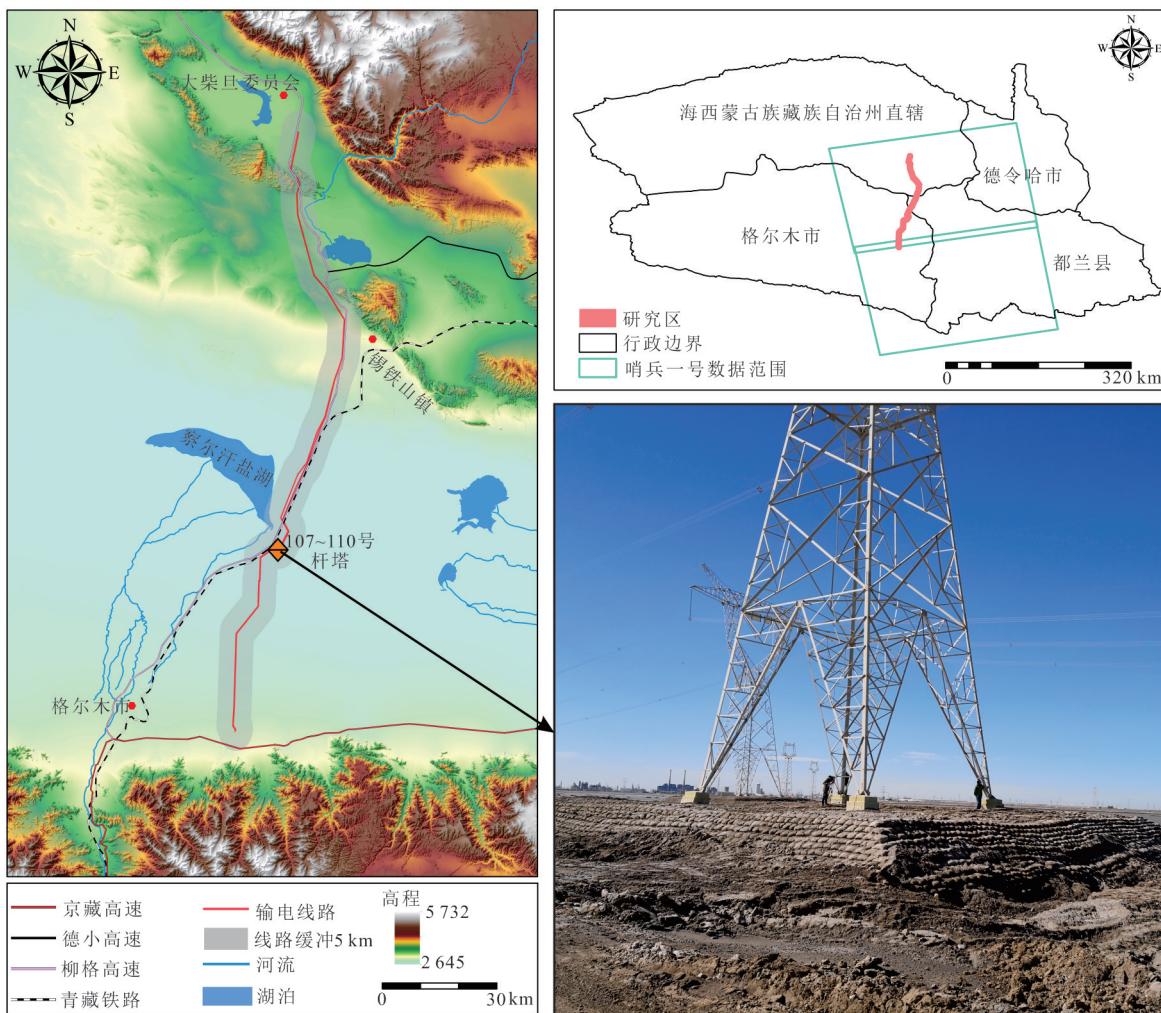


图3 研究区位置及地理概况
Fig.3 Location and geography of the study area

虑外界因素的影响,如水文环境、人类工程活动。通过文献调研(宁展望,2014;祁兆鑫等,2021)结合研究区输电线路沿线地面沉降点野外地质环境及诱发因素调查分析,确定研究区地面沉降易发性评价指标体系及说明如表1所示。

3.1 地形地貌因子

地面沉降在不同的地形地貌条件下的发育特点与规模不同(Mohammady *et al.*, 2019),研究区地形地貌因子选择坡度、剖面曲率、平面曲率3项。坡度对地表水径流、地下水补给和排泄、物质搬运与堆积、堆积体的厚度和松散度等均有重要影响。根据研究区遥感解译结果地面沉降点分布情况,利用FR将研究区的坡度进行重分类为3级,分别为 $0\sim5^\circ$ 、 $5\sim20^\circ$ 、 $>20^\circ$,为如图5a,其中坡度为 $0\sim5^\circ$ 的FR值最高为:1.098.剖面曲率可以描述地形的复杂度(He *et al.*, 2012)。研究区跨越大,范围广,地形上

表现出高—低—高的形式。利用FR值将研究区的剖面曲率重分类为4类,分别为 <-0.2 、 $-0.2\sim0$ 、 $0\sim0.2$ 、 >0.2 如图5b。如表2,剖面曲率为 $-0.2\sim0$ 的FR值最高为:1.049.平面曲率描述的是地形在水平方向的特征,在数值上等于某栅格处坡向在坡度上的变化(Atkinson *et al.*, 2011;黄发明等, 2020)。利用FR将研究区的平面曲率重分类为4级,分别是 <-1 、 $-1\sim0.01$ 、 $0.01\sim0.02$ 、 >0.02 如图5c。如表2,平面曲率为 $-1\sim0.01$ 的FR值最高为:1.061。

3.2 基础地质因子

研究区地层岩性是各类地质灾害发育的物质基础,对地面沉降发育具有基础性的控制作用。研究区主要出露的地层为新—古近系的干柴沟组,第四系的七个泉组,以及上新统的油砂山组及狮子沟组。由于研究区内第四系沉积物广泛分布,主要以化学沉积的盐渍土为主。根据输电线路杆塔地面沉

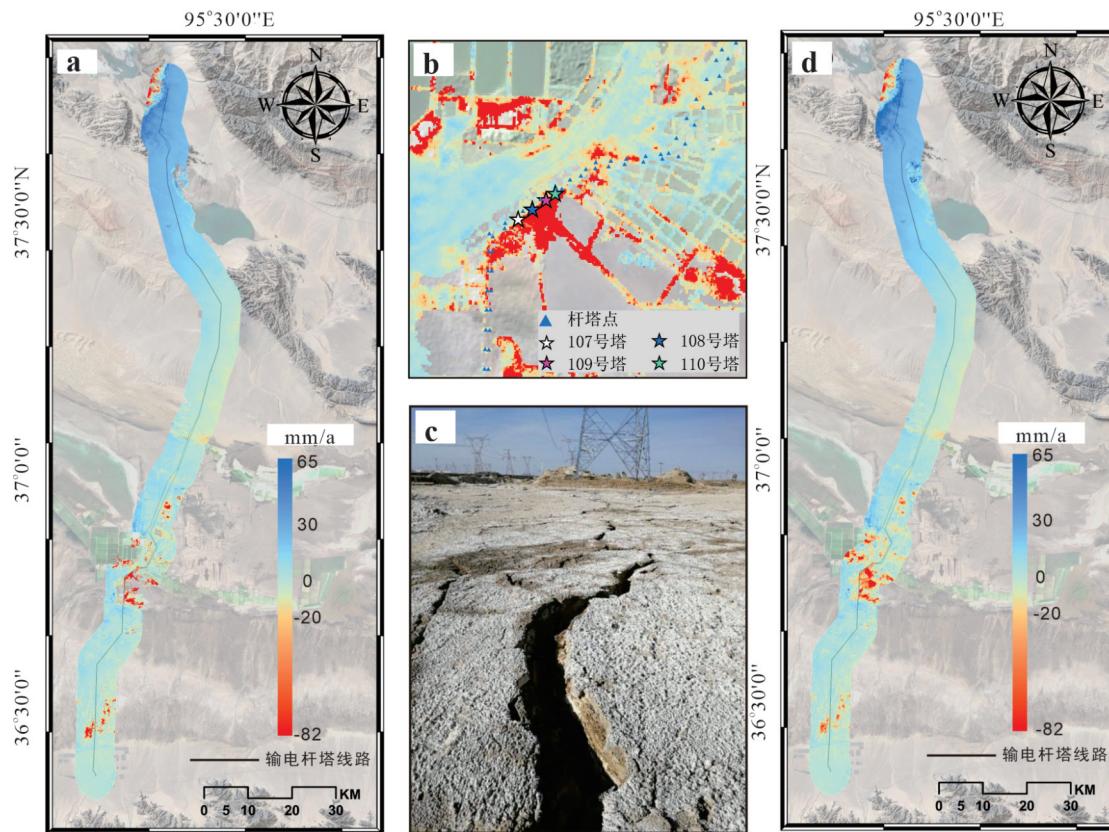


图4 输电线路沿线地面变形遥感解译图

Fig.4 Remote sensing interpretation map of ground deformation along transmission lines

表1 地面沉降易发性评价指标体系及说明

Table 1 Land subsidence susceptibility evaluation index system and description

一级评价因子	二级评价因子	指标说明
地形地貌	坡度	随着坡度的增加,地下水补给和排泄、物质搬运与堆积、堆积体的厚度和松散度等都会发生改变.
	平面曲率	平面曲率描述的是地形在水平方向的特征,在数值上等于某栅格处坡向在坡度上的变化.
	剖面曲率	剖面曲率可以描述地形的复杂度,它是坡度的坡度.
基础地质	地层岩性	地层岩性是各类地质灾害发育的物质基础,对地面沉降发育具有基础性的控制作用.
水文环境	距河流距离	河流对地面具有冲刷侵蚀作用,会进一步改变地表形态.
	地形湿度指数	地形湿度可用来定量模拟流域内地形和土壤水分的干湿状况
	距道路距离	车辆动荷载作用会影响地表的应力分布稳定性会发生较大改变.
人类工程活动	土地利用类型	人类对于土地的破坏程度和干扰程度的差异可以通过土地利用类型来体现,在不同的土地利用类型区域内,地面沉降发生的概率和发育的密度都有所差异.

降的现场勘察及研究区内地层岩性特点,将研究区内的地层岩性划分为:化学沉积物、沼泽沉积物、湖积物、洪积物、冲积物、风积物、坚硬岩与较坚硬岩8类如图5d.如表2,地层岩性为化学沉积物的FR值最大为:1.74.

3.3 水文环境因子

研究区盐渍土溶陷主要受制于土体中的水分含量、河流等侵蚀冲刷作用.对研究区所选取的水文环境因子为:距河流的距离及地形湿度指数.为

研究河流的补给排泄及对盐渍土的溶解效应,将河流作缓冲处理(Mohammady *et al.*, 2019);将研究区距河流的距离分为4级,分别是:0~300 m、300~600 m、600~900 m和>900 m如图5e.如表2,距河流的距离为300~600 m的FR值最大为:1.768.地形湿度指数(topographic wetness index, TWI)可用来定量模拟流域内地形和土壤水分的干湿状况(周超等, 2020).利用FR将研究区的TWI重分类为4级,分别为0~6、6~13、13~25、>25如图5f.如表

2,地形湿度>25 的 FR 值最高为:1.278.

3.4 人类工程活动因子

人类工程活动是影响盐渍土溶陷地面沉降的重要因素. 研究区所选用的人类工程活动因子为距道路的距离和土地利用类型. 由于研究区内广泛分布着盐渍土, 其在道路车辆动荷载作用下稳定性会发生较大改变(宁展望, 2014). 因此, 结合现场调研及路网分布特点对研究区内道路进行缓冲. 将研究区距道路的距离分为 4 级, 分别是: 0~400 m、400~800 m、800~1 200 m 和 >1 200 m 如图 5g. 如表 2, 距道路的距离为 0~400 m 的 FR 值最高为: 1.081.

人类对于土地的破坏程度和干扰程度的差异可以通过土地利用类型来体现(Ilia and Tsangaratos, 2016), 在不同的土地利用类型区域内, 地面沉降发生的概率和发育的密度都有所差异. 研究区内由于察尔汗盐湖蕴含丰富的盐矿资源, 不定期的晾晒卤水提取矿物盐, 使得中部工业区人类工程活动频繁, 其他地区则相对较弱. 因此, 结合青海省土地利用类型数据及研究区特点, 将土地利用类型分为 5 类, 分别为建设用地、盐池、裸地、草地、水体如图 5h. 如表 2, 土地利用类型为盐池的 FR 值最高为: 1.891.

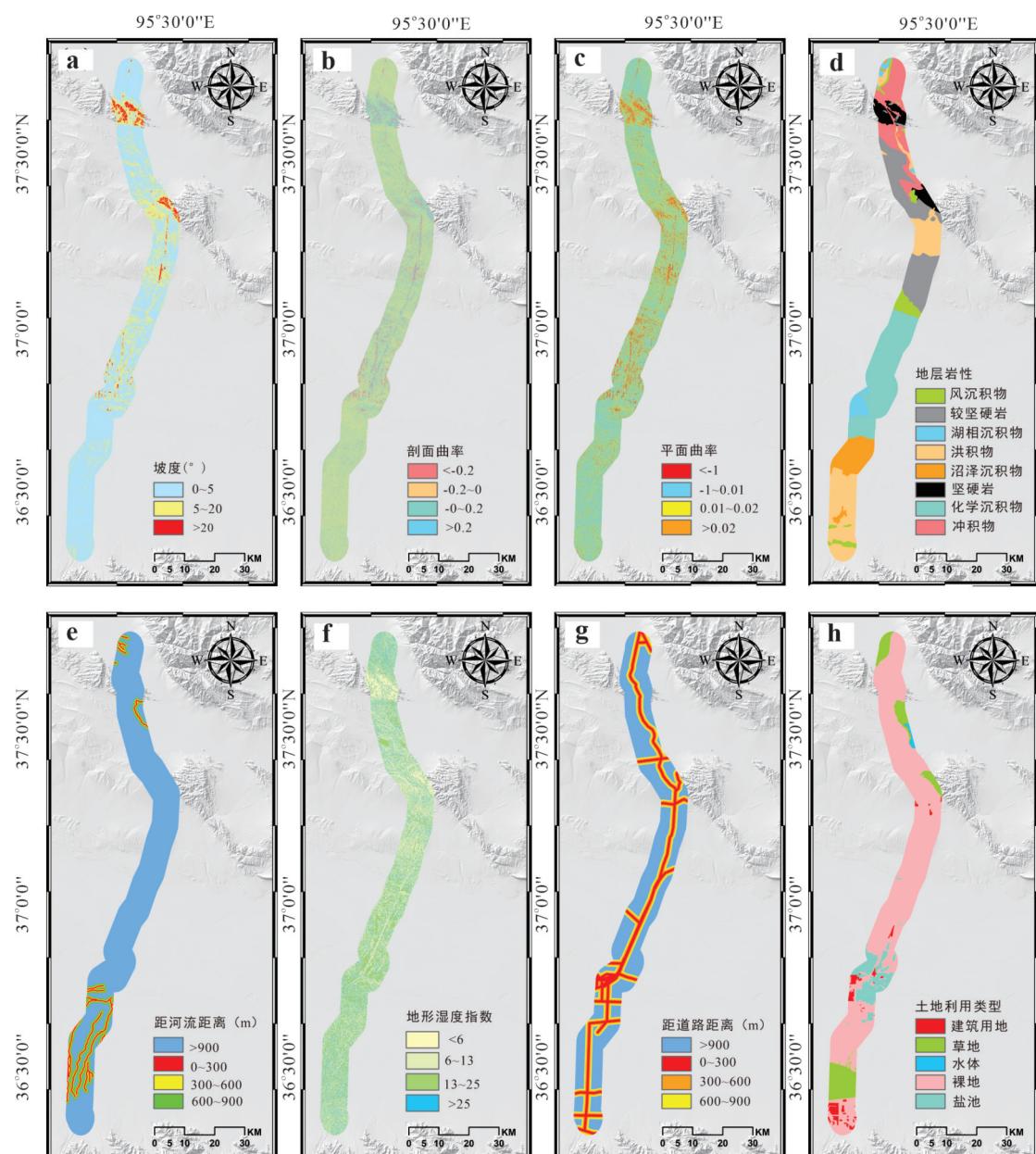


图 5 地面沉降指标分布图

Fig.5 Land subsidence index distribution

表2 研究区地面沉降易发性评价因子分级

Table 2 Classification of land subsidence susceptibility evaluation factors in study area

评价因子	分类	类型	全区栅格数	栅格占比	地面沉降栅格数	地面沉降栅格占比	FR
坡度(°)	0~5	连续型	797 379	0.777	132 214	0.854	1.098
	5~20		202 985	0.198	21 633	0.140	0.706
	>20		25 371	0.025	1 035	0.007	0.270
剖面曲率	-0.2	连续型	78 901	0.077	11 063	0.071	0.929
	-0.2~0		513 544	0.501	81 362	0.525	1.049
	0~0.2		355 055	0.346	52 793	0.341	0.985
	>0.2		78 235	0.076	9 664	0.062	0.818
平面曲率	<-1	连续型	91 196	0.089	9 984	0.064	0.725
	-1~01		579 113	0.565	92 804	0.599	1.061
	0.01~0.02		302 010	0.294	43 169	0.279	0.947
	>0.02		73 416	0.072	8 925	0.058	0.805
地层岩性	化学沉积物	离散型	250 609	0.244	65 979	0.426	1.744
	沼泽沉积物		88 626	0.086	10 387	0.067	0.776
	湖积物		34 406	0.034	17 748	0.115	3.416
	洪积物		229 941	0.224	31 112	0.201	0.896
	冲积物		125 001	0.122	552	0.004	0.029
	风积物		48 116	0.047	7 964	0.051	1.096
	较坚硬岩		197 692	0.193	21 122	0.136	0.708
	坚硬岩		51 344	0.050	18	0	0.002
距河流的距离(m)	0~300	离散型	44 133	0.043	14 596	0.094	2.190
	300~600		41 710	0.041	11 136	0.072	1.768
	600~900		72 020	0.070	15 885	0.103	1.461
	>900		867 872	0.846	113 265	0.731	0.864
地形湿度指数	<6	连续型	173 047	0.169	16 292	0.105	0.624
	6~13		443 366	0.432	64 892	0.419	0.969
	13~25		139 927	0.136	21 697	0.140	1.027
	>25		269 395	0.263	52 001	0.336	1.278
距道路的距离(m)	0~400	离散型	158 670	0.155	25 895	0.167	1.081
	400~800		132 811	0.129	19 808	0.128	0.988
	800~1 200		118 658	0.116	17 106	0.110	0.955
	>1 200		615 596	0.600	92 073	0.594	0.991
土地利用类型	建设用地	离散型	29 530	0.029	2 667	0.017	0.598
	草地		114 370	0.112	32 656	0.211	1.891
	水体		4 997	0.005	79	0.001	0.105
	裸地		795 944	0.776	66 495	0.429	0.553
	盐池		80 894	0.079	52 985	0.342	4.338

3.5 地面沉降评价因子多重共线性分析

为了提高研究区输电线路沿线地面沉降易发性评价精度,在地面沉降易发性建模分析前需检验所选指标之间是否存在共线性问题(郭子正等,2019)。常用的共线性诊断指标主要有方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)和容忍度(tolerance, TOL)。通常,VIF小于5或TOL大于0.2时,则表明所选致灾因子不存在多重共线性,可以用于

易发性模型的构建(周超等,2020)。如表3所示,研究区的评价因子最大方差膨胀和最小容差为1.201和0.787,故所选取的地面沉降易发性评价因子不存在共线性问题。

4 评价结果与精度评价

根据研究区地面沉降易发性评价指标体系,运用MLPNN、LR和BN三类模型开展研究区地面沉

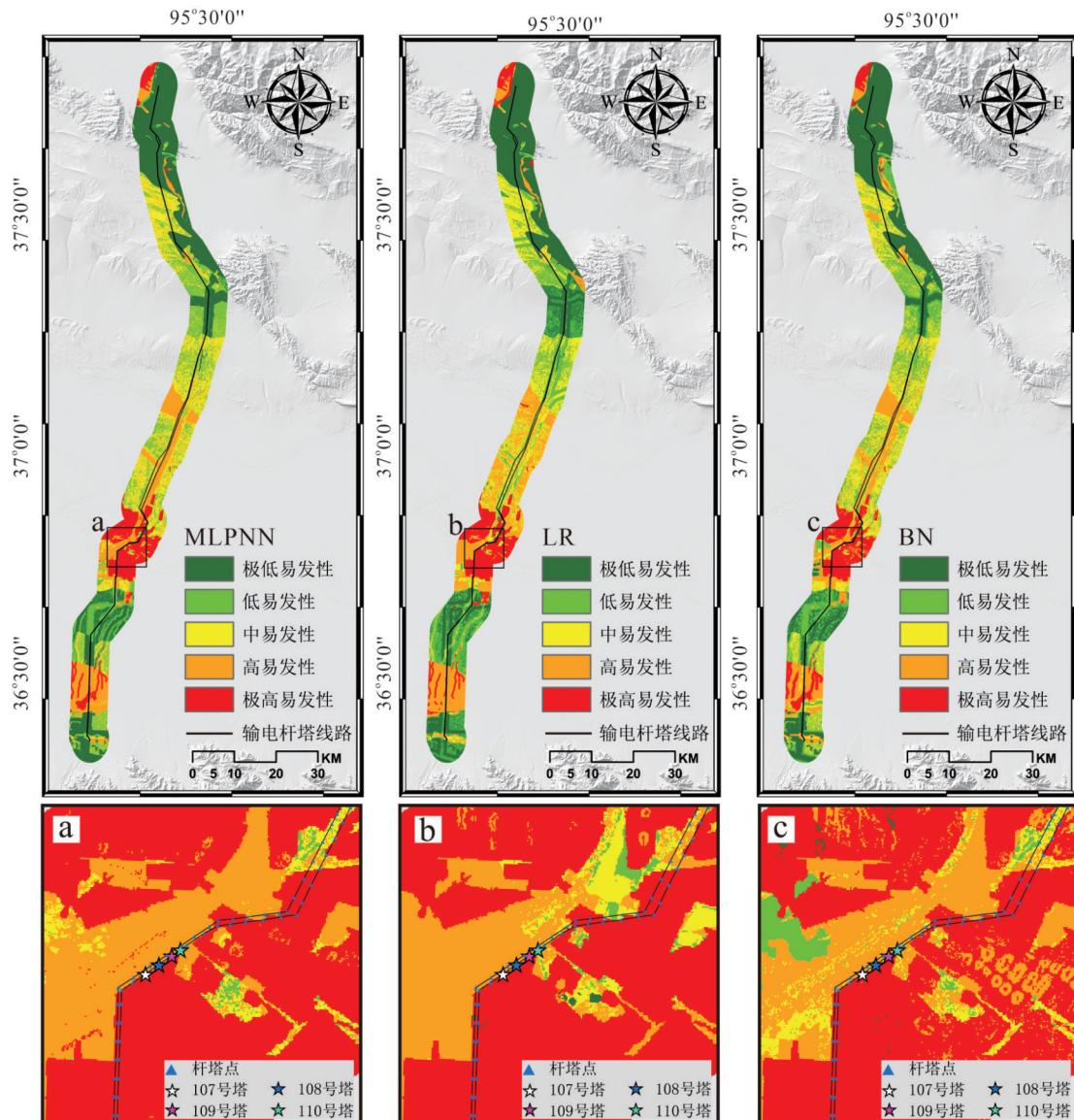


图 6 地面沉降易发性分级图
Fig.6 The land subsidence susceptibility maps

表 3 评价因子多重共线性诊断

Table 3 Multicollinearity diagnosis of evaluation factors

评价因子	TOL	VIF
坡度	0.833	1.201
剖面曲率	0.808	1.049
平面曲率	0.787	1.108
地层岩性	0.873	1.145
距河流的距离	0.947	1.056
地形湿度指数	0.863	1.159
距道路的距离	0.992	1.008
土地利用类型	0.964	1.038

降易发性分析. 基于分位数法(Hakim *et al.*, 2020)将研究区地面沉降的易发性等级分为极低、低、中、高、极高 5 级, 分级结果如图 6 和表 4 所示. 对比分析研究区地面沉降易发性区划成果, 发现研究区地面沉降的极高、高易发区主要发生在中部盐湖地区, 这与遥感解译结果和现场调查情况吻合, 其中已发生变形破坏的 107~110 号杆塔均位于极高易发性区域内.

运用地面沉降易发性频率比来对研究区易发性评价结果进行检验, 如表 4. MLPNN、LR、BN 模型评价结果显示: 极高易发区的栅格总数(FR)分别为 102 574(4.467), 102 574(4.285), 102 574(4.438), 研究区

表4 研究区地面沉降易发性评价频率比
Table 4 Frequency ratio of land subsidence susceptibility evaluation in study area

评价模型	易发性等级	分级栅格数	分级比例(%)	地面沉降栅格数	地面沉降比例(%)	FR
MLPNN	极低	307 720	0.300	3 218	0.021	0.099
	低	205 147	0.200	14 312	0.092	0.722
	中	205 147	0.200	24 241	0.157	1.455
	高	205 147	0.200	45 493	0.294	2.699
	极高	102 574	0.100	67 618	0.437	4.467
LR	极低	307 720	0.300	8 044	0.052	0.219
	低	205 147	0.200	16 196	0.105	0.824
	中	205 147	0.200	24 120	0.156	1.777
	高	205 147	0.200	42 708	0.276	2.833
	极高	102 574	0.100	63 814	0.412	4.285
BN	极低	307 720	0.300	3 324	0.021	0.122
	低	205 147	0.200	14 563	0.094	0.747
	中	205 147	0.200	27 349	0.177	1.338
	高	205 147	0.200	42 673	0.276	2.728
	极高	102 574	0.100	66 973	0.432	4.438

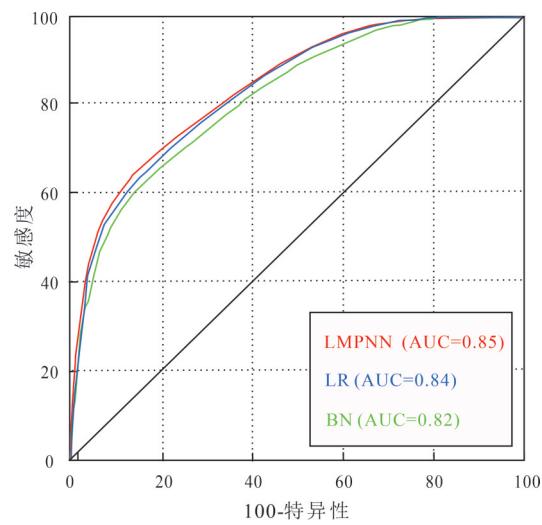


图7 ROC精度曲线

Fig.7 ROC curves of the three used models

极低易发性到极高易发性的地面沉降易发性等级FR值显著增大,且低、极低易发性的FR值均小于1,高、极高易发性的地面沉降比例均大于70%,表明研究区的地面沉降易发性等级评价有效.针对不同模型的评价精度,利用ROC曲线来对模型评价结果进行检验,如图7,MLPNN模型训练结果的AUC值为0.85,优于LR模型和BN模型的0.84与0.82;说明在拟合地面沉降与其影响因素的非线性关系中MLPNN的预测模型更为优异.

5 结论

(1)本文就盐湖地区由于盐渍土的溶陷、腐蚀及人类工程活动所造成的地面沉降及其引发的输电线路杆塔变形破坏,在人力巡线成本高,周期长等弊端下,利用SBAS-InSAR技术获取了输电线路沿线的地面变形情况,建立了地面沉降的灾害样本数据库.

(2)结合研究区地面沉降情况和地质环境特征确立了坡度、剖面曲率、平面曲率、地层岩性、距河流的距离、地形湿度指数、距道路的距离、土地利用类型8类地面沉降的影响因子.在对各因子间的独立性进行检验后,建立了盐湖地区地面沉降易发性的评价体系.

(3)通过地面沉降易发性评价结果对比发现,多层感知器神经网络模型(MLPNN)、逻辑回归(LR)、贝叶斯(BN)模型的评价精度均较好,但总体而言MLPNN模型的评价精度相较其余两个模型较高,与实际情况较为一致.表明了,通过遥感解译获得地面沉降样本数据与机器学习相结合的方法是盐湖地区输电线路杆塔地面沉降易发性评价的有效手段;同时,地面沉降易发性的评价结果可为输电线路杆塔监测、运行管理和新塔选址提供参考.

References

- Atkinson, P. M., Massari, R., 2011. Autologistic Modelling of Susceptibility to Landsliding in the Central Apennines,

- Italy. *Geomorphology*, 130(1/2): 55—64. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.02.001>
- Bianchini, Solari, Soldato, et al., 2019. Ground Subsidence Susceptibility (GSS) Mapping in Grosseto Plain (Tuscany, Italy) Based on Satellite InSAR Data Using Frequency Ratio and Fuzzy Logic. *Remote Sensing*, 11(17): 2015. <https://doi.org/10.3390/rs11172015>
- Buscema, M., 2002. A Brief Overview and Introduction to Artificial Neural Networks. *Substance Use & Misuse*, 37(8/9/10): 1093—1148. <https://doi.org/10.1081/ja-120004171>
- Chen, G., Zhang, Y., Zeng, R. Q., et al., 2018. Detection of Land Subsidence Associated with Land Creation and Rapid Urbanization in the Chinese Loess Plateau Using Time Series InSAR: A Case Study of Lanzhou New District. *Remote Sensing*, 10(2): 270. <https://doi.org/10.3390/rs10020270>
- Du, Q., Li, G., Zhou, Y., et al., 2021. Deformation Monitoring in an Alpine Mining Area in the Tianshan Mountains Based on SBAS-InSAR Technology. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021(12): 1—15. <https://doi.org/10.1155/2021/9988017>
- Fadhillah, M. F., Achmad, A. R., Lee, C. W., 2020. Integration of InSAR Time-Series Data and GIS to Assess Land Subsidence along Subway Lines in the Seoul Metropolitan Area, South Korea. *Remote Sensing*, 12(21): 3505. <https://doi.org/10.3390/rs12213505>
- Ferguson, K. C., Rucker, M. L., Panda, B. B., 2015. Methods for Monitoring Land Subsidence and Earth Fissures in the Western USA. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372: 361—366. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-361-2015>
- Gao, X. X., Li, S. M., Chen, P. D., et al., 2022. Research on Instability Mechanism of Transmission Tower under Time-Series InSAR Slope Slip Monitoring. *Journal of Guizhou University(Natural Sciences)*, 39(1): 43—50 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. Z., Yin, K. L., Fu, S., et al., 2019. Evaluation of Landslide Susceptibility Based on GIS and WOE-BP Model. *Earth Science*, 44(12): 4299—4312 (in Chinese with English abstract).
- Hakim, W., Achmad, A., Lee, C. W., 2020. Land Subsidence Susceptibility Mapping in Jakarta Using Functional and Meta-Ensemble Machine Learning Algorithm Based on Time-Series InSAR Data. *Remote Sensing*, 12(21): 3627. <https://doi.org/10.3390/rs12213627>
- Han, L. N., Zhang, J. Q., Zhang, Y. C., et al., 2019. Applying a Series and Parallel Model and a Bayesian Networks Model to Produce Disaster Chain Susceptibility Maps in the Changbai Mountain Area, China. *Water*, 11(10): 2144. <https://doi.org/10.3390/w11102144>
- He, S. W., Pan, P., Dai, L., et al., 2012. Application of Kernel-Based Fisher Discriminant Analysis to Map Landslide Susceptibility in the Qinggan River Delta, Three Gorges, China. *Geomorphology*, 171—172(6): 30—41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.024>
- Holzer, T. L., Galloway, D. L., 2005. Impacts of Land Subsidence Caused by Withdrawal of Underground Fluids in the United States. *Humans as Geologic Agents*, 4016(8). [https://doi.org/10.1130/2005.4016\(8\)](https://doi.org/10.1130/2005.4016(8))
- Huang, F. M., Ye, Z., Yao, C., et al., 2020. Uncertainties of Landslide Susceptibility Prediction: Different Attribute Interval Divisions of Environmental Factors and Different Data-Based Models. *Earth Science*, 46(10): 3777—3795 (in Chinese with English abstract).
- Ilia, I., Tsangaratos, P., 2016. Applying Weight of Evidence Method and Sensitivity Analysis to Produce a Landslide Susceptibility Map. *Landslides*, 13(2): 379—397. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0576-3>
- Li, W. B., Fan, X. M., Huang, F. M., et al., 2021. Uncertainties of Landslide Susceptibility Modeling under Different Environmental Factor Connections and Prediction Models. *Earth Science*, 46(10): 3777—3795 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Y. D., 2010. Distribution Law of Saline Soil and Its Salt Expansion and Subsidence Mechanism in Qinghai. *Hydrogeological Engineering Geology*, 37 (4): 116—120 (in Chinese).
- Mohammady, M., Pourghasemi, H. R., Amiri, M., 2019. Land Subsidence Susceptibility Assessment Using Random Forest Machine Learning Algorithm. *Environmental Earth Sciences*, 78(16): <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8518-3>
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., et al., 2013. A Tutorial on Synthetic Aperture Radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1): 6—43. <https://doi.org/10.1109/mgrs.2013.2248301>
- Ning, Z. W., 2014. Study on the Highway Foundation Settlement Regularity of Soft Soil Salinization in Yanhu Area (Dissertation). Chang'an University, Xi'an, 19—35 (in Chinese with English abstract).
- Qi, Z. X., Wang, X. J., Liu, C. Q., et al., 2021. Analysis on Collapsible Deformation and Prevention Measures of Transmission Line Tower Ground in Qarhan Salt Lake Area. *Electric Power Survey and Design*, (5): 72—76 (in Chinese with English abstract).
- Shi, M., Gong, H. L., Gao, M. L., et al., 2020. Recent

- Ground Subsidence in the North China Plain, China, Revealed by Sentinel-1A Datasets. *Remote Sensing*, 12(21): 3579. <https://doi.org/10.3390/rs12213579>
- Wang, Z. J., 1986. Engineering Geological Study of Ground Subsidence. *Earth Science*, (2):199—206 (in Chinese).
- Wei, Z. Y., 2007. Harm of Qinghai Saline Soil to Power Transformation Engineering and Treatment Measure. *Qinghai Electric Power*, (S1): 40—44 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, W., Zhang, R., Liu, G. X., et al., 2022. Extraction and Analysis of Saline Soil Deformation in the Qarhan Salt Lake Region (in Qinghai, China) by the Sentinel SBAS-InSAR Technique. *Geodesy and Geodynamics*, 13(2): 127—137. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.11.003>
- Xu, Q., Pu, C. H., Zhao, K. Y., et al., 2021. Time Series InSAR Monitoring and Analysis of Spatiotemporal Evolution Characteristics of Land Subsidence in Yan'an New District. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(7):957—969 (in Chinese with English abstract)
- Yan, T. Z., 1989. New Model for Predicting Land Subsidence. *Earth Science*, (2): 181—188 (in Chinese).
- Zhang, Z. J., Wang, C., Wang, M. M., et al., 2018. Surface Deformation Monitoring in Zhengzhou City from 2014 to 2016 Using Time-Series InSAR. *Remote Sensing*, 10(11): 1731. <https://doi.org/10.3390/rs10111731>
- Zhang, Z. Y., Deng, M. G., Xu, S. G., 2022. Comparison of Landslide Susceptibility Assessment Models in Zhenkang County, Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(1):157—171 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, C., Yin, K. L., Cao, Y., et al., 2020. Landslide Susceptibility Assessment by Applying the Coupling Method of Radial Basis Neural Network and Adaboost: A Case Study from the Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 45(6):1865—1876 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. G., Ming, S., 2021. Application of Time Series InSAR Technology in Prevention and Control of Surface Deformation Disaster of High-Voltage Transmission line. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (7):92—97 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 高霞霞,李素敏,陈朋弟,等,2021.时序InSAR边坡滑移监测下输电杆塔失稳机理研究.贵州大学学报(自然科学版),39(1):43—50.
- 郭子正,殷坤龙,付圣,等,2019.基于GIS与WOE-BP模型的滑坡易发性评价.地球科学,44(12):4299—4312.
- 黄发明,舟叶,池姚,等,2020.滑坡易发性预测不确定性:环境因子不同属性区间划分和不同数据驱动模型的影响.地球科学,12(45): 4535—4549.
- 李文彬,范宣梅,黄发明,等,2021.不同环境因子联接和预测模型的滑坡易发性建模不确定性.地球科学,46(10): 3777—3795.
- 罗友弟,2010.青海地区盐渍土分布规律及其盐胀溶陷机制探讨.水文地质工程地质,37(4): 116—120.
- 宁展望,2014.盐湖区高速公路盐渍化软土地基沉降规律研究(硕士学位论文).西安:长安大学.
- 祁兆鑫,王新军,刘常青,等,2021.察尔汗盐湖区输电线路杆塔地基溶陷变形分析及防治措施.电力勘测设计,(5): 72—76
- 王智济,1986.地面沉降的工程地质研究.地球科学,(2):199—206.
- 魏占元,2007.青海盐渍土对变电工程的危害与治理措施.青海电力,(S1): 40—44.
- 许强,蒲川豪,赵宽耀,等,2021.延安新区地面沉降时空演化特征时序InSAR监测与分析.武汉大学学报(信息科学版),46(7): 957—969.
- 晏同珍,1989.地面沉降规律预测新模式.地球科学,(2):181—188.
- 张钟远,邓明国,徐世光,等,2022.镇康县滑坡易发性评价模型对比研究.岩石力学与工程学报,41(1): 157—171.
- 周超,殷坤龙,曹颖,等,2020.基于集成学习与径向基神经网络耦合模型的三峡库区滑坡易发性评价.地球科学,45(6): 1865—1876.
- 祝听刚,明生,2021.时序InSAR技术应用于高压输电线路附近的地表形变灾害防控.测绘通报,(7): 92—97.