DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250629001

地下水开采区复杂地物反射地面沉降观测与关键地层识别*

张 鹏[1]，张伶俐[1]，夏 锦[1]，王必凯[2]，陈 浩[2]

（1.南京工业大学交通工程学院，江苏 南京，211816；2.华设设计集团，江苏 南京，210014）

摘要：宿州西地下水源开采区处于宿州西城乡结合带，其地物散射强弱复杂多变会影响地表像元相干性，传统单一时序InSAR技术难以适用。通过系统讨论PS-InSAR和SBAS-InSAR的技术优势与缺陷基础上，研究提出了针对复杂地物散射条件的融合PS-InSAR和SBAS-InSAR的地面沉降监测方法，进而围绕地质数据与沉降数据关联性，研究提出了基于Apriori空间关联规则与Geodetector算法的控制地面沉降的关键地层数据挖掘方法。以宿州西水源区为例，SBAS-InSAR和PS-InSAR融合方法使得PS点的密度提高128.8%，监测点密度提高262.3%；第四系中更新统Q_2黏土层是影响地面沉降的关键地层，其影响力值（Geodetector的q值）为0.178 3。该方法可以提升地物散射复杂条件下地面沉降观测精度，获得控制影响地面沉降的关键地层及地质参数。

关键词：地面沉降；地物散射；PS-InSAR；SBAS-InSAR；Apriori关联规则；Geodetector算法

中图分类号：P237　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1672-2132(2026)05-0951-11

Observation of Ground Subsidence under Complex Surface Scattering Conditions in Groundwater Extraction Areas and Identification of Key Strata

ZHANG Peng[1], ZHANG Lingli[1], XIA Jin[1], WANG Bikai[2], CHEN Hao[2]

(1. School of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;
2. Huashe Design Group, Nanjing 210014, China)

Abstract: The groundwater extraction area in western Suzhou is located at the urban-rural fringe of the region, where the complex and variable scattering intensity of surface features affects the coherence of surface pixels, making traditional single time-series InSAR techniques inadequate. This study systematically discussed the advantages and limitations of PS-InSAR and SBAS-InSAR technologies and proposed a ground subsidence monitoring method that integrated PS-InSAR and SBAS-InSAR to address complex surface scattering conditions. Furthermore, focusing on the correlation between geological data and subsidence data, a data mining method for identifying key strata controlling ground subsidence was proposed, based on the Apriori spatial association rules and the geodetector algorithm. The western Suzhou water source area was taken as an example, and the integration of SBAS-InSAR and PS-InSAR methods increased the density of PS points by 128.8%. The monitoring point density increased by 262.3%. The Quaternary Middle Pleistocene Q_2 clay layer was identified as the key stra-

* **收稿日期：**2025-06-29；**修回日期：**2025-12-24

基金项目：国家自然科学基金项目（41372295）资助

作者简介：张鹏（1976—），男，教授，博导，博士。主要从事地质信息研究。E-mail:zhangpeng-mail@njtech.edu.cn

tum influencing ground subsidence in the study area, with an impact value (geodetector q value) of 0.178 3. The proposed method enhances the accuracy of ground subsidence monitoring under complex surface scattering conditions and identifies key strata and geological parameters controlling ground subsidence.

Keywords: ground subsidence; surface scattering; PS-InSAR; SBAS-InSAR; Apriori association rules; geodetector algorithm

0 引 言

地下水过量开采会导致区域地面沉降,是以地下水为城市主要水源供给相关地区典型地质灾害之一[1-3]。线性工程建设不可避免地会穿越这一类地质灾害区,淮宿蚌城际铁路是皖北城际铁路网近期建设线路,经淮北、宿州、蚌埠三市,正线全长160.475 km,采用无砟轨道,时速为350 km/h,路基、桥梁的沉降控制是保持轨道平顺性的关键。宿州城西水源地是宿州市城区唯一的饮用水水源地,占地面积10 km^2,共计约110眼水井。淮宿蚌城际铁路在DK59+400至DK62+000段与水源区水井的最近距离为1 177 m,目前水源区地下水已严重超采,形成了3个较大水位降落漏斗,因此地下水控采不仅要保障城市供水安全,而且要防止周边大面积地面沉降威胁淮宿蚌城际铁路建造与运营安全。

采用InSAR技术对地面沉降长期观测是监控区域地面沉降地质灾害的基础工作。不同InSAR时序解算方法存在不同的适用条件。PS-InSAR精度高但在地物散射强弱复杂多变化区的失相干会使PS点密度降低,测量精度难以保障。SBAS-InSAR采用多视"降噪"处理和空间域相位滤波来克服失相干与低相干情况,但是在其理想条件下SBAS-InSAR精度不如PS-InSAR。许多学者提出了融合不同时序InSAR技术的思路,主要借助于增加相干点目标的空间采样率与分布密度[4-6]。J. Li等[7-11]采用SBAS-InSAR对大范围和大跨度区域地面沉降进行了监测,证明了SBAS-InSAR克服时空失相干的能力更强。聂运菊等[12]通过筛选与提取研究区内稳定PS点作为SBAS-InSAR处理过程中的地面控制点进行轨道精炼与形变反演,得到了比使用单一时序InSAR更准确的结果。张凯翔等[13]联合SBAS-InSAR和PS-InSAR准确反映研究区内各处地面沉降变化,为地质灾害整治提供有效合理参考。种亚辉等[14]联合SBAS-InSAR和PS-InSAR实现对不同沉降区域内多条重要交通线路的重点监测。程霞等[15]融合两种时序InSAR有效提取出城区及郊区的高相干点目标。通过融合不同时序InSAR技术,更精准的监测不同区域的地面沉降。陈媛媛等[16]采用PS-InSAR和SBAS-InSAR技术对长江南京段沿江区域进行了地面沉降分析,得出了两种技术提取沉降速率的一致性,验证了InSAR技术的可行性。

地下水过度开采引发的地面沉降主要受控水位变化与关键地层两大因素。在控制水位的同时有效加固关键地层是防止沉降过大的有效方法。如何找到影响地层沉降的关键地层至关重要。Apriori算法[17-18]是利用逐层搜索的迭代方法找出数据库中项集的关系以形成规则,其过程由连接与剪枝组成。Y. Jayababu[19]等运用Apriori关联法则对地理数据集进行了增量拓扑关联规则的挖掘与聚类;卢浩等[20]利用Apriori算法分析了掘进参数对地面沉降的影响。Geodetector是通过定量和定性角度全面分析空间分异性的驱动力方法,能够探寻自变量和因变量的相互关系,广泛运用于多个领域[21-24];J. Gao等[23]利用Geodetector探测了不同地貌类型的岩溶保土和水分保持的空间权衡与协同作用的贡献分析;石鹏远等[25]将其用在了地面沉降危险性评估模型的改进中,大大提高了模型的准确度。

本文依托宿州西水源区,主要研究针对复杂地物散射条件的融合PS-InSAR和SBAS-InSAR的地面沉降监测方法,围绕地质数据与沉降数据关联性,研究提出了基于Apriori空间关联规则与Geodetector算法的控制地面沉降的关键地层数据挖掘方法。

1 InSAR融合方法

PS-InSAR解算位置精度较高,但是在弱地物散射区域监测精度易衰减;SBAS-InSAR在弱地物

散射区域克服失相干能力更强，数据密度更高，但是在强地物散射区域的监测精度不及PS-InSAR，单一时序InSAR难以兼顾监测点的数量和质量。

本文提出了一种在复杂地物散射区内融合PS-InSAR和SBAS-InSAR干涉测量数据的地面沉降监测新方法。其思路在于：应对复杂多变地面沉降区域时，在低相干区域采用SBAS-InSAR数据，克服解算失相干的技术优势，在高相干区域采用PS-InSAR数据，发挥解算精度高的技术优势；PS-InSAR和SBAS-InSAR数据融合的关键在于找到数据融合的边界。在PS-InSAR解算中获取PS点的基础上，采用DBSCAN聚类算法，筛选出高相干值的PS点，得到PS点坐标的密度分布；PS点分布密集区对应建成区，PS点稀疏区对应非建成区，两者边界线参照全国土地利用现状数据划定并优化。

利用融合边界筛选所有PS点，剔除非建成区低质量、低密度的PS点并采用SDFPT（slowly-decorrelating filtered phase targ-et）像素点数据，最终实现根据区域内的可变散射特征自动选择匹配的干涉测量数据。

本文所提方法兼顾了地面沉降监测点的数量和质量，提高复杂多变区域地面沉降监测的整体精度。具体技术路线见图1所示。主要步骤如下：

步骤1：获取N幅SAR影像组成SAR影像集，其中$N\geqslant 20$。将同一场景的SAR影像集进行配准。

步骤2：采用PS-InSAR处理步骤1中的SAR影像集，得到PS点数据。

步骤3：采用SBAS-InSAR处理步骤1中的SAR影像集，得到SDFPT像素点数据。

步骤4：对步骤2中PS点数据开展相干性统计，筛选出高相干PS点数据。

步骤5：采用DBSCAN算法聚类分析步骤4中高相干PS点坐标分布，将PS点坐标分布划分为两个子区域，PS点分布密集区域对应建成区，PS点稀疏区域对应非建成区。

步骤6：在PS点分布密集区域内将所有高相干PS点作为节点创建三角网格，寻找初始外部边界L。

步骤7：计算外部边界上三角网格边长，以此为约束使用ArcGIS修正边界L'。

步骤8：提取修正后的边界L'作为数据融合边界，建成区选择PS-InSAR数据，非建成区选择SBAS-InSAR数据。

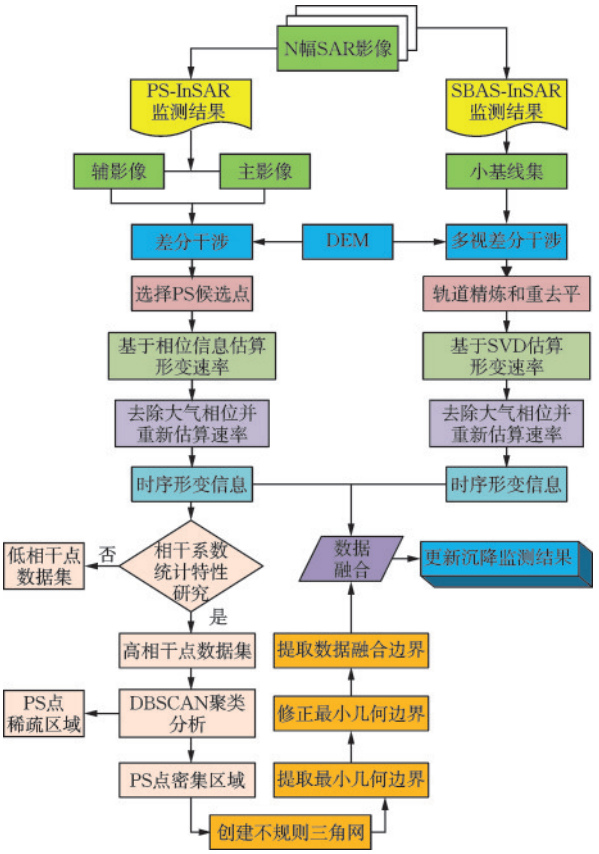


图1　InSAR融合方法技术路线

Fig.1　Technical route of InSAR fusion method

2　关键地层数据挖掘

本文提出了基于Apriori空间关联规则与Geodetector算法的地面沉降与地层地质关联性的数据挖掘方法，其思路在于：

（1）获取研究区内多景的SAR影像数据并进行InSAR解算，得到地面沉降数据；利用聚类分析在时空维度划分沉降等级，得到时序分区图。

（2）整合钻孔勘探资料，获得研究区内各个钻孔不同深度地层的土质类型及其相应指标，根据《岩土工程勘察规范》[26]将相同地层深度与相同土质类型的地质信息指标加权平均，划分地质信息指标三维分布图。

（3）将地面沉降等级时序分区图与地质信息指标三维分布图按WGS84坐标系配准；采用Apriori算法挖掘沉降与地质指标的三维空间关联性，并按

地层、土类及物理指标分类，建立结构化关联数据集。

（4）Geodetector算法，关联分析地面沉降风险对应指标及风险区的指标对应范围，根据指标关联探测结果得出影响研究区沉降的最关键土层。

技术路线如图2所示。

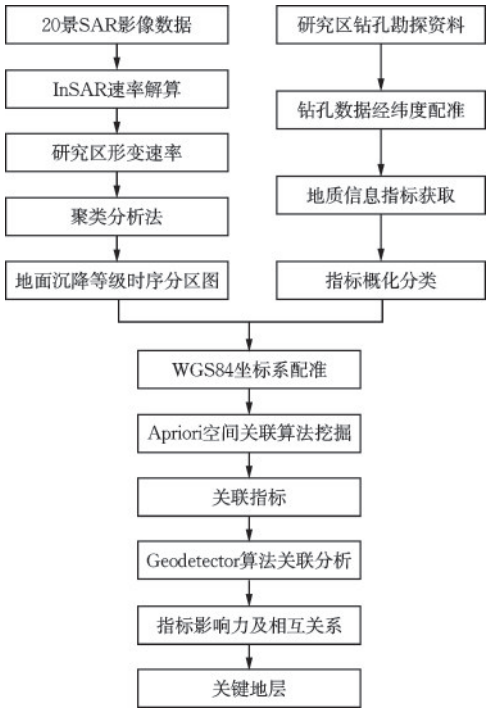


图2　关键地层数据挖掘技术路线

Fig.2　Technical route for data mining of key strata

Apriori算法根据指定的最小支持度从所有的数据集中找出频繁项目集，再根据指定的最小置信度来计算规则的强弱性，输出指定数量的规则，规则的强弱取决于支持度与置信度的选取，从输出的强规则中，剔除其中不符的规则。采用逐层搜索迭代的方法，首先找出满足预设最小支持度的项，接着搜索各频繁项集的集合，每一个频繁项集都会对整个数据库进行一次扫描。其中，最小支持度和最小置信度的值决定了关联规则的结果是否能具备研究所需的可靠性，假如取值过大，可能产生关联规则过少的情况；而取值过小的话，产生的关联规则可能会有很多，且大多数都是无效规则。

采用GeoDetector算法分析影响地面沉降的因子影响力大小、各个指标之间的空间分异性，因子与因子之间的独立或者相互作用，找到控制地表沉降最关键地层与相应土性指标。GeoDetector算法包含三部分：指标探测、生态探测及交互作用探测。

（1）指标探测：用于探测影响地面沉降的指标，以及各个评价指标的影响程度，其度量值为q（范围0～1），如式（1）所示。

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2}=1-\frac{SSW}{SST}\qquad(1)$$
$$SSW=\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2,SST=N\sigma^2$$

式中，L为变量Y或因子X分层总数；h代表分区序号；N和N_h分别为区域内和每个分区栅格数量；SSW代表层内方差和；SST为全区总方差；σ_h^2和σ^2为每个分区方差和全区Y值方差。

（2）生态探测：以F统计量比较因子之间是否有显著差异，如式2所示。

$$F=\frac{N_{X1}*(N_{x2}-1)*\sum_{h=1}^{L_1}N_h\sigma_h^2}{N_{X2}*(N_{x1}-1)*\sum_{h=1}^{L_2}N_h\sigma_h^2}\qquad(2)$$

式中，N_{x1}和N_{x2}是因子的样本数量；L_1和L_2代表变量X_1和X_2分层数目。

（3）交互作用探测：评价因素之间联合作用和彼此单独作用对地面沉降的贡献度。评估方法是比较计算两种驱动因子X_1和X_2对Y的q值，与X_1和X_2交互时的q值。交互关系如表1所示。

表1　交互探测类型

Table 1　Interaction detection types

判断依据	交互作用
$q(A\cap B)<\mathrm{Min}(q(A),q(B))$	非线性减弱
$q(A\cap B)>\max(q(A),q(B))$	双因子增强
$\mathrm{Min}(q(A),q(B))<q(A\cap B)<\max(q(A),q(B))$	单因子增强
$q(A\cap B)=q(A)+q(B)$	相互独立
$q(A\cap B)>q(A)+q(B)$	非线性增强

（4）风险探测：判别俩个因子的分类区域中的属性平均值是否有显著的差别，可以用来搜索研究目标数值较大的区域，用统计量来检验。

$$t=\frac{\bar{Y}_{h=1}-\bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{V_{ar}(Y_{h=1})}{n_{h=1}}+\frac{V_{ar}(Y_{h=2})}{n_{h=2}}\right]^{\frac{1}{2}}}\qquad(3)$$

式中，$\bar{Y}_h$为子区域h内的属性均值；n_h为子区域h内样本数量；V_{ar}为方差。

3 案例样区

宿州西水源地位于宿州城区所在的埇桥区西南方向，占地面积135 km²。研究区范围包括宿州西水源地110口群井为中心的20×20 km²矩形区域，选区范围如图3所示。淮宿蚌高铁沿线地质勘查钻孔共323个，其里程桩号分布如图4所示。区域地质为新生界松散覆盖层，其厚度为228.40～233.72 m，覆盖层主要由粉砂、细砂、黏土质砂、黏土、砂质黏土、钙质黏土等组成，自上而下可以分成4个含水层(组)和3个隔水层(组)。钻孔取样土体物理力学指标如表2所示。

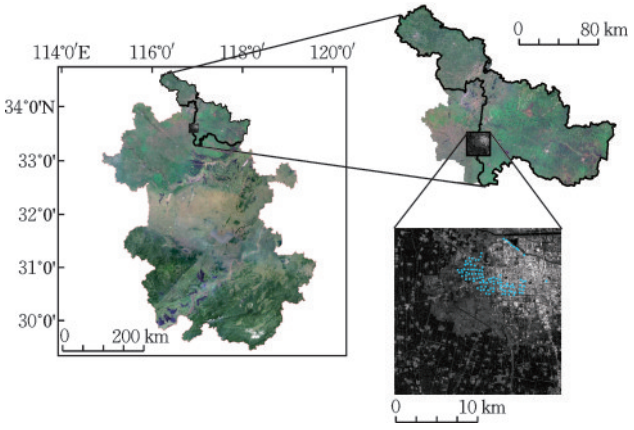


图3 宿州西水源地研究区

Fig.3 Western Suzhou water source area

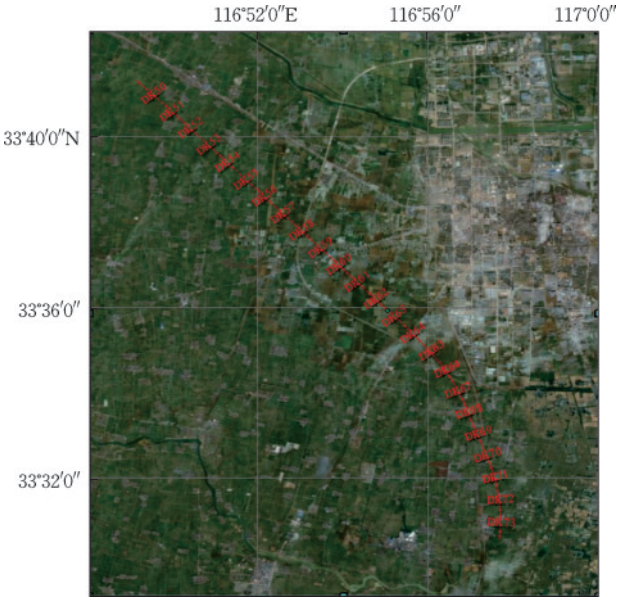


图4 钻孔线路里程桩号分布

Fig.4 Distribution of chainages for borehole routes

以合徐高速为界，水源地东侧建筑密度较大，城镇化水平较高；西侧多为麦地，村庄棋布，沟渠纵横。选用Sentinel-1A卫星的C波段合成孔径雷达，采用渐进扫描成像模式生成全球影像，重访观测周期为12 d。表3为Sentinel-1A卫星系统的主要参数。卫星影像采用IW成像模式，250 km幅宽和VV极化方式，共38幅升轨数据，时间跨度为2017-6-25—2020-7-27。影像数据的主要参数见表4，影像采集时间分别见表5。

表2 323个钻孔资料中其中一个钻孔取样物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indicators of samples from one of 323 boreholes

土样编号	取土深度/m	物理性质						界限含水率(76g锥)			
		含水率 W/%	土粒比重 G_s	湿密度 ρ/(g·cm^{-3})	干密度 ρ_d/(g·cm^{-3})	饱和度 S_r/%	孔隙比 e	液限 W_L/%	塑限 W_P/%	塑性指数 I_P	液性指数 I_L
D9S11G43-1	4.1～4.3	33.2	2.72	1.80	1.35	89.2	0.913	34.9	21.8	13.1	0.87
D9S11GA18-1	3.1～3.3	29.8	2.72	1.85	1.43	89.2	0.908	31.3	19.2	12.1	0.88
D9S11GA19-1	4.1～4.3	32.5	2.73	1.80	1.36	87.9	0.810	34.6	20.2	14.4	0.85
D9S11Z10-1	4.0～4.5	34.9	2.72	1.80	1.33	91.4	0.838	35.7	22.4	13.3	0.94
D9S11Z10-2	5.5～6.0	34.9	2.73	1.82	1.35	93.1	0.723	35.7	21.4	14.3	0.94
D9S11Z10-3	7.0～7.5	33.9	2.72	1.84	1.37	94.1	0.795	35.0	21.1	13.9	0.92
D9S11Z10-4	8.5～9.0	33.5	2.73	1.85	1.39	94.3	0.870	35.3	20.5	14.8	0.88

表3 卫星系统主要参数

Table 3 Main parameters of satellite system

卫星名称	轨道	重访周期/d	波段	波长/cm	入射角/(°)	分辨率/m
Sentinel-1A	太阳同步	12	C	5.6	38.9	5×20

表 4　影像数据主要参数

Table 4　Main parameters of satellite systems

幅宽/km	轨道	视数	成像模式	极化方式
250	升轨	SLC	IW	VV

表 5　宿州西水源地 2017–2020 年 Sentinel-1A 卫星影像数据时间序列

Table 5　Time series of Sentinel-1A satellite image data for western Suzhou water source area (2017–2020)

年份	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2017	/	/	/	/	/	25	19	24	17	23	28	22
2018	27	20	28	21	27	20	26	19	24	18	23	29
2019	22	27	23	28	22	27	21	26	19	25	30	24
2020	17	22	29	22	28	21	27	/	/	/	/	/

4　地面沉降观测

PS-InSAR 处理流程选取 2019-01-22 期影像作为主影像，其中时间基线最大值为 576 d，空间基线最大值为 128.756 m。SBAS-InSAR 处理流程将所有 SLC 影像配准重采样后设置时空基线阈值，将干涉对集的时间基线阈值设为 365 d 以内，空间基线阈值设为 645 m，由此生成 272 个干涉对。PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 处理结果如图 5 和图 6 所示。PS-InSAR 观测结果年平均形变速率介于 −35.4～10.4（mm·a^{-1}）；SBAS−InSAR 观测结果平均形变速率介于 −43.2～4.4（mm·a^{-1}）。PS-InSAR 的数据量较为稀疏，出现了大量时空失相干的现象，尤其是在地物散射较弱的城市非建成区。SBAS-InSAR 较好地克服了时空失相干，在城市非建成区获得了更多数据。

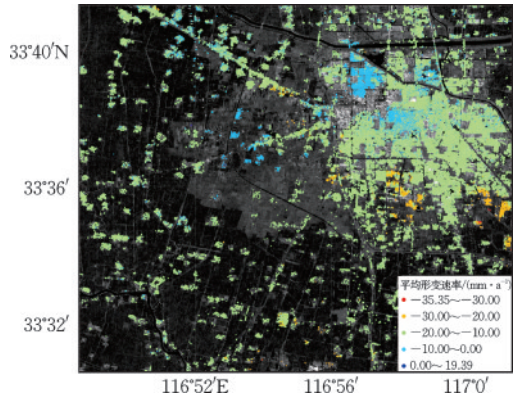


图 5　PS-InSAR 处理结果

Fig.5　PS-InSAR processing results

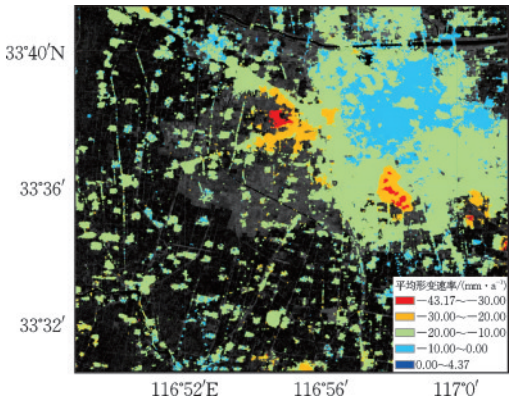


图 6　SBAS-InSAR 处理结果

Fig.6　SBAS-InSAR processing results

以 GlobeLand30 V2020 全国土地利用现状数据为参照，选取 Kernel-DBSCAN 聚类识别出的城镇用地数据簇，在 MATLAB 中提取城镇用地数据簇的融合边界见图 7。

在 ArcGIS 中利用融合边界筛选所有 PS 点，剔除非建成区低质量、低密度的 PS 点并采用 SDFPT 像素点数据，建成区采用 PS-InSAR 数据，非建成区采用 SBAS-InSAR 数据，最终融合成果见图 8。统

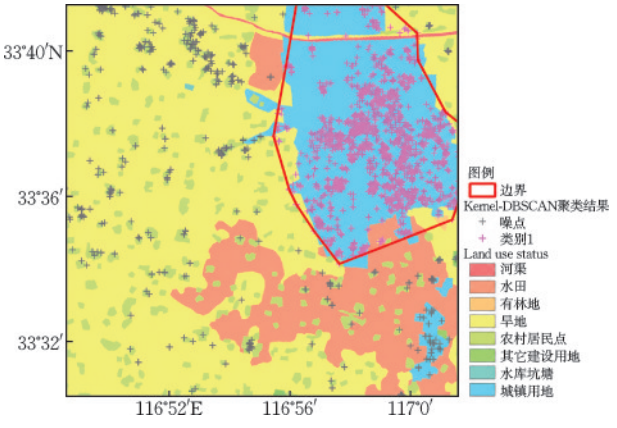


图 7　Kernel-DBSCAN 聚类结果与数据边界

Fig.7　Kernel-DBSCAN clustering results and data boundary

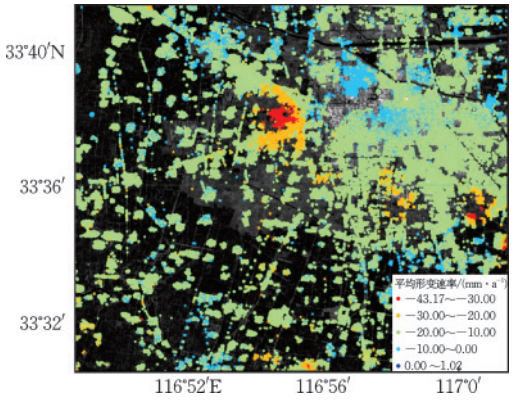


图 8　数据融合成果

Fig.8　Data fusion results

计建成区和非建成区内的PS点和SDFPT像素点数量见表6。建成区保留了110 308个PS点，PS点密度由原来的375个/km²提高至858个/km²，提高128.8%；非建成区的PS点总量仅为47 054个，密度为348个/km²，SBAS-InSAR存在170 469个SDFPT像素点，密度为1261个/km²，采用SDFPT像素点后，测点密度提高262.3%。

表6　监测数据统计

Table 6　Statistics of monitoring data

监测区域数据类型	建成区	非建成区
PS点/个	110 308	470 54
SDFPT像素点/个	213 643	170 469

5　关键地层识别

按照钻孔位置提取对应地表的沉降速率，依据钻孔数据对应的里程提取相应地表的沉降速率如图9、图10所示。宿州西站沿线存在两个较大的沉降漏斗，其附近的地面沉降速率多在10 mm/y以上，提取的铁路表面沉降速率显示，靠近水源区的线路地面其沉降速率相对较大。

研究采用Weka软件执行Apriori算法关联规则挖掘。首先需要离散化处理钻孔数据，离散方法按照平均区间法，如表7所示。表7表征钻孔指标数据的编号和离散化分类，采用等宽分组均等划分数据组。编号方式采用纵向主编号，横向副编号的方法，如R3代表沉降范围在[13,14.5]的数据。

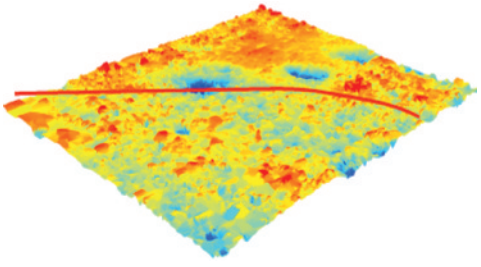


图9　沉降速率三维展示

Fig.9　3D display of ground subsidence rate

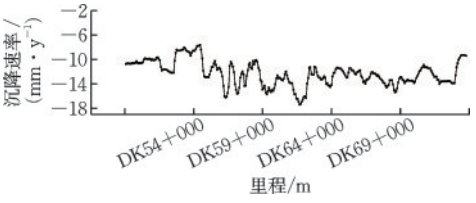


图10　钻孔数据里程表及对应地表沉降速率

Fig10　Borehole data chainages and corresponding ground subsidence rates

表7　离散化后的部分钻孔指标数据

Table 7　Partial borehole indicator data after discretization

编号	1	2	3	4
粉砂A/m	[2,8]	[8,14]	[14,20]	[20,26]
粉土B/m	[3,11]	[11,19]	[19,27]	[27,36]
粉质黏土C/m	[2,15]	[15,28]	[28,41]	[41,54]
粘土D/m	[2,14]	[14,26]	[26,38]	[38,50]
砾砂E/m	[0,2]	[2,4]	[4,6]	[6,8]
中砂F/m	[0,2]	[2,4]	[4,6]	[6,8]
细砂G/m	[0,1]	[1-2]	[2-3]	[3-4]
含水率H	[21,24]	[24,27]	[27,30]	[31,38]
孔隙比I	[0.63,0.72]	[0.72,0.81]	[0.81,0.90]	
压缩系数J/(MPa^{-1})	[0.15,0.21]	[0.21,0.27]	[0.27,0.33]	
压缩模量K/MPa	[5.5,8]	[8,10.5]	[10.5,13]	
湿密度L/(g·cm^{-3})	[1.88,1.92]	[1.92,1.96]	[1.96,2.00]	[2.00,2.04]
干密度M/(g·cm^{-3})	[1.34,1.45]	[1.45,1.56]	[1.56,1.67]	[1.67,1.78]
饱和度N/%	[60,70]	[70,80]	[80,90]	[90,100]
土粒比重O	[2.67,2.69]	[2.69,2.71]	[2.71,2.73]	[2.73,2.75]
液限P/%	[22,29]	[29,36]	[36,43]	[43,50]
塑限Q/%	[16,19]	[19,22]	[22,25]	[25,28]
沉降速率R/(mm·y^{-1})	[10,11.5]	[11.5,13]	[13,14.5]	[14.5,16]

关联规则数据挖掘可以发现属性组之间依赖关系，相关参数设置在关联规则挖掘中起到至关重要作用，参数决定了挖掘过程中每一步的遴选范围。其中Lift为提升度，当其大于1时，表明指标之间有强关联度。Leverage代表平衡度，当平衡度为0时则表明指标间相互独立，若其不为0，则表明指标间有关联，且值越大，指标间关联越强。Conviction是可信度，衡量前、后事件之间独立性。

本研究数据挖掘共产生了100条关联规则，置信度均大于0.9，置信度满足要求。部分空间关联规则如表8所示。规则1表明压缩模量在[10.5，13] MPa对应的压缩模量范围为[0.15，0.21] MPa^{-1}。规则4为双参数导向规则，孔隙比范围在[0.72，0.81]，沉降速率范围在[10，11.5]mm/a的钻孔对应的土样含水率为[23-27]%；规则7为多参数导向关联规则，湿密度为[1.92，1.96]g/cm^3，沉降为[11.5，13] mm/a，粉土厚度为[19，27] m的钻孔对应的孔隙比范围为[0.72，0.81]，所有规则的Lift（提升度）均大于1，表明参数之间同时存在不是偶然的，有强关联度。Leverage（平衡度）大于0，表明参数关系密切，可信度较大，结果可信。关联规则显示，宿州西站沿线地面沉降的主要影响因子有粉质黏土、黏土、粉土、含水率、密度、孔隙比、压缩系数、压缩模量等。

表8　空间关联规则

Table 8　Spatial association rules

序号	关联规则	提升度	平衡度	可信度
1	*K*3=>*J*1	1.71	0.11	10.37
2	*H*1=>*J*1	1.71	0.06	5.39
3	*R*4=>*J*4	1.71	0.05	4.98
4	*I*3，*R*1=>*H*2	1.77	0.05	4.8
5	*I*1，*R*4=>*L*3	1.81	0.04	4.02
6	*K*3，*R*1=>*J*1	1.71	0.04	3.73
7	*L*2，*R*2，*B*3=>*I*2	1.84	0.04	4.12
8	*L*2，*D*2=>*H*2	1.7	0.05	2.97

根据Apriori关联规则数据挖掘结果表明，地面沉降是由深度70 m范围地层所引发，其地层类型有第四系全新统（Q_4）第四系上更新统（Q_3），第四系中更新统（Q_2）。将每个地层按粉质黏土层、黏土层、粉土层分类，每个土层有六个指标（含水率、湿密度、孔隙比、压缩系数、压缩模量、厚度）。将323个钻孔数据按照54个指标离散，对每个分层指标平均值概化获取相应的概化区间。

指标探测的结果如表9所示，比较每一层图的六个指标影响力相加获得土层的总影响力，如图11

表9　指标探测结果

Table 9　Indicator detection results

指标	*q*	指标	*q*	指标	*q*
Q_4粉质黏土厚度	0.008 9	Q_4黏土厚度	0.006 8	Q_4粉土厚度	0.001 8
Q_4粉质黏土含水率	0.008 2	Q_4黏土含水率	0.020 4	Q_4粉土含水率	0.004 4
Q_4粉质黏土密度	0.015 1	Q_4黏土密度	0.011 4	Q_4粉土密度	0.017 3
Q_4粉质黏土孔隙比	0.003 0	Q_4黏土孔隙比	0.007 5	Q_4粉土孔隙比	0.029 9
Q_4粉质黏土压缩系数	0.021 0	Q_4黏土压缩系数	0.004 7	Q_4粉土压缩系数	0.000 2
Q_4粉质黏土压缩模量	0.010 6	Q_4黏土压缩模量	0.004 8	Q_4粉土压缩模量	0.001 4
影响力和	0.066 8		0.055 6		0.054 9
Q_3粉质黏土厚度	0.037 4	Q_3黏土厚度	0.025 7	Q_3粉土厚度	0.015 8
Q_3粉质黏土含水率	0.011 8	Q_3黏土含水率	0.020 9	Q_3粉土含水率	0.004 4
Q_3粉质黏土密度	0.018 1	Q_3黏土密度	0.012 8	Q_3粉土密度	0.017 3
Q_3粉质黏土孔隙比	0.003 0	Q_3黏土孔隙比	0.000 4	Q_3粉土孔隙比	0.029 9
Q_3粉质黏土压缩系数	0.021 3	Q_3黏土压缩系数	0.020 2	Q_3粉土压缩系数	0.000 5
Q_3粉质黏土压缩模量	0.018 5	Q_3黏土压缩模量	0.015 9	Q_3粉土压缩模量	0.001 7
影响力和	0.110 2		0.096 0		0.069 5
Q_2粉质黏土厚度	0.003 3	Q_2黏土厚度	0.009 4	Q_2粉土厚度	0.040 4
Q_2粉质黏土含水率	0.028 6	Q_2黏土含水率	0.022 3	Q_2粉土含水率	0.014 3
Q_2粉质黏土密度	0.005 8	Q_2黏土密度	0.029 0	Q_2粉土密度	0.040 1
Q_2粉质黏土孔隙比	0.025 7	Q_2黏土孔隙比	0.014 1	Q_2粉土孔隙比	0.008 1
Q_2粉质黏土压缩系数	0.012 0	Q_2黏土压缩系数	0.042 3	Q_2粉土压缩系数	0.013 6
Q_2粉质黏土压缩模量	0.050 0	Q_2黏土压缩模量	0.061 2	Q_2粉土压缩模量	0.017 7
影响力和	0.125 5		0.178 3		0.134 3

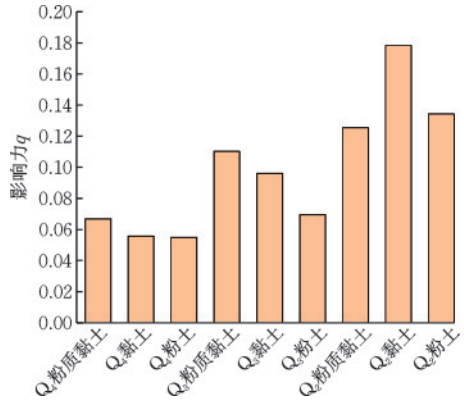


图11　土层指标影响力

Fig.11　Influence of soil layer indicators

所示。Q_2黏土(第四系中更新统黏土层)是影响研究区地面沉降的关键指标,其影响力大小之和为0.178 3。第四系中更新统各土层的的总影响力最大。

生态探测中选取的指标差异显著性分析的值均小于0.05,N表明俩者之间无显著差异性。黏土、粉质黏土和粉土之间均存在显著性关系,这也表明这些参数指标对宿州西的沉降都有一定的影响。

交互作用探测结果均为双因子增强与非线性增强,指标热力图为54个指标间的相互作用,通过颜色表征对研究目标贡献最大的因子组合(图12)。图中颜色越红越深表明其交互作用越强,不同指标之间的交互作用q值都大于单一因子的q值,这说明地表沉降的空间分异是多因子共同作用的结果。交互作用最强的组合为Q_2黏土厚度和Q_2黏土密度组合(0.275),因子之间都存在交互作用,无相互独立的指标。具体交互指标大小如图12所示。

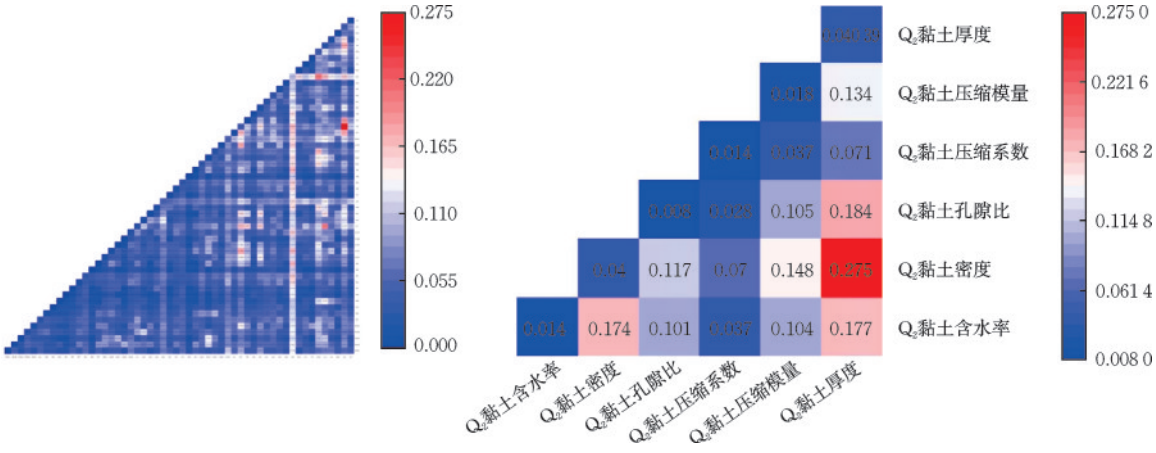


图12　交互指标热力图

Fig.12　Interaction indicator heatmap

风险探测结果如表10所示,其中:第四系全新统Q_4黏土含水率在31%~38%的钻孔对应的地面沉降速率均值为−14.133 mm/a,第四系上更新统Q_3粉质黏土压缩模量在3~9 MPa对应的地面沉降速率均值为−14.49 mm/a,第四系中更新统Q_2黏土厚度在20~30 m对应的地面沉降速率均值最大,为−15.22 mm/a,表明第四系中更新统黏土厚度是影响地面沉降的关键要素。

Q_2黏土具备高含水量、高孔隙比,孔隙结构中大量水承担了颗粒间支撑作用,一旦水被抽走,结构容易塌缩。低渗透系数(k极小)水排出非常缓慢,属于典型的固结控制型土层。高压缩指数(Cc)与高固结压缩性同等应力变化下,黏土的体积变化远大于砂土或粉土,是引发沉降的主要“变形层”。因此,Q_2黏土是高可压缩、排水慢、变形受水压力控制的关键层。

表10　沉降严重区域对应指标类型及范围区间

Table 10　Corresponding indicator types and ranges for areas with severe ground subsidence

评价指标	地面沉降严重区域对应范围	地面沉降速率均值
Q_4黏土含水率	31%~38%	−14.133 mm/a
Q_3粉质黏土压缩模量	3~9 MPa	−14.49 mm/a
Q_2黏土厚度	20~30 m	−15.22 mm/a

6　结　论

本文依托宿州西水源区323个地质钻孔资料,提出了融合多种InSAR遥感监测技术,基于Apriori空间关联规则与Geodetector算法,获得了控制区域地面沉降的关键地层及相关参数。主要结论如下:

(1)InSAR融合方法可以剔除弱地物散射区域监测精度衰减的PS点数据并采用SDFPT像素点数据,PS点的密度由原来的375个/km²提高至858个/km²,提高128.8%;在非建成区,监测点密度由原来的348个/km²提高至1 261个/km²,提高262.3%。

(2)研究表明Q_2黏土(第四系中更新统黏土层)是影响研究区地面沉降的关键指标,其影响力大小为0.178 3,从工程地质层上来看,第四系中更新统各土层的总影响力之和最大0.438 1,其影响力远大于其余地质层。

(3)研究所选取的指标互相之间均为双因子增强及非线性增强关系。交互作用最强的组合为Q_2黏土厚度和Q_2黏土密度组合(0.275)。由此,各因子之间对宿州地面沉降速率的影响不是简单的叠加效应。风险探测结果得到了沉降速率较大区对应的指标范围及其平均沉降速率,其中第四系中更新统Q_2黏土厚度在20~30 m对应的地面沉降速率均值最大,为−15.22 mm/a。

(4)研究表明Q_2黏土是影响研究区地面沉降的关键指标,其影响力大小为0.178 3,从工程地质层上来看,第四系中更新统各土层的总影响力之和最大0.438 1,其影响力远大于其余地质层。交互作用最强的组合为Q_2黏土厚度和Q_2黏土密度组合(0.275)。因此第四系中更新统是影响宿州西站沿线地面沉降的主要工程地质层,其中的第四系中更新统黏土层为关键地层。

参考文献:

[1] Duan G, Gong H L, Chen B B, et al.Spatiotemporal heterogeneity of land subsidence in Beijing[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 15120.

[2] Yu M, Hanssen R F. Deformation parameter estimation in low coherence areas using a multisatellite InSAR approach[J]. IEEE Transactions on Geoence and Remote Sensing, 2013, 53(8): 249-252.

[3] Hooper A, Segall P, Zebker H. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos[J]. Journal of Geophysical Research - Solid Earth, 2007, 112(B7): B07407

[4] Gama F F, Paradella W R, Mura J C. Advanced DINSAR analysis on dam stability monitoring: A case study in the Germano mining complex (Mariana, Brazil) with SBAS and PSI techniques[J]. Remote Sensing Applications, 2019, 16(1): 100267.

[5] 姜德才,张继贤,张永红,等.百年煤城地表沉降融合PS/SBAS InSAR监测:以徐州市为例[J].测绘通报,2017(1):58-64.
Jiang D C, Zhang J X, Zhang Y H, et al. Ground deformation over century-long coal mining city monitored through incorporating both PS and SBAS InSAR: A case study of Xuzhou.[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(1): 58-64. (in Chinese)

[6] 叶超,田芳,罗勇,等.北京地面沉降控制区划及防控措施[J].南京大学学报(自然科学),2019, 55(3):440-448.
Ye C, Tian F, Luo Y, et al. Control zoning and prevention measures on land subsidence in Beijing[J].Journal of Nanjing University(Natural Science), 2019, 55(3): 440-448. (in Chinese)

[7] Li J, Gao F, Lu J. Deformation monitoring and prediction for residential areas in the Panji mining area based on an InSAR time series analysis and the GM-SVR model[J]. Open Geosciences, 2019, 11(1): 738-749.

[8] Luca C D, Zinno I, Manunta M. Large areas surface deformation analysis through a cloud computing P-SBAS approach for massive processing of DInSAR time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 3-17.

[9] Novellino A, Cigna F. Sowter a exploitation of the Intermittent SBAS (ISBAS) algorithm with COSMO-SkyMed data for landslide inventory mapping in northwestern Sicily, Italy[J]. Geomorphology, 2017, 280(MAR.1): 153-166.

[10] Liu X, Wang Y, Yan S. Ground deformation associated with exploitation of deep groundwater in Cangzhou City measured by multi-sensor synthetic aperture radar images[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(1): 6.

[11] Pasquali P. Mapping of ground deformations with interferometric stacking techniques[M]. Land Applications of Radar Remote Sensing. Rijeka: InTech. Jun. 11, 2014. doi: 10.5772/58225.

[12] 聂运菊,熊佳诚,程朋根,等.结合PS特征点的SBAS地表形变监测[J].测绘通报,2020(4):91-95.
Nie Y J, Xiong J C, Cheng P G, et al. SBAS surface deformation monitoring with PS feature points[J].Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(4): 91-95. (in Chinese)

[13] 张凯翔,张占荣,于宪煜.SBAS-InSAR和PS-InSAR技术在鲁西南某线性工程沿线地面沉降成因分析中的应用[J].中国地质灾害与防治学报2022, 33(4):

65-76.
Zhang K X, Zhang Z R, Yu X Y. Application of SBAS-InSAR and PS-InSAR tech nologies in analysis oflandslide subsidence along a linear infrastructurein Southwestern Shandong[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 65-76. (in Chinese)

[14] 种亚辉,董少春,胡欢.基于时序InSAR技术的常州市地面沉降监测与分析[J].高校地质学报,2019,25(1):131-143.
Zhong Y H, Dong S C, Hu H. Land subsidence monitoring and analysis in Changzhou based on time series interferometry methods[J]. Geological Journal of China Universities, 2019,25(1): 131-143. (in Chinese)

[15] 程霞,张永红,邓敏,等.Sentinel-1A卫星的黄河三角洲近期地表形变分析[J].测绘科学,2020,45(2):43-51.
Cheng X, Zhang Y H, Deng M, et al. Analysis of recent surface deformation of the Yellow River delta based on Sentinel-1A satellite[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(2): 43-51. (in Chinese)

[16] 陈媛媛,朱晨玮,郑加柱,等.基于PS-InSAR与SBAS-InSAR的地面沉降监测分析:以长江南京段沿江区域为例[J].人民长江,2023,54(8):160-165.
Chen Y Y, Zhu C W, Zheng J Z, et al. Comparison and analysis on land subsidence based on PS-InSAR and SBAS-InSAR: case of Nanjing riparian area along Chanjiang River[J]. Yangtze River, 2023, 54(8): 160-165. (in Chinese)

[17] Chao B Z, Xue X, Yang Z, et al. An improved association rule mining-based method for revealing operational problems of building heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems [J]. Applied Energy, 2019: 253.

[18] Jiang F, Kit R Y K, Wai M L E. Analysis of motorcycle accidents using association rule mining-based framework with parameter optimization and GIS technology [J]. Journal of Safety Research, 2020, 75: 292-309.

[19] Jayababu Y, G P S Varma, A Govardhan. Incremental topological spatial association rule mining and clustering from geographical datasets using probabilistic approach [J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2016, 30(4): 510-523.

[20] 卢浩,孙善政,施烨辉,等.基于Apriori算法对地面沉降影响因素的数据挖掘及分析[J].隧道建设(中英文),2018,38(增2):104-110.
Lu H, Sun S Z, Shi Y H, et al. Data mining and analysis of influence factors for ground settlement based on apriori algorithm [J]. Tunnel Construction, 2018, 38 (Sup2): 104-110. (in Chinese)

[21] Han J, Wang J, Chen L, et al. Driving factors of desertification in Qaidam Basin, China: An 18-year analysis using the geographic detector model[J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107404. (in Chinese)

[22] Liu X, Wang H, Wang X, et al. Driving factors and their interactions of carabid beetle distribution based on the geographical detector method[J]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108393. (in Chinese)

[23] Gao J, Jiang Y, Anker Y. Contribution analysis on spatial tradeoff/synergy of Karst soil conservation and water retention for various geomorphological types: Geographical detector application[J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107470. (in Chinese)

[24] Fan Z, Duan J, Lu Y, et al. A geographical detector study on factors influencing urban park use in Nanjing, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 59: 126996. (in Chinese)

[25] 石鹏远,余洁,朱琳,等.应用地理探测器改进地面沉降危险性评估模型的研究[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(3):101-112.
Shi P Y, Yu J, Zhu L, et al. Hazard assessment model of land subsidence based on geographical detector[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2019, 30(3): 101-112. (in Chinese)

[26] 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001(2009年版)[S].北京:北京中国建筑工业出版社,2009.

(本文编辑:苏泽云)