

# 直推钻进钻遇有机污染地层微观特征试验研究

邓盈盈<sup>1,2,3</sup>, 孙平贺<sup>\*1,2,3</sup>, 曹函<sup>1,2,3</sup>, 杨涵涵<sup>4</sup>,  
吕岩<sup>1,2,3</sup>, 张航盛<sup>1,2,3</sup>, 张晨<sup>1,2,3</sup>, 蒲英杰<sup>1,2,3</sup>

- (1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 湖南长沙 410083;  
2. 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 湖南长沙 410083;  
3. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;  
4. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南宁乡 410600)

**摘要:**直推钻进技术具有无冲洗介质、速度快、扰动小等优点,但是易受到有机污染场地土体工程性质差异等因素干扰,造成钻孔倾斜等现象。有机污染物会改变土体微观结构,导致土体工程性质发生变化,进而降低直推钻进取样点位精度。选取典型的有机污染物甲苯和四氯乙烯,制备不同污染浓度(甲苯浓度:75、120和672 mg/kg;四氯乙烯浓度:11、53和183 mg/kg)的土样来模拟钻遇的有机污染地层。通过XRD、扫描电镜、接触角和低温氮气吸附脱附试验探究土样在不同有机污染物浓度影响下微观结构的变化规律。SEM图像分析与氮气吸附脱附试验结果表明:甲苯、四氯乙烯对土样的包裹作用和化学破坏作用会让土颗粒团聚、比表面积减小、小孔隙数量明显增多、土体孔体积减小;其中粘粒含量最高为30.28%的2号土样在受672 mg/kg甲苯和183 mg/kg四氯乙烯污染后比表面积分别减小了30.70%和33.40%, Pearson相关系数 $r=0.382$ 说明粘粒含量与比表面积减小率存在一定的正相关性。由于非极性分子甲苯、四氯乙烯对土颗粒的包裹作用,隔绝了土样的亲水性基团,导致土样亲水性变差、接触角增大。本研究表明有机污染物会导致土体微观特征的改变,最终会导致有机污染地层非均质性增强,进而会对直推钻进轨迹产生影响。

**关键词:**有机污染物;土体微观结构;接触角试验;氮气吸附脱附试验;直推钻进

**中图分类号:**P634:X83 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)03-0027-10

## Experimental study on microcosmic characteristics of organic polluted formations encountered by direct push drilling

DENG Yingying<sup>1,2,3</sup>, SUN Pinghe<sup>\*1,2,3</sup>, CAO Han<sup>1,2,3</sup>, YANG Hanhan<sup>4</sup>,  
LÜ Yan<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Hangsheng<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Chen<sup>1,2,3</sup>, PU Yingjie<sup>1,2,3</sup>

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China;  
2. Key Laboratory of Non-Ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Changsha Hunan 410083, China;  
3. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;  
4. Changsha General Survey of Natural Resources Center, Ningxiang Hunan 410600)

**Abstract:** Direct push drilling technology has the advantages of no flushing medium, fast speed, small disturbance, etc., but it is susceptible to the interference of factors such as large differences in the engineering properties of the soil at the site of organic contamination, resulting in tilting of the borehole and other phenomena. Organic pollutants will

收稿日期:2024-03-22; 修回日期:2024-05-01 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.03.004

基金项目:国家重点研发计划课题“污染场地土层精准控制液压推进系统研发”(编号:2020YFC1807203)

第一作者:邓盈盈,女,汉族,2001年生,博士研究生在读,地质工程专业,湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号,dyying@csu.edu.cn。

通信作者:孙平贺,男,汉族,1982年生,教授,博士生导师,主要从事钻探科学与技术的相关教学与科研工作,湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号,pinghesun@csu.edu.cn。

引用格式:邓盈盈,孙平贺,曹函,等.直推钻进钻遇有机污染地层微观特征试验研究[J].钻探工程,2024,51(3):27-36.

DENG Yingying, SUN Pinghe, CAO Han, et al. Experimental study on microcosmic characteristics of organic polluted formations encountered by direct push drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 27-36.

change the microstructure of the soil, resulting in changes in soil engineering properties, which in turn reduces the accuracy of direct drilling sampling points. Typical organic pollutants toluene and perchloroethylene were selected, and soil samples with different pollutant concentrations (toluene: 75, 120 and 672 mg/kg; perchloroethylene: 11, 53 and 183 mg/kg) were prepared to simulate the drilling encountered with the organically contaminated stratum. XRD, SEM, contact angle and nitrogen adsorption and desorption tests were carried out to investigate the changing rules of microstructure of the soil samples under the influence of different organic pollutant concentrations. The results of the SEM image analysis and nitrogen adsorption and desorption tests showed that: toluene and perchloroethylene encapsulated and chemically damaged soil samples, resulting in the agglomeration of soil particles, the reduction of the specific surface area, the obvious increase in the number of small pores, and the decrease in the pore volume of soil; the content of clay particles was 30.28% at the highest level. The highest clay content of 30.28% in soil sample 2# after 672mg/kg toluene and 183mg/kg tetrachloroethylene contamination, the specific surface area decreased by 30.70% and 33.40%, respectively, and the Pearson's correlation coefficient of  $r=0.382$  indicates that there is a certain positive correlation between the content of clay particles and the rate of reduction of the specific surface area. Meanwhile, due to the wrapping effect of non-polar molecules toluene and perchloroethylene on the soil particles, the hydrophilic groups of the soil samples were isolated, resulting in the deterioration of the hydrophilicity of the soil samples and the increase of the contact angle. This study suggests that organic pollutants can lead to changes in the microscopic characteristics of the soil, which ultimately leads to an increase in the non-homogeneity of the organically contaminated strata, which in turn can have an impact on the direct push drilling trajectory.

**Key words:** organic pollutant; soil microstructure; contact angle test; nitrogen adsorption desorption test; direct push drilling

## 0 引言

随着我国工业化、城市化进程的不断加快,我国土地污染情况日渐突出,工业企业的搬迁也遗留了大量污染土地<sup>[1]</sup>。有机化合物作为化工、石油加工、农药生产等行业中的加工原料、生产副产品或最终产物,均对环境产生有机污染<sup>[2-5]</sup>,其中农药使用造成年均污染农田 87~107 万公顷(1公顷=10000 m<sup>2</sup>,下同)<sup>[4]</sup>。这些大量的有机污染物以挥发性、半挥发性有机物为主<sup>[3]</sup>,在有机污染土地再开发利用过程中会对人体健康产生严重危害。因此对有机污染场地开发前需要进行环境地质调查与评估<sup>[6]</sup>,《中华人民共和国土壤污染防治法》和《土壤污染防治行动计划》等法律明确了污染场地修复及再利用要求<sup>[7]</sup>,而钻探技术是获取有机污染场地样品的重要手段。

直推钻探技术是污染场地勘察中能直接获取地层样品的重要技术之一,具有无冲洗介质、速度快、样品扰动小等优点<sup>[8-9]</sup>。由于化工厂搬迁遗留的有机污染场地往往含有大量建筑废渣,在实际直推钻探施工时由于时间和经济成本问题无法对废渣进行彻底清理,同时因为污染场地土体工程性质在空间分布上差异大,当直推钻遇高异质地层时会引起钻进速率突变,甚至会产生钻头损坏、钻孔偏斜和孔径不均等现象。这些现象会进一步导致污

染土取样点位发生偏差,极大降低污染物调查结果的准确度和可信度<sup>[10]</sup>。有机污染场地的土体工程性质在空间分布上差异大是由于污染物浓度空间分布极不均匀,而土体微观特征又是反映土体性质的根本,因此研究有机污染地层的污染物浓度与污染土微观特征之间的关系尤为重要。

土体孔隙、比表面积、孔径和接触角等指标是土体微观结构的重要特征<sup>[11-12]</sup>。土体的孔隙数量、体积、平均孔径对于土体弹性模量、泊松比、峰值强度、压缩系数等参数影响均十分显著<sup>[13-14]</sup>。通常采用X射线衍射和SEM等方法综合讨论土体矿物成分,在已知土体矿物成分基础上,可采用SEM对土体孔隙特征、土颗粒接触形式变化进行机理分析<sup>[15]</sup>。

有学者研究表明,通过SEM图像可以观察到土体受污染时,土颗粒接触形式增多、孔隙体积增加、大孔隙数量增加<sup>[16-17]</sup>;还可以观察到受有机农药污染时,土体孔隙先增大后减小的现象<sup>[18]</sup>。在SEM图像观察土体孔隙特征的基础上,进一步对SEM图像进行二值化处理可得土颗粒及孔隙分布等几何参数和分形维数,可用来表征土体孔隙率和渗透率<sup>[19-21]</sup>,但该方法适用于土体粗颗粒的孔径分布研究,对于粘粒拟合效果不佳<sup>[22]</sup>。测量土体比表面积的方法有压汞法、乙二醇乙醚吸附法,但上述方法

存在不易操作、易破坏粒间孔隙的问题<sup>[23-25]</sup>,而低温氮气吸附脱附法对比表面积的测量相对精确。有学者采用低温氮气吸附脱附试验,基于BET多分子层吸附理论和BJH模型计算得到孔隙比表面积、孔径分布等,对粘土内孔隙的分布情况进行评价<sup>[23, 26-27]</sup>。接触角大小可用来反应土体亲水性,土体中不同矿物成分的接触角差异极大:白云母与纯水接触角116°、 $\alpha$ 石英接触角为29°、正长石接触角为36°<sup>[28]</sup>、蒙脱石亲水性极好,接触角趋近于0。同时有研究表明:土壤有机碳、烃类污染物等均会对土体接触角产生影响,例如疏水材料能降低土体表面自由能、削弱土体亲水性<sup>[29]</sup>;碳氢化合物污染同样会降低土体亲水性,增大土体接触角<sup>[30]</sup>。

基于上述研究,为了探究有机污染物浓度与土体微观特征之间的关系,本文选取具有代表性的甲苯和四氯乙烯作为有机污染物,制备不同污染物浓度的土样来模拟直推钻进钻遇的异质性污染地层,通过XRD、扫描电镜、接触角和低温氮气吸附脱附试验研究了污染物对土体孔隙特征、接触角、比表面积和平均孔径的变化规律,并分析了有机污染物改变土体微观特征的作用机理。

## 1 主要试验材料及试验设备

### 1.1 土体材料

本文依托江苏省常州市某有机污染场地调查项目,选取该污染场地同一土体的无污染部分作为试验材料,取土范围为地表下1.5~3.0 m,去除土中塑料、草木根系、砂石等杂质后存于取土袋中作为1号土样备用。为控制土体的其它影响因素,在1号土样的基础上,加入不同量的粗粒、粘粒充分混合均匀,得到不同粘粒含量的2号、3号土样。测得1、2、3号土样的粘粒含量分别为27.78%、30.28%和15.30%,即2号土样的粘粒含量最高,且3种土样均属于低液限粘土。

### 1.2 试验有机污染物的选择

对现场污染土样开展分析,得到的现场污染土有机污染物分析结果见表1。现场土样有机污染物检出率与我国有机污染场地中污染物出现频率居前二的卤代烃(57%)、苯系物(44%)相符合。为保证试验所选有机污染物具备一定代表性,同时能够模拟不同的常见有机污染物残留对土体微观特性的影响,最终选取甲苯和四氯乙烯作为污染物,分

别代表典型有机挥发性污染物中的苯系物和卤代烃进行室内试验。

表1 现场污染土样有机污染物分析结果

Table 1 Results of organic pollutant analysis of on-site contaminated soil samples

检测项目	浓度范围(mg·kg <sup>-1</sup> )		检出率/ %
	最小值	最大值	
四氯化碳	<LOR	0.28	6.00
1,2-二氯丙烷	<LOR	2460	65.26
四氯乙烯	<LOR	453	53.11
氯苯	<LOR	7.46	2.27
甲苯	<LOR	1940	65.26
乙苯	<LOR	233	20.94
苯乙烯	<LOR	51.7	1.61
间-二甲苯和对-二甲苯	<LOR	32.6	8.06
邻二甲苯	<LOR	10.5	4.84
三氯甲烷(氯仿)	<LOR	5.9	11.32

室内采用的甲苯、四氯乙烯均为分析纯。甲苯(分子式C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub>)是一种无色、带有特殊芳香气味的易挥发液体,不溶于水,其进入场地土壤后易在浅层发生扩散、运移,并且可被土体吸附。四氯乙烯(分子式C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>)是一种有氯仿样气味且不溶于水的无色液体,其进入场地土壤后发生的扩散运移范围相对甲苯运移范围更广。

试验中土体的污染物浓度设定参考《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018),土体中甲苯浓度分别设定为75、120、672 mg/kg三种,四氯乙烯浓度分别设定为11、53、183 mg/kg三种。

### 1.3 试验仪器

Rise-2002型激光粒度分析仪、DHG-9240A型鼓风干燥箱、TESCAN CLARA型扫描电子显微镜、XBD5000型万能试验机、3H-2000PS1型比表面及孔径分析仪、ZETA-METER4.0型Zeta电位仪、JCR型接触角测试仪。

## 2 试验分析方法

### 2.1 试样制备

无污染土样制备:将土体烘干碾碎并过2 mm筛,向土中加入设计含水率所需质量的去离子水混合均匀,装入密封袋放置在标准养护室(24 °C

±2℃、相对湿度>95%)养护48h,使土体内部水分均匀。

有机污染土样制备:取适量养护48h后的无污染土样称重,根据浓度计算得到所需甲苯或四氯乙烯质量,用移液枪量取甲苯或四氯乙烯加入土样中并充分混合,然后将污染土样放置在通风橱中老化2h。用气相色谱质谱联用仪(图1)检测制备的有机污染土样,以保证配制甲苯、四氯乙烯浓度精确的试验土样,图2是通过浓度检测的污染土样压制处理得到的污染土圆饼试样。

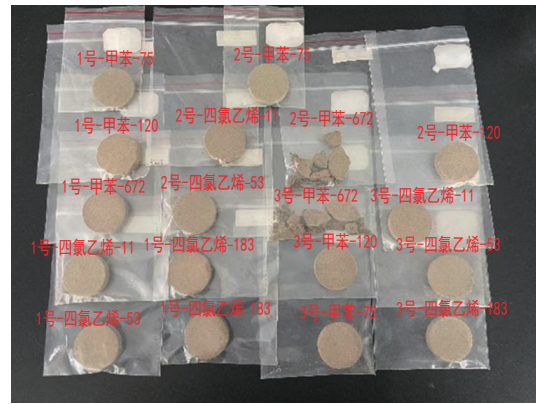


图2 不同浓度污染土圆饼试样

Fig.2 Samples of contaminated soil cake with different concentrations



图1 气相色谱质谱联用仪

Fig.1 Gas chromatography mass spectrometer

### 2.2 土样XRD分析

对土样进行XRD测试,得到的衍射图如图3所示。可见该土样的主要矿物成分为石英、云母、蒙脱石、闪石、绿泥石、长石和方解石。

### 2.3 扫描电镜试验

处理1、2和3号土样,制成甲苯浓度为75、120、672 mg/kg和四氯乙烯浓度为11、53、183 mg/kg的有机污染土样共18个,对污染土样及未污染土样进行扫描电镜观察,基于SEM图像直接定性地对土颗粒接触形式、孔隙变化进行分析。试验时对风干后的土体样品进行喷金处理实现土体的导电性,将处理好的样品放置于仪器中并抽真空,选取合适的区域进行观察拍摄。

### 2.4 接触角试验

土体接触角测量需要准备去离子水、表面平整的土样。首先配制甲苯浓度为400 mg/kg的土样和

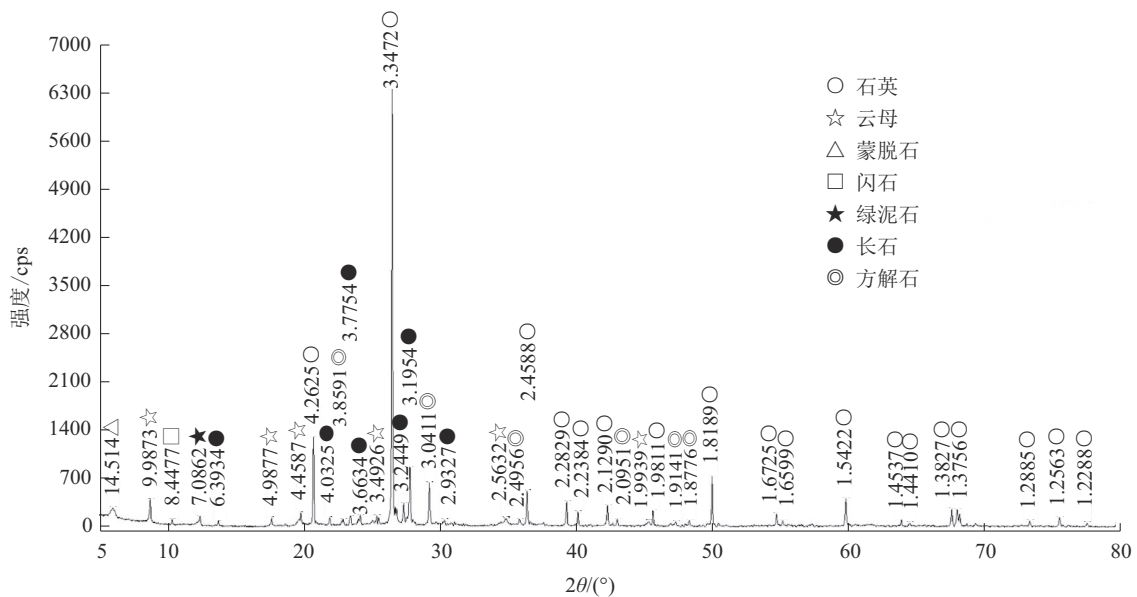


图3 土样XRD衍射图

Fig.3 XRD diffractogram of soil sample

四氯乙烯浓度为 100 mg/kg 的土样,用万能试验机将污染土样和无污染土样在相同压力下压实,经 48 h 风干后得到土体圆饼样品。然后使用 JCR 型接触角测试仪测量土样接触角,控制仪器每隔 10 ms 进行连续图像采集。

由于去离子水滴接触到土样表面后会迅速渗入土体圆饼样品,而且去离子水滴在滴落时其形态为不标准弧形,因此选择切线法通过虚拟圆拟合计算土体动态接触角  $\theta$ (见图 4)。

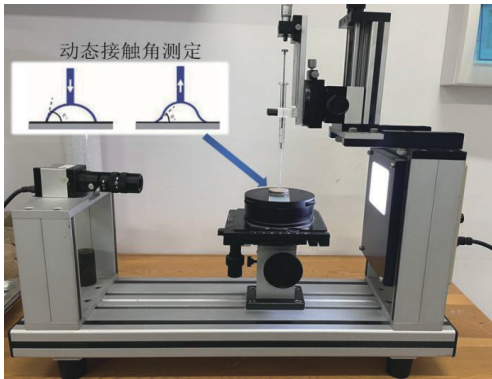


图 4 土体样品接触角测算

Fig.4 Contact angle measurement of soil samples

### 2.5 低温氮气吸附脱附试验

为了进一步验证扫描电镜图象的分析结果,开展了低温氮气吸附脱附试验,再基于 BET(Brunauer-Emmet-Teller)公式<sup>[31]</sup>计算土颗粒比表面积、BJH(Barret-Joyner-Halenda)理论<sup>[32]</sup>计算土体孔径孔容分布。

试验时,调整减压阀输出压力为 0.34 MPa,打开比表面积及孔径分析仪,调整压力传感器偏移量极值设定为高压 1000 Pa、低压 100 Pa 和超低压 10 Pa,调整低温修正因子至 0.0479、扣除比例为 1,称样后在 150 °C 下对样品脱气 3 h 并测量脱气后质量,然后在 77.3 K(-196 °C)温度下进行氮气吸附脱附测试,测试时用液氮保持样品管温度恒定。

## 3 结果分析

### 3.1 扫描电镜图像分析

图 5 为无污染土样的 SEM 图像(5000 倍)。可观察到无污染土体颗粒间以面-面接触为主(图中红色圆所示),颗粒表面较为平整、边缘分明,土样存在体积较大的孔隙(图中红色箭头所示),且 3 种土样中均存在颗粒大小不均匀的现象。

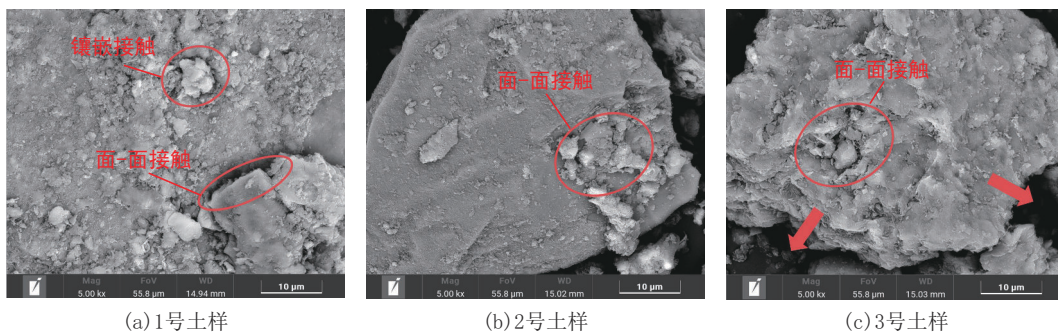


图 5 无污染土样的 SEM 图像(5000 倍)

Fig.5 SEM images of uncontaminated soil samples (5000X)

图 6 是具有代表性的有机污染土样 SEM 图像(10000 倍),图中可见随着甲苯、四氯乙烯浓度增加,3 号土样和 2 号土样颗粒边缘由破碎变得圆滑,部分细粒之间链接形成团聚体,在其余 12 个土样中也存在同样的规律。这是由于土体中的蒙脱石等矿物层间具有纳米空间、比表面积大,其吸附甲苯、四氯乙烯后,发生粘土层间距增加的类膨胀作用导致的。

同时还可以发现,随着污染物浓度增加,图中箭头所示孔隙变小,小孔隙数量明显增多,这是由于污染物对土样孔间胶质的化学作用导致孔隙坍塌,总体上小孔隙数量增多。

### 3.2 接触角分析

接触角试验结果(图 7)显示:无污染 1、2、3 号土样的接触角分别为 25.5°、16.3°、18.7°,虽然 3 种土样接触角大小存在差异,但接触角均小于 90°,表现为

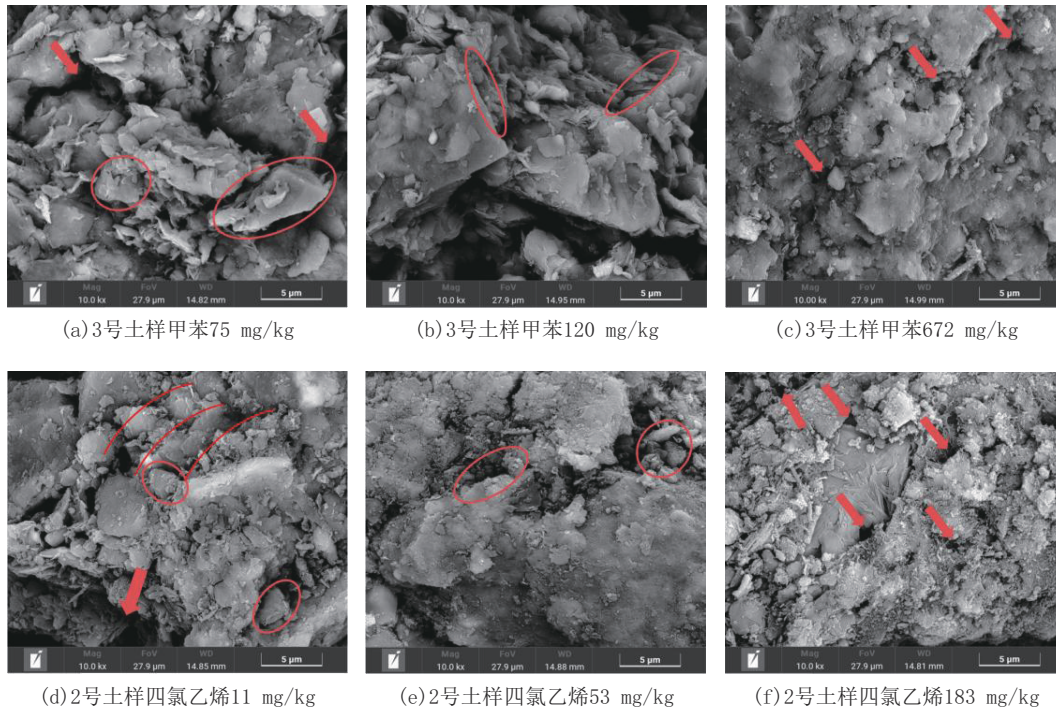


图6 污染土样的SEM图像(10000倍)

Fig.6 SEM images of contaminated soil sample (10000X)

良好的亲水性。结合XRD结果分析这是由于1、2、3号土样中主要矿物蒙脱石的含量不同,而蒙脱石具有较强的亲水性,可以推测当土样蒙脱石含量高,土样的亲水性越好,土样的接触角越小。

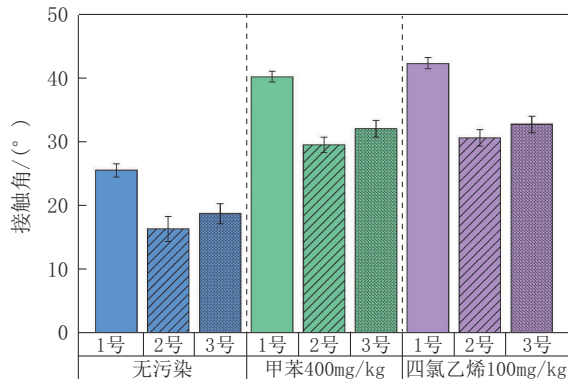


图7 1、2、3号土样在不同污染条件下的接触角

Fig.7 Contact angle of soil samples 1, 2 and 3 under different contamination conditions

由图7可知,1、2、3号土样在受到400 mg/kg 甲苯和100 mg/kg 四氯乙烯污染后接触角呈增大趋势,1、2、3号土样的接触角平均增加了16.25°、14.2°和14.55°。这是因为甲苯、四氯乙烯都是疏水的非极性分子,当甲苯、四氯乙烯污染土样时,粘土颗粒

的亲水性基团会因为甲苯、四氯乙烯分子的包裹作用与外界隔开,导致污染土样的接触角明显增大。结合本文试验结果以及游阳等<sup>[29]</sup>、SOFINSKAYA等<sup>[30]</sup>的研究推测其他非极性有机污染物也有削弱土体亲水性、增大土体接触角的作用。

### 3.3 土体比表面积分析

根据低温氮气吸附脱附试验数据,利用BET公式计算得到1、2、3号土样在不同污染条件下的土体比表面积如图8所示。从图中可以看出,甲苯浓度增加到672 mg/kg、四氯乙烯浓度增加到183 mg/kg时,1、2、3号土样的比表面积均减少,这是由于甲苯、四氯乙烯分子的包裹作用使得原本松散的土颗粒变得接触更为紧密,颗粒出现团聚现象,使得土颗粒比表面积减小。同时由于进行低温氮气脱附吸附试验时,土样中的甲苯、四氯乙烯少量挥发,黏土样品对于挥发的甲苯、四氯乙烯气体存在吸附作用,因此甲苯、四氯乙烯与氮气形成竞争吸附关系。当土样中甲苯、四氯乙烯浓度增加时,竞争吸附使得氮气吸附量有所减少,因此测得土样比表面积也随着浓度增加而减少。

可以发现未被污染的2号土样比表面积最大,推测是由于2号土样中粘粒含量最高,未被污染时

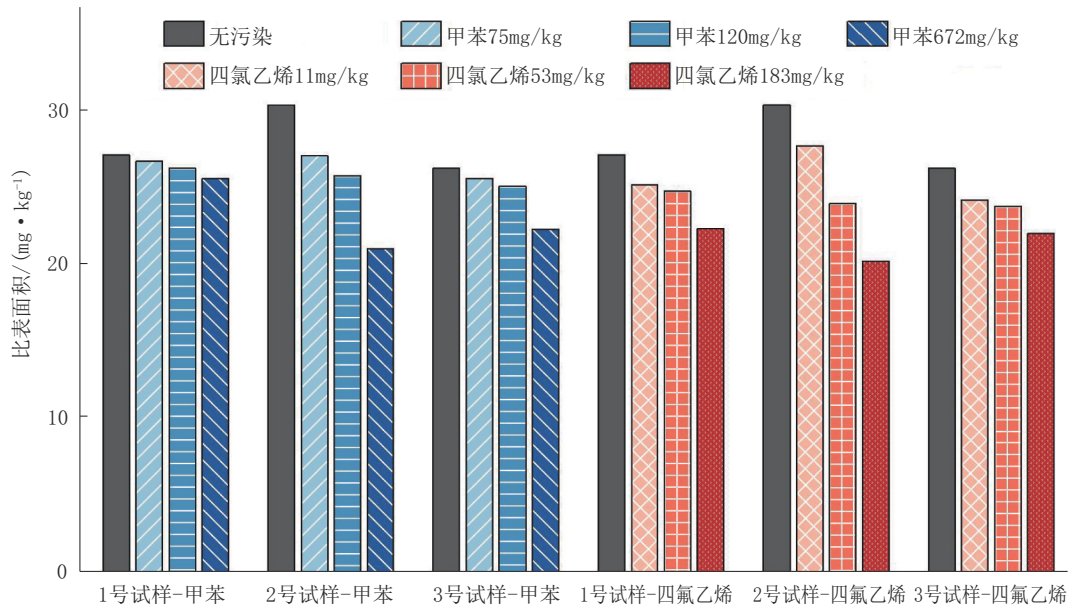


图8 1、2、3号土样在不同污染条件下的土体比表面积

Fig.8 Specific surface area of soil samples 1,2 and 3 under different pollution conditions

粘粒相对分散,表现为比表面积最大。当1、2、3号土样受到672 mg/kg甲苯的污染后比表面积分别减小了5.69%、30.70%和8.64%;受到183 mg/kg四氯乙烯污染后比表面积分别减小了17.61%、33.40%和16.13%,可以发现2号土样被污染前后比表面积减小率最大,是同条件下1、3号土样减小率的2倍左右。为进一步分析土样粘粒含量与比表面积减小率之间的关系,绘制了如图9所示的两者的关系曲线,并利用SPSS软件计算得到比表面积减小率与粘粒含量的Pearson相关系数 $r=0.382$ ,这说明粘粒含量与比表面积减小率存在一定的正相关性,可认为2号土样粘粒含量最大是2号土样污染前后比表面积减小率最大的影响因素之一。

### 3.4 土体孔径孔容分析

根据BJH理论处理低温氮气吸附脱附试验数据得到不同污染土样孔径孔容分析结果如表2所示。

结果显示污染土样最可几孔直径(出现几率最大的孔隙直径)在2.9483~4.3603 nm之间、以4 nm左右为主。表中结果显示甲苯、四氯乙烯污染物的掺入对于土样的最可几孔直径无明显影响规律,其主要由土样原本身质决定。而甲苯、四氯乙烯污染浓度升高时,污染土样的累计孔体积减小,主要原因为孔骨架被污染物破坏同时细粒填充了部分孔

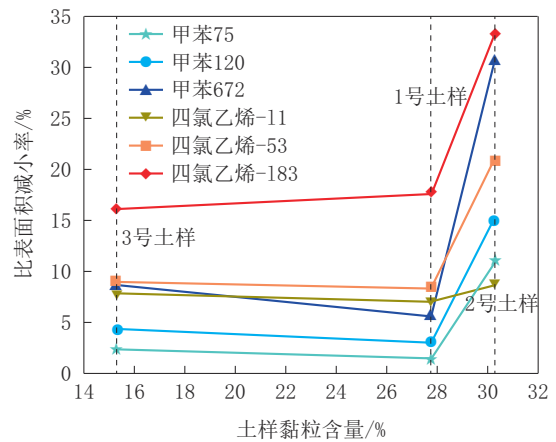


图9 土样比表面积减小率与粘粒含量的关系

Fig.9 Plot of reduction rate of specific surface area of soil samples versus clay content

隙,导致累积孔体积减小。

对比平均孔直径数据可以发现:甲苯浓度从75 mg/kg增加到672 mg/kg时,1号土样的平均孔直径从16.9756 nm减小到16.0580 nm、2号土样的平均孔直径从23.7397 nm减小到14.3866 nm;四氯乙烯浓度从11 mg/kg增加到183 mg/kg时,1号土样的平均孔直径从14.39926 nm减小到12.8703 nm、2号土样的平均孔直径从26.2369 nm减小到17.4687 nm、3号土样的平均孔直径从14.87799 nm减小到14.8262 nm。而3号土样在甲苯低浓度时呈现平均

表2 土样孔径孔容分析结果

Table 2 Results of pore size and pore volume analyses of soil samples

试验土样编号	累计孔体积/( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	平均孔直径/nm	累计孔面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	最可几孔直径/nm
1号—甲苯75	0.1305	16.9756	30.7500	3.9608
2号—甲苯75	0.1792	23.7397	28.6637	3.9274
3号—甲苯75	0.1095	14.7687	29.6573	3.9403
1号—甲苯120	0.1036	14.1338	29.3197	3.9476
2号—甲苯120	0.1037	16.6417	24.9254	3.9469
3号—甲苯120	0.1015	14.4376	27.5181	3.9579
1号—甲苯672	0.1043	16.0580	25.9808	3.9417
2号—甲苯672	0.1021	14.3866	29.3085	2.9483
3号—甲苯672	0.1893	25.4835	29.7134	3.9424
1号—四氯乙烯-11	0.1052	14.3992	29.2238	3.9556
2号—四氯乙烯-11	0.1950	26.2369	29.7291	3.9130
3号—四氯乙烯-11	0.1087	14.8779	29.2245	3.9503
1号—四氯乙烯-53	0.0658	13.1227	20.0568	3.9296
2号—四氯乙烯-53	0.0621	12.2032	20.3554	4.3603
3号—四氯乙烯-53	0.1019	14.3672	28.3702	3.9505
1号—四氯乙烯-183	0.0840	12.8703	26.1066	3.9529
2号—四氯乙烯-183	0.1180	17.4687	27.0198	3.9450
3号—四氯乙烯-183	0.1006	14.8262	27.1412	3.9536

孔直径减小,甲苯浓度增加到672 mg/kg时,平均孔直径反而从14.4376 nm增加到25.4835 nm。推测当土样受到一定浓度范围内的污染时,部分土颗粒会发生团聚,未团聚的细颗粒会主动填充孔隙,使得整体土样平均孔直径减小;当污染物浓度进一步增加时,多数土颗粒均发生团聚形成大直径颗粒,几乎没有细颗粒能够填充孔隙,造成平均孔直径增大。

#### 4 结论与建议

本文通过SEM、接触角试验和低温氮气吸附试验对甲苯、四氯乙烯污染土样的微观特征变化做了研究,得到了以下几点结论。

(1)比表面积和孔径孔容分析显示随着甲苯、四氯乙烯浓度增加,土样颗粒比表面积减小、累计孔体积减小和平均孔直径减小,其中2号土样受到672 mg/kg甲苯和183 mg/kg四氯乙烯污染后比表面积减小率最大,分别减小了30.70%和33.40%。这与SEM图像观察到的土样颗粒团聚和小孔隙数量增多现象一致,这些现象是由于土样对污染物存在吸附和化学作用,导致土颗粒发生类膨胀作用和

孔隙坍塌。

(2)2号土样在受到污染后比表面积减小率是1、3号土样的2倍左右,利用Pearson相关性系数对土样粘粒含量和受污染后比表面积减小率分析发现两者之间存在一定正相关性,即可认为2号土样粘粒含量高是导致受污染后其比表面积减小率最大的因素之一。

(3)由于土样中亲水性极强的主要矿物蒙脱石含量不同,1、2、3号土样的接触角大小不同,分别是25.5°、16.3°、18.7°。受到400 mg/kg甲苯和100 mg/kg四氯乙烯污染后的1、2、3号土样接触角平均增加了16.25°、14.2°和14.55°,这是由于甲苯和四氯乙烯是不亲水的非极性分子,其对土颗粒的包裹作用会隔绝土颗粒的亲水基团,导致污染土样接触角增大。

本研究表明不同浓度的有机污染物甲苯和四氯乙烯会导致土颗粒比表面积、孔隙大小、孔隙体积和接触角等微观特征的改变,同时污染地层中有机污染物的浓度分布往往是极不均匀的,导致有机污染地层土体异质性增强,钻进时钻头受到偏斜力,进而对直推钻进轨迹产生影响。为了预防直推



钻进发生轨迹偏斜等现象,可以对直推钻进设备的随钻测量功能进行优化改进,在遇到上述异质性污染地层时能够随时调整钻具姿态,确保钻进轨迹正确。

### 参考文献(References):

- [1] 姜林,梁竟,钟茂生,等.复杂污染场地的风险管理挑战及应对[J].环境科学研究,2021,34(2):458-467.  
JIANG Lin, LIANG Jing, ZHONG Maosheng, et al. Challenges and response to risk management of complex contaminated sites[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(2): 458-467.
- [2] 陈雅婷,赵昕宇,李艳红,等.我国污染场地中新污染物的环境行为和修复进展[J].环境工程,2024,42(1):166-176.  
CHEN Yating, ZHAO Xinyu, LI Yanhong, et al. Environmental behavior and restoration progress of emerging contaminants in contaminated sites in China[J]. Environmental Engineering, 2024, 42(1):166-176.
- [3] 朱辉,叶淑君,吴吉春,等.中国典型有机污染场地土层岩性和污染物特征分析[J].地学前缘,2021,28(5):26-34.  
ZHU Hui, YE Shujun, WU Jichun, et al. Characteristics of soil lithology and pollutants in typical contamination sites in China[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(5):26-34.
- [4] 赵玲,滕应,骆永明.中国农田土壤农药污染现状和防控对策[J].土壤,2017,49(3):417-427.  
ZHAO Ling, TENG Ying, LUO Yongming. Current situation and prevention and control measures of agricultural soil pesticide pollution in China[J]. Soils, 2017, 49(3):417-427.
- [5] 葛锋,张转霞,扶恒,等.我国有机污染场地现状分析及展望[J].土壤,2021,53(6):1132-1141.  
GE Feng, ZHANG Zhuaxia, FU Heng, et al. Distribution of organic contaminated sites in China: Statu quo and prospect[J]. Soils, 2021, 53(6):1132-1141.
- [6] 姜林,赵莹,钟茂生,等.污染场地土壤中VOCs定量被动采样技术研究及应用[J].环境科学研究,2017,30(11):1746-1753.  
JIANG Lin, ZHAO Ying, ZHONG Maosheng, et al. Passive sampling technology research and application for volatile organic compounds form soil gas in contaminated sites[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(11):1746-1753.
- [7] 刘志阳,臧常娟,郭都,等.深层搅拌技术在有机物污染场地原位化学氧化修复中的应用[J].钻探工程,2023,50(3):139-144.  
LIU Zhiyang, ZANG Changjuan, GUO Du, et al. Application of the deep mixing method in in-situ chemical oxidation remediation of organic contaminated site[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3):139-144.
- [8] 孙平贺.直推钻探技术在污染场地调查中的应用现状研究[J].钻探工程,2021,48(1):95-102.  
SUN Pinghe. Study on application status of direct push drilling technology in contaminated site investigation[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1):95-102.
- [9] 王青薇,尹业新,王水,等.中空螺旋半合管直推取样建井工艺在污染场地调查中的应用研究[J].钻探工程,2022,49(3):154-159.  
WANG Qingwei, YIN Yexin, WANG Shui, et al. Application of direct push sampling and well drilling technology with the hollow auger split-tube in contaminated site investigation[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3):154-159.
- [10] 孙平贺,周生伟,曹函,等.环境地质调查中智能直推随钻测量装置的应用研究[J].煤田地质与勘探,2023,51(9):156-163.  
SUN Pinghe, ZHOU Shengwei, CAO Han, et al. Application of intelligent direct push measurement while drilling device for environmental geological surveys[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(9):156-163.
- [11] 李文浩,卢双舫,王民,等.基于扫描电镜大视域拼接技术定量表征致密储层微观非均质性[J].石油与天然气地质,2022,43(6):1497-1504.  
LI Wenhao, LU Shuangfang, WANG Min, et al. Quantitative characterization of micro heterogeneity of tight reservoirs by large-view FE-SEM splicing technology[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6):1497-1504.
- [12] 詹卓琛,雷中英,李潇,等.鄂尔多斯盆地D区块上古生界煤岩CT三维空间结构及非均质性表征[J].大庆石油地质与开发,2022,41(2):16-25.  
ZHAN Zhuochen, LEI Zhongying, LI Xiao, et al. 3D spatial structure and heterogeneous characterization using CT scan for coal rocks of upper paleozoic in Block D, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(2):16-25.
- [13] 胡有方,袁俊平,卢毅.孔隙空间分布对粗粒土强度变形特性影响研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2021,38(1):26-31.  
HU Youfang, YUAN Junping, LU Yi. Influence of pore space distribution on strength and deformation characteristics of coarse-grained soil[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2021, 38(1):26-31.
- [14] 贾超,何玥,狄胜同,等.固结条件下黏性土微观孔隙结构试验研究[J].实验力学,2019,34(3):397-405.  
JIA Chao, HE Yue, DI Shengtong, et al. Experimental study on microscopic pore structure of clay under consolidation conditions[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(3):397-405.
- [15] 罗松英,陈东平,陈碧珊,等.红树林湿地土壤矿物的分析[J].分析测试学报,2019,38(7):823-829.  
LUO Songying, CHEN Dongping, CHEN Bishan, et al. Application of mineral analysis in mangrove wetland soils[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2019, 38(7):823-829.
- [16] 贺瑶瑶,陈金洪.重金属镉污染对土体力学特性的影响及机理分析[J].科学技术与工程,2019,19(9):276-280.  
HE Yaoyao, CHEN Jinhong. Effect cadmium contamination on the mechanical properties and mechanism analysis of the soil[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(9):276-280.
- [17] 李江山,张亭亭,王平,等.土壤有机质对铅污染土固稳特性的影响规律及微观机理[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(S1):57-62.  
LI Jiangshan, ZHANG Tingting, WANG Ping, et al. Effects

- of organic matter on engineering characteristics and microstructures of lead contaminated soil S/S treated by cement[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(S1):57-62.
- [18] 边汉亮,蔡国军,刘松玉,等.农药氯氰菊酯对土体基本性质影响的室内试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2015,45(1):115-120.  
BIAN Hanliang, CAI Guojun, LIU Songyu, et al. Effects of pesticide cypermethrin on basic properties of soils based on laboratory test[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015,45(1):115-120.
- [19] DONG F, LIU N, SUN Z, et al. Quantitative characterization of heterogeneity in different reservoir spaces of low-permeability sandstone reservoirs and its influence on physical properties[J]. Advances in Civil Engineering, 2021:1-8.
- [20] LV T, LI Z. Quantitative characterization method for microscopic heterogeneity in tight sandstone[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2021,39(4):1076-1096.
- [21] 王子寒,王鹏举,景晓昆,等.粗粒土颗粒接触力学特性及细观接触模型研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(8):1980-1992.  
WANG Zihan, WANG Pengju, JING Xiaokun, et al. A study on inter-particle contact behaviors and micro contact models of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018,37(8):1980-1992.
- [22] 张伟朋,孙永福,湛文武,等.一种基于SEM图像研究土体颗粒及孔隙分布特征的分析方法[J].海洋科学进展,2018,36(4):605-613.  
ZHANG Weipeng, SUN Yongfu, CHEN Wenwu, et al. An analytical method for studying soil particle and pore distribution characteristics based on SEM images[J]. Advances in Marine Science, 2018,36(4):605-613.
- [23] 张先伟,孔令伟.利用扫描电镜、压汞法、氮气吸附法评价近海黏土孔隙特征[J].岩土力学,2013,34(S2):134-142.  
ZHANG Xianwei, KONG Lingwei. Study of pore characteristics of offshore clay by SEM and MIP and NA methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(S2):134-142.
- [24] 童超,杨和平, ARAVIND PEDARLAA,等.由膨胀土内比表面及孔径分布来评价其膨胀行为[J].中外公路,2017,37(1):209-215.  
TONG Chao, YANG Heping, ARAVIND PEDARLAA, et al. The expansion behavior of expansive soil is evaluated by the internal specific surface and pore size distribution[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017,37(1):209-215.
- [25] 陈琼,项伟,崔德山,等.黄土坡滑坡滑带土氮气与水蒸气吸附试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(4):691-696.  
CHEN Qiong, XIANG Wei, CUI Deshan, et al. Adsorption of nitrogen and water vapor by sliding zone soils of Huangtupo landslide [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(4):691-696.
- [26] YE W, CHEN Y, GAO C, et al. Experimental study on the microstructure and expansion characteristics of paleosol based on spectral scanning[J]. Journal of Spectroscopy, 2021:1-11.
- [27] HAYATI-ASHTIANI M. Characterization of Nano-Porous-Bentonite (Montmorillonite) Particles using FTIR and BET-BJH Analyses [J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2012:3-4.
- [28] ZHANG C, LIU Z, DENG P. Contact angle of soil minerals: A molecular dynamics study [J]. Computers and Geotechnics, 2016,75:48-56.
- [29] 游阳,肖衡林,谭燕.疏水材料改性黏土渗透性能试验研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2022,44(1):14-19.  
YOU Yang, XIAO Henglin, TAN Yan. Experimental research on permeability of hydrophobic material modified clay [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2022,44(1):14-19.
- [30] SOFINSKAYA O A, KOSTERIN A V, KOSTERINA E A. Contact angles at the water-air interface of hydrocarbon-contaminated soils and clay minerals [J]. Eurasian Soil Science, 2016,49(12):1375-1381.
- [31] BRUNAUER S, EMMETT P H, TELLER E. Adsorption of gases in multimolecular layers [J]. Journal of the American Chemical Society, 1938,60(2):309-319.
- [32] 侯世辉,王小明,李丹阳,等.不同粒度构造煤的孔分形特征研究[J].中国煤炭地质,2023,35(10):1-7.  
HOU Shihui, WANG Xiaoming, LI Danyang, et al. Research on pore fractal characteristics of tectonic coal with different particle sizes [J]. Coal Geology of China, 2023,35(10):1-7.

(编辑 王文)