

# 有机磷农药污染黄土的强度及微观特性研究

王宁, 杨秀娟, 刘昊, 马兴业

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为研究农药污染土的力学特性,开展了有机磷农药(草甘膦、草铵膦)不同含量、压实度、含水率、养护龄期条件下黄土的无侧限抗压强度试验,并对试样进行了微观结构分析。结果表明:污染黄土无侧限抗压强度随农药含量的增加而减小,草甘膦与草铵膦两种农药影响效果相似。污染黄土无侧限抗压强度随压实度和养护龄期的增加而增大,随含水率的增加而减小且逐渐趋于平缓。通过微观结构分析发现,农药侵入土体并未改变土中的矿物成分,而是吸附于土中的黏粒矿物上,与矿物层间离子发生反应,从而降低了层间的支撑作用,使得土体颗粒更为破碎,土中大孔隙增多、颗粒排列更加分散导致了土体强度的降低。

**关键词:** 污染黄土; 有机磷农药; 无侧限抗压强度; 微观结构特征

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)05-0176-07

## Strength and microscopic properties of loess contaminated by organophosphorus pesticides

WANG Ning, YANG Xiujuan, LIU Hao, MA Xingye

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of pesticide-contaminated soil, the unconfined compressive strength test was carried out on loess under different organophosphorus pesticide (glyphosate, glufosinate) contents, compaction degrees, moisture contents and curing time. In the meantime, the microstructural characteristics of contaminated soils were also explored. The results show that the unconfined compressive strength of the contaminated soil decreases with the increase of pesticide content, and the influence of glyphosate on the soil is similar to that of glufosinate. The unconfined compressive strength of the contaminated soil increases with the increase of compaction degree and curing time, but decreases and levels off with the increase of moisture content. Microstructural analysis reveals that pesticide intrusion into the soil does not change the mineral composition of the soil, but adsorbs on the clay mineral particles in the soil, and reacts with the mineral interlayer ions to reduce the interlayer column support. Therefore, the addition of pesticides makes the particles more fragmented, increases the number of large pores in the soil, disperses the particles and reduces the strength of the soil.

**Key words:** contaminated loess; organophosphorus pesticide; unconfined compressive strength; microstructure property

## 1 研究背景

在西部大开发战略的实施与推动下,黄土地区工业和农业发展取得了长足进步<sup>[1]</sup>,工业化的高速发展为农业带来了长效驱动力,但也对环境造成了

一系列污染,其中,化学农药厂房污染物的累积富集为工程建设及附近居民健康安全带来严重威胁,场地污染问题已成为近年来岩土工程方面备受关注的课题之一<sup>[2-3]</sup>。

国内外研究学者对农药污染问题展开了多方面

收稿日期:2021-12-03; 修回日期:2022-04-06

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2020JQ-278);中央高校基本科研业务费专项项目(2452019062);陕西省博士后科研项目(2018BSHEDZZ23)

作者简介:王宁(1997-),男,河南开封人,硕士研究生,研究方向为特殊土工程性质。

通讯作者:杨秀娟(1981-),女,山东莱芜人,博士,副教授,研究方向为特殊土的工程性质及改良。

的研究,主要涉及农田土壤污染<sup>[4]</sup>、工业场地污染<sup>[5]</sup>及污染修复技术等方面<sup>[6-7]</sup>。农业面源污染的产生主要是由于施用农药的约70%扩散到了土壤和大气中,农药侵入土壤后破坏了土壤的结构特性,并在土壤中残留富集,形成“点-线-面”的空间污染态势<sup>[8]</sup>。场地污染主要为旧城改造、工业厂房搬迁所造成的遗留问题<sup>[9]</sup>,如武汉赫山农药厂搬迁遗留场地最大污染深度达9 m。20世纪70年代起就开始了有关因企业搬迁而废弃的污染场地的处理研究<sup>[10]</sup>。我国众多农药污染场地生产时间长、污染面广、污染质成分复杂,严重危害生态环境<sup>[11-12]</sup>。肖春艳等<sup>[13]</sup>研究了有机氯农药的非点源污染,得到农药在不同类型土壤中的迁移转化规律;蔡国军等<sup>[14]</sup>、Liu等<sup>[15]</sup>采用CPTU技术评价了南京市某农药污染场地并对土体污染前后工程性质进行了研究;边汉亮等<sup>[16-17]</sup>研究了有机氯农药污染土的强度特性,分析了污染土抗压强度、渗透系数及微观结构的变化规律;牛盛平<sup>[18]</sup>开展了有机磷农药污染网纹红土强度的特性研究,根据土体微观孔隙分布情况

揭示了其强度特性。有机磷农药为目前使用最为广泛的农药类型,国内诸多江河湖泊都检测出了有机磷农药的残留,然而目前关于有机磷农药的研究更多关注其风险评价<sup>[19-20]</sup>,对于其污染治理及工程特性的研究具有一定现实意义。

本文以陕西省杨凌地区粉质黏土为研究对象,通过无侧限抗压强度试验分析了农药含量、压实度、含水率、养护龄期对污染土体强度特性的影响规律,并通过X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)及扫描电镜进行农药污染土体的微观结构分析,旨在为黄土地区农药污染场地的治理与修复以及污染土壤的再利用提供理论支持。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

试验用土取自陕西杨凌某建筑工地,取土深度约为2 m,土样经均匀混合、自然风干后过2 mm筛,测得土样基本物理化学性质如表1所示,XRD测试结果见图1。

表1 试验黄土土样物理化学性质

相对密度	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	颗粒组成/%			易溶盐/ (g·kg <sup>-1</sup> )	中溶盐/ (g·kg <sup>-1</sup> )	难溶盐/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	pH值
				砂粒	粉粒	黏粒					
2.71	31.65	16.55	15.1	2.1	77.6	20.3	1.9	1.6	60.8	5.8	8.41

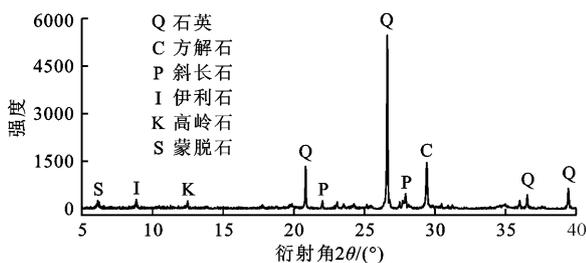


图1 试验黄土土样X射线衍射图

由图1可知,石英、方解石、斜长石为试验黄土的主要矿物成分。

试验选用两种有机磷农药,分别为:41% - 草甘膦异丙胺盐水剂(简称草甘膦),分子式为 $C_3H_9NC_3H_8NO_5P$ ,无味,分子量为346.41 g/mol,水中溶解度为900 g/L;草铵膦200 g/L水剂(简称草铵膦),分子式为 $C_3H_{15}N_2O_4P$ ,有刺鼻气味,分子量为199.17 g/mol,水中溶解度为1370 g/L。草甘膦与草铵膦均为目前常用有机磷除草剂。

### 2.2 试验方法

称取一定质量风干土,按干土质量比0、0.3%、

0.5%、1.0%、1.5%取不同质量农药污染物。试验土样最优含水率为19.0%,在该值附近取含水率为13%、15%、17%、19%、21% 5个梯度,将农药溶解于去离子水中均匀喷洒至土样表面,用保鲜膜密封并于标准养护室(温度 $(20 \pm 1)^\circ C$ ,相对湿度 $>95\%$ )中养护24 h使水分自然入渗,养护好的土样按《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[21]</sup>压制成直径为39.1 mm,高度为80.0 mm的试样。杨凌黄土最大干密度为 $1.73 g/cm^3$ ,根据农耕地及工业厂房地基标准将试样压实度分别控制为80%、85%、90%、95%。压制成型的试样用保鲜膜包裹,于标准养护室中养护,养护龄期分别为1、7、15、30 d。

### 2.3 试验仪器

无侧限抗压强度试验采用YYW-2型压力仪;X射线衍射试验采用D8 ADVANCE A25型仪器,试验选择扫描角度为 $5^\circ \sim 40^\circ$ ;电镜扫描试验采用Quanta 600 FEG型仪器,将试样按90%压实度压制成型,使用Freezone PI J 2.5L冷冻干燥机低温真空冻干24 h后取 $1 cm^3$ 碎块断面进行观测。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 农药含量对无侧限抗压强度的影响

3.1.1 应力-应变曲线及破坏特性 不同含水率及压实度下黄土试样的应力-应变曲线变化规律相似,以含水率19%、压实度90%为例,1 d 养护龄期下黄土试样应力-应变曲线随农药含量变化关系如图2所示。由图2可以看出:

(1)不同农药含量下试样破坏形式与未污染黄土试样相似,应力-应变曲线可分为压密阶段、弹性阶段、塑性强化阶段和应力衰减阶段,试样轴向应力达到峰值后均随着应变的增加而减小,表现出弱软化型及塑性破坏的特征。

(2)农药的加入使得黄土试样峰值应力骤减,且随着农药含量的增加峰值应力不断减小。草甘膦污染土试样峰值应力对应的轴向应变表现出先增后减的趋势,草铵膦污染土试样峰值应力对应的轴向应变均小于未污染土试样,表明农药含量的增加会减小试样的弹塑性变形。

3.1.2 土体强度随农药含量的变化特性 不同含

水率下试样无侧限抗压强度呈相似的变化规律。以含水率19%为例,1 d 养护龄期下不同压实度黄土试样无侧限抗压强度随农药含量的变化关系如图3所示。由图3可以看出:

(1)不同压实度下黄土试样无侧限抗压强度均随着农药含量的增加而减小,且减小幅度随农药含量的增加趋于平缓,压实度为90%时,草甘膦含量为0.3%试样比未污染土试样强度降低了36.8%,含量为1.5%试样比含量为1.0%试样强度降低了23.9%;草铵膦浓度为0.3%试样比未污染土试样强度降低了31.1%,浓度为1.5%试样比浓度为1.0%试样强度降低了21.7%。草甘膦和草铵膦溶于水后分别电离出胺类阳离子和铵根离子,这些离子附着在土颗粒表面,破坏了颗粒间的胶结物质,降低了颗粒间有效接触面积,宏观上表现为土体无侧限抗压强度的降低。

(2)草甘膦与草铵膦两种农药对黄土试样无侧限抗压强度影响相似,不同掺量下试样强度减小幅度相差不大,这是由于两种农药溶于水均可电离出一价阳离子,对土中胶结物质的破坏效果相似。

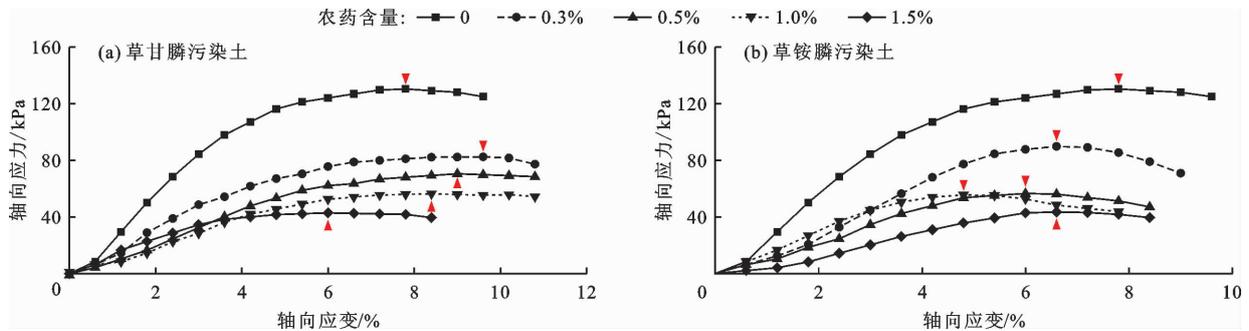


图2 不同农药含量黄土试样应力-应变曲线

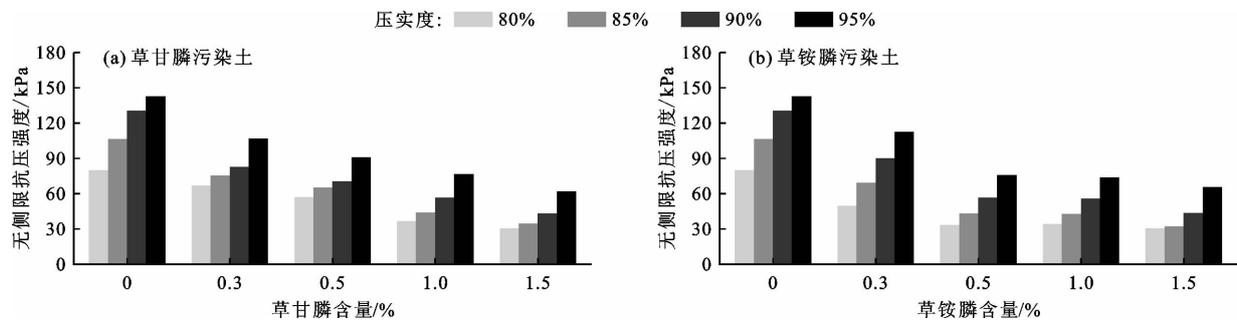


图3 不同压实度黄土试样无侧限抗压强度随农药含量的变化关系

#### 3.2 压实度对无侧限抗压强度的影响

图3也反映了黄土试样无侧限抗压强度随压实度的变化关系。由图3可知,试样无侧限抗压强度均随压实度的增加而增大,且随着农药含量的增加效果愈明显,压实度由80%增至95%时,未污染土

无侧限抗压强度由79.61 kPa增大至142.82 kPa,增加了79.4%;草甘膦浓度为1.5%时的强度由30.68 kPa增大至62.02 kPa,增加了102.1%;草铵膦浓度为1.5%时的强度由30.44 kPa增大至65.38 kPa,增加了114.8%。

### 3.3 含水率对无侧限抗压强度的影响

不同农药含量下试样无侧限抗压强度随含水率的增加有相同的变化规律,以未污染土和 1.0% 含量农药的污染土为例,1 d 养护龄期下不同压实度黄土试样无侧限抗压强度随含水率的变化关系如图 4 所示。由图 4 可以看出:

(1) 在压实度较大时(95%),含水率每增加 2% 引起的试样抗压强度减小值明显大于压实度较小(80%)的试样。含水率由 13% 增至 21% 时,未污染土压实度为 95% 时抗压强度由 351.27 kPa 减小至 93.35 kPa,含水率每增加 2%,抗压强度减小值为 64.48 kPa;压实度为 80% 时抗压强度由 139.97 kPa 降至 71.92 kPa,含水率每增加 2%,抗压强度减小值为 17.02 kPa。

(2) 随着含水率的增加,试样无侧限抗压强度先骤减后趋于平缓。低含水率时(13%~17%)为试样强度骤减阶段,高含水率时(17%~21%)为试样强度缓和阶段,由此可推断含水率对试样强度的影响存在一个阈值,超过该阈值后试样强度基本维持不变。原因主要是,低含水率下土颗粒之间的摩擦阻力大,试样强度较高,随着含水率的增加,土中结合水增多(以强结合水为主),结合水膜厚度增大,颗粒间基质吸力随水膜厚度的增加下降较快,试样强度骤降,若含水率继续增加至高于土体塑限

(16.55%),此时土中结合水膜厚度继续增大(以弱结合水为主),粒间基质吸力随水膜厚度增加下降缓慢,强度趋于平缓<sup>[22-23]</sup>。可以推测当含水率增至液限附近试样强度基本趋于稳定。

### 3.4 养护龄期对无侧限抗压强度的影响

不同压实度及含水率下试样强度与养护龄期呈相似变化规律。以含水率 19%、压实度 90% 为例,黄土试样无侧限抗压强度随养护龄期的变化关系如图 5 所示。由图 5 可知,随着养护龄期的增加,黄土试样无侧限抗压强度增长明显,但养护龄期 7 d 相较于 1 d 试样抗压强度相差不大或略有减小,15 d 以后抗压强度明显增大。与未污染土相比,污染土试样强度随龄期的增加提升明显,未污染土试样 30 d 养护龄期较 1 d 养护龄期强度提升了 32.3%,1.5% 草甘膦试样 30 d 养护龄期较 1 d 养护龄期强度提升了 97.6%,1.5% 草铵膦试样 30 d 养护龄期较 1 d 养护龄期强度提升了 126.2%。

试样在养护过程中内部水分会析出至表层,造成试样含水率的下降,故未污染土试样无侧限抗压强度会随养护时间的增加而小幅增大。本文所选用的有机磷农药草甘膦与草铵膦在土中不会长期存留,会随着时间的推移而分解,其降解包含微生物降解、光化学降解和化学降解,农药的降解使得污染土体抗压强度的上升较未污染土更为明显。

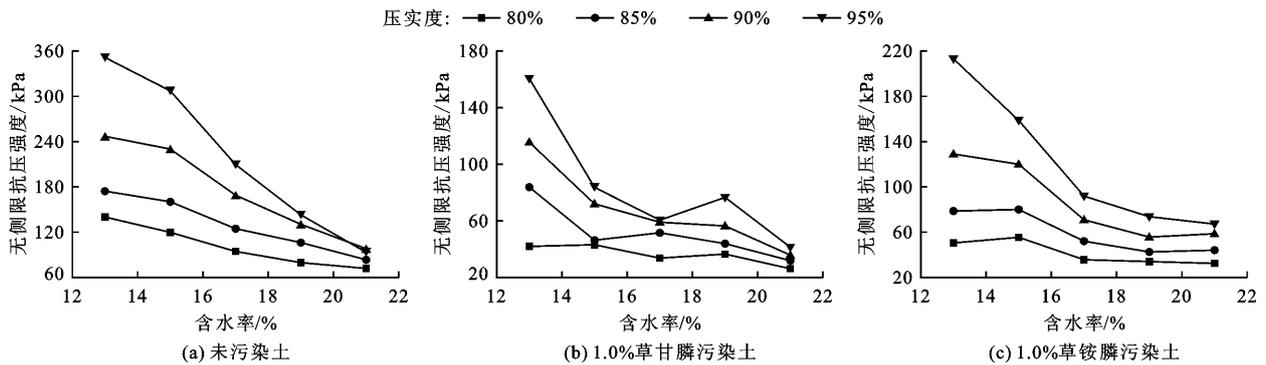


图 4 不同压实度黄土试样无侧限抗压强度随含水率的变化关系

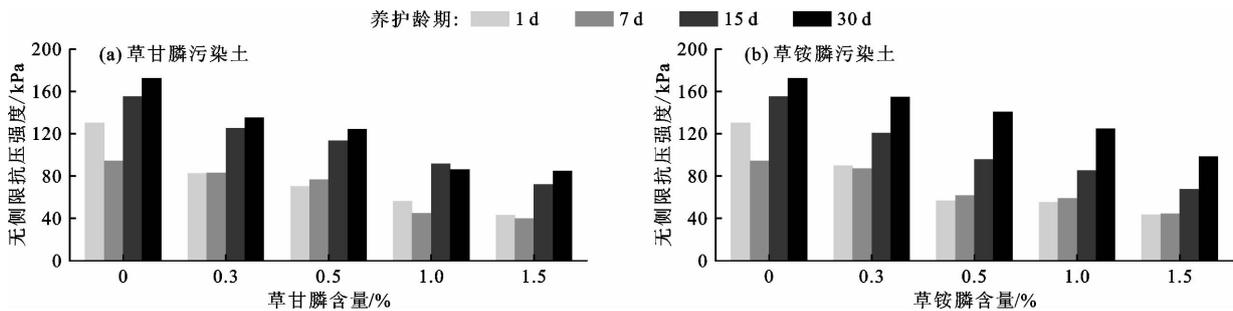


图 5 不同农药含量黄土试样无侧限抗压强度随养护龄期的变化关系

## 4 微观机理分析

### 4.1 X射线衍射试验

为分析农药污染后土体中矿物成分的变化,配制了农药含量分别为0.5%、1.5%的两种有机磷农药污染土样进行X射线衍射测试,结果如图6所示。由图6可知,不同含量农药污染土衍射峰位置基本相同,但衍射峰高度有所不同,表明农药的侵入

并未在土中产生新的矿物,而是与某些矿物发生反应使得矿物含量有不同程度的变化。

采用Jade软件对XRD测试结果进行分析,发现污染土中主要矿物为石英、方解石、斜长石、伊利石、高岭石和蒙脱石。伊利石、高岭石和蒙脱石等黏土矿物为农药在土中的吸附提供了条件,其中蒙脱石因其双层晶体结构及阳离子交换容量大等特点,对农药的吸附能力更强<sup>[24]</sup>。

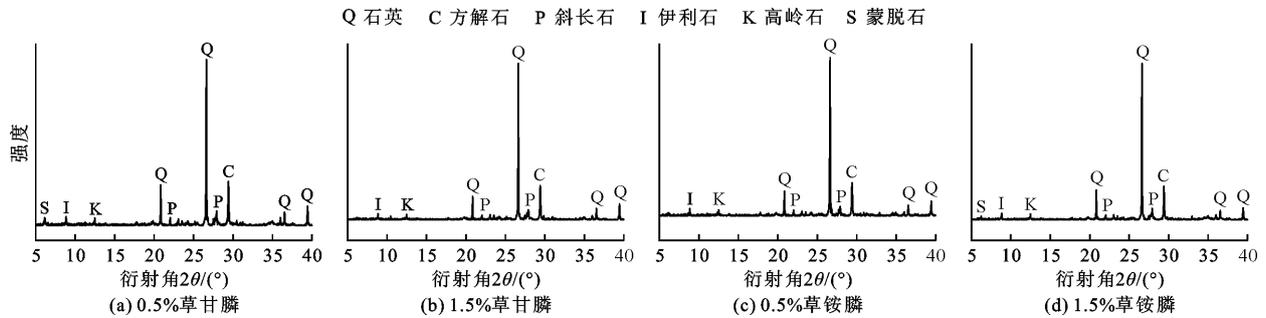


图6 不同含量有机磷农药污染土X射线衍射结果

以土中矿物含量较多的石英、方解石、斜长石为例,分析农药侵入后土中该3种矿物的相对含量,结果如图7所示。由图7可知,未污染土中石英占比49.4%,方解石占比25.6%,斜长石占比25.0%,与未污染土相比,两种农药污染土方解石含量明显减少,而斜长石与石英含量有小幅增加。分析其原因为,方解石中主要成分为 $\text{CaCO}_3$ ,两种有机磷农药均显酸性,与土中 $\text{CaCO}_3$ 发生反应。石英主要成分为 $\text{SiO}_2$ ,黄土中的斜长石以酸性斜长石为主,均不与酸性农药反应。

观图片,放大3 000倍的图像能够清晰地显示土体骨架,通常用作定性分析<sup>[25]</sup>。由图8可知,未污染土试样骨架颗粒紧密排列起到支撑作用,大块颗粒较多,颗粒间堆叠排列团聚为整体,较小石英颗粒附着在表面光滑的大石英颗粒表面,颗粒间的接触以镶嵌接触为主,呈面-面接触形式。随着农药的加入,土中小颗粒明显增多,且可以清楚看到诸多小颗粒重新黏聚成块吸附于大颗粒表面,颗粒间的接触形式由未污染土的面-面接触逐渐演化为边-面接触、边-边接触。未污染土的孔隙面积较小,主要为镶嵌孔隙。而农药污染土的粒间孔隙增多,孔隙面积变大,以支架孔隙为主,或呈网状分布,或形成横贯于骨架颗粒间的通道。

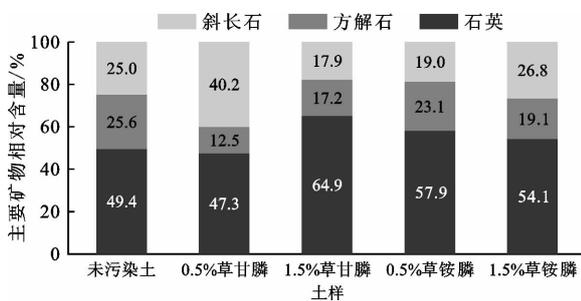


图7 未污染土及农药污染土主要矿物相对含量

### 4.2 扫描电镜试验

4.2.1 扫描电镜定性分析 土体微观结构变化可以反映出其宏观特性,为探究土体受农药污染前后力学特性的变化缘由,对污染土体进行扫描电镜试验观察土颗粒及孔隙变化情况。未污染土试样与不同含量农药污染土试样1 d养护龄期的扫描电镜结果如图8所示,图8中为3 000倍放大倍数下的微

上述农药污染土扫描电镜图片显示,随农药的加入,表现为土体中小颗粒吸附于大颗粒表面,这是由于农药施于土中,主要吸附在土壤黏粒矿物表面,黏粒矿物又吸附于土中大颗粒,故表现为大颗粒表面黏着小颗粒的现象。农药在土中与矿物层间离子反应,降低了颗粒表面结合水膜的厚度,使得土中支架孔隙增多,削弱了颗粒间的连接强度,因此很好地解释了前文中加入农药后试样无侧限抗压强度减小的现象。由此可见,草甘膦与草铵膦可通过改变颗粒形状以及颗粒间排列方式而增加土体孔隙面积,从而降低了土体强度。

4.2.2 扫描电镜定量分析 采用Image Pro Plus软件(简称IPP)对放大1 000倍的未污染土和农药污

染土扫描电镜图片(图 9)进行定量分析,统计土体受农药污染后孔隙变化情况。未污染土和不同含量农药污染土中孔隙面积变化如表 2 所示。由表 2 可知,土体受污染后最小孔隙面积无明显变化,最大孔隙面积与平均孔隙面积则有不同幅度的增大,即土

中大孔隙增多,与前文 3 000 倍镜下定性分析结果一致。酸性农药在土体中会侵蚀土颗粒,溶蚀粒间胶结物质,使得大颗粒分散为小颗粒,且易吸附于土体黏粒矿物表面,使得黏粒矿物更易聚集成团,小颗粒之间的聚集造成土中大孔隙增多,孔隙面积增大。

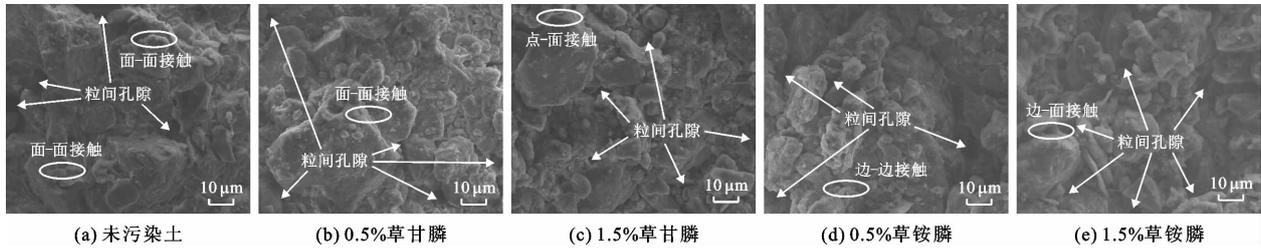


图 8 未污染土及农药污染土的微观结构(3 000 倍)

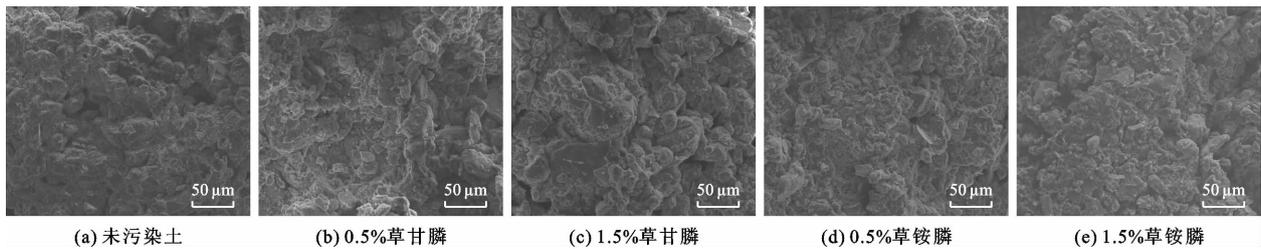


图 9 未污染土及农药污染土的微观结构(1 000 倍)

表 2 未污染土及农药污染土的孔隙面积  $\mu\text{m}^2$

土样类型	最小孔隙面积	最大孔隙面积	平均孔隙面积
未污染土	0.85	454.34	1.03
0.5% 草甘膦污染土	0.85	1262.09	1.17
1.5% 草甘膦污染土	0.91	708.58	1.53
0.5% 草铵膦污染土	0.91	533.26	6.92
1.5% 草铵膦污染土	0.90	1292.08	11.68

## 5 结 论

通过实验室配制不同含量的有机磷农药污染土,研究农药含量、压实度、含水率、养护龄期等因素对试样无侧限抗压强度的影响,并通过 X 射线衍射及扫描电镜进行微观结构分析,结论如下:

(1) 试样在不同农药含量下应力-应变均表现为弱软化型及塑性破坏特征,无侧限抗压强度随农药含量的增加而减小,草甘膦与草铵膦表现出相似的影响特征。无侧限抗压强度随压实度及养护龄期的增加呈现不同的增长趋势,随着含水率的增加呈减小趋势。

(2) 农药侵入土体后并未改变土体矿物及元素组成,而是改变了土体中各矿物的相对含量,两种有

机磷农药均显酸性,与土中碱性化合物  $\text{CaCO}_3$  等发生反应,造成方解石含量减少。

(3) 农药主要吸附于土体中的黏粒矿物上,破坏了矿物层间柱的支撑作用并溶蚀了土颗粒间的胶结物质,使得颗粒结构更为松散,颗粒间大孔隙面积增大,造成土体强度下降。

## 参考文献:

- [1] 王奇,刘巧玲,李鹏.我国污染密集型产业的显性转移与隐性转移研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017,53(1):91-100.
- [2] 陈学军,陈议城,宋宇,等.  $\text{Cu}^{2+}$  污染红黏土土性异变现象分析[J]. 工程地质学报,2019,27(5):1010-1018.
- [3] 刘松玉. 污染场地测试评价与处理技术[J]. 岩土工程学报,2018,40(1):1-37.
- [4] 庄国泰. 我国土壤污染现状与防控策略[J]. 中国科学院院刊,2015,30(4):477-483.
- [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.
- [6] MORILLO E, VILLAVARDE J. Advanced technologies for the remediation of pesticide-contaminated soils[J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 576-597.
- [7] 吴嘉茵,方战强,薛成杰,等. 我国有机物污染场地土壤修复技术的专利计量分析[J]. 环境工程学报,2019,13(8):2015-2024.

- [8] 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.
- [9] 储亚. 基于电学指标的膨胀土和污染土特性评价及应用研究[D]. 南京:东南大学,2019.
- [10] MAHAMMEDI C, MAHDJOUBI L, BOOTH C A, et al. A systematic review of risk assessment tools for contaminated sites—Current perspectives and future prospects[J]. Environmental Research, 2020, 191: 110180.
- [11] 刘松玉,詹良通,胡黎明,等. 环境岩土工程研究进展[J]. 土木工程学报,2016,49(3):6-30.
- [12] 朱国繁,应蓉蓉,叶茂,等. 我国农药生产场地污染土壤修复技术研究进展[J]. 土壤通报,2021,52(2):462-473.
- [13] 肖春艳,邵超,赵同谦,等. 降雨中有机氯农药土壤-水界面迁移过程的实验模拟[J]. 环境化学,2012,31(12):1953-1959.
- [14] 蔡国军,邹海峰,刘松玉,等. 电阻率 CPTU 在某农药厂污染场地评价中的应用[J]. 工程地质学报,2012,20(5):821-826.
- [15] LIU Songyu, CAI Guojun, DU Yanjun. Site investigation of a pesticide contaminated factory based on in-situ resistivity piezocone tests in Southeastern China[C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Site Characterization. London: Taylor & Francis Group, 2012.
- [16] 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.
- [17] 边汉亮. 基于电学热学参数的有机物污染场地工程特性评价方法研究[D]. 南京:东南大学,2017.
- [18] 牛盛平. 有机磷农药污染网纹红土强度特性试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- [19] 贺小敏,施敏芳,李爱民,等. 废弃农药厂土壤和地下水中有有机磷农药的健康风险评价[J]. 中国环境监测,2014,30(2):76-79.
- [20] 丁浩东,万红友,秦攀,等. 环境中有机磷农药污染状况、来源及风险评价[J]. 环境化学,2019,38(3):463-479.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [22] 黄琨,万军伟,陈刚,等. 非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(9):2600-2604.
- [23] 李陈财,璩继立,李贝贝,等. 含水率对麦秸秆加筋土强度影响的试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(6):203-206.
- [24] 高海英,杨仁斌,龚道新. 蒙脱石的吸附行为及其环境意义[J]. 农业环境科学学报,2006,25(S1):438-442.
- [25] 叶万军,吴云涛,杨更社,等. 干湿循环作用下古土壤微观结构及宏观力学性能变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(10):2126-2137.

(上接第 175 页)

- [17] SONG Zhanping, SHI Guilin, ZHAO Baoyun, et al. Study of the stability of tunnel construction based on double-heading advance construction method [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(1): 1-17.
- [18] QI Xingdong, WANG Ruijie, MI Wentian. Failure characteristics and control technology of surrounding rock in deep coal seam roadway with large dip angle under the influence of weak structural plane [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 6623159.
- [19] 郝婷,张智健,李娇,等. 富水软弱围岩偏压隧道超前支护施工技术研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版),2021,34(2):324-330.
- [20] DING Wenqi, TAN Shi, ZHU Rongqing, et al. Study on the damage process and numerical simulation of tunnel excavation in water-rich soft rock [J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 8906.
- [21] 杨彦亮,李锡波,毛洪录. 高地应力条件下深埋隧道开挖方式数值优选及工程应用[J]. 隧道建设,2013,33(9):735-740.
- [22] 刘高,张帆宇,李新召,等. 木寨岭隧道大变形特征及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(S2):5521-5526.
- [23] 刘阳,伍晓军,刘志强,等. 关于碳质板岩隧道大变形机理及应对措施的探讨[J]. 现代隧道技术,2014,51(6):19-24.