

污染红土的 宏微观响应关系

Wuran Hongtu De
Hongweiguan Xiangying Guanxi

黄 英 伯桐震 任礼强 等 / 著



四川大学出版社

污染红土的 宏微观响应关系

黄 英 伯桐震 任礼强 等 / 著



四川大学出版社

责任编辑:段悟吾
责任校对:蒋 玟
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

图书在版编目(CIP)数据

污染红土的宏微观响应关系 / 黄英等著. —成都:
四川大学出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-5690-1547-8

I. ①污… II. ①黄… III. ①红土—土壤污染—污染
防治—云南 IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 005089 号

书名 污染红土的宏微观响应关系

著 者 黄 英 伯桐震 任礼强 等
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5690-1547-8
印 刷 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 11.5
字 数 277 千字
版 次 2018 年 6 月第 1 版
印 次 2018 年 6 月第 1 次印刷
定 价 48.80 元



版权所有◆侵权必究

◆读者邮购本书, 请与本社发行科联系。
电话: (028)85408408/(028)85401670/
(028)85408023 邮政编码: 610065
◆本社图书如有印装质量问题, 请
寄回出版社调换。
◆网址: <http://www.scupress.net>

前 言

随着城市化进程和社会经济的迅速发展,人类活动所产生的酸、碱、油、生活垃圾、粉煤灰、煤矸石等污染物越来越多,对周围环境造成的污染越来越严重。各种污染物渗入土体和水体中,使土体和水体受到污染,形成污染土和污染水,导致土性的劣化和水质的劣化。从工程角度说,污染物的存在威胁着土体结构的安全;从生态环境角度说,污染物的存在威胁着生态环境的可持续发展。所以,加强污染土和污染水的研究对于有效保障土体结构的安全运行以及维持生态环境的可持续发展意义重大。

本书以云南红土为研究对象,以盐酸、氢氧化钠、六偏磷酸钠、硫酸亚铁作为污染物,人工制备污染红土,通过宏观和微观试验手段,采用试验、理论以及图像处理技术相结合的研究方法,对比分析了云南污染红土的宏观工程特性及其对应的微结构特性。其研究成果对于有效防治红土的污染具有重要的指导价值。

本书是国家自然科学基金“污染红土的宏微观响应及污染物的迁移机制研究”项目(项目编号:51168022)的部分研究成果。本书的出版得到国家自然科学基金委员会和昆明理工大学的大力支持,在此表示衷心的感谢!

王盼、杨小宝、潘泰参与了本书的编写工作,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者批评、指正。

作 者

2017年6月

目 录

第1章 土体污染问题	1
1.1 土体污染问题的存在	1
1.2 土体污染问题的研究	3
1.3 红土污染问题的研究	9
第2章 酸污染红土的宏微观响应	11
2.1 试验方案	11
2.2 酸污染红土的宏观特性	12
2.3 酸污染红土的微结构特性	34
2.4 酸与红土间的相互作用	44
2.5 酸污染红土的宏微观响应关系	46
第3章 碱污染红土的宏微观响应	50
3.1 试验方案	50
3.2 碱污染红土的宏观特性	51
3.3 碱污染红土的微结构特性	77
3.4 碱与红土间的相互作用	81
3.5 碱污染红土的宏微观响应关系	86
第4章 酸碱污染红土的宏微观响应	90
4.1 试验方案	90
4.2 酸碱污染红土的宏观特性	91
4.3 酸碱污染红土的微结构特性	106
4.4 酸碱污染红土的宏微观响应关系	112
第5章 磷污染红土的宏微观响应	115
5.1 试验方案	115
5.2 磷污染红土的宏观特性	116
5.3 磷污染红土的微结构特性	130



5.4	磷与红土间的相互作用	136
5.5	磷污染红土的宏微观响应关系	139
第6章	硫酸亚铁侵蚀红土的宏微观响应	142
6.1	试验方案	142
6.2	硫酸亚铁侵蚀红土的宏观特性	143
6.3	硫酸亚铁侵蚀红土的微结构特性	154
6.4	硫酸亚铁与红土间的相互作用	160
6.5	硫酸亚铁侵蚀红土的宏微观响应关系	163
符号说明		167
参考文献		170

第1章 土体污染问题

1.1 土体污染问题的存在

1.1.1 概述

随着城市化进程和社会经济的迅速发展,人类活动所产生的污染物越来越多,对周围环境造成的污染也越来越严重,各种污染物中的有毒、有害物质随着雨水渗入地下土体,引起土体的污染。一方面,污染物的腐蚀作用会引起土体结构的破坏;另一方面,污染物的扩散又会造成地上、地下生态环境的污染。土体的污染问题属于环境岩土工程问题,污染土是指由于污染物侵入土体后引起土体的宏微观特性发生改变的土体,而污染物则是指酸、碱、油、盐、生活垃圾以及废渣等可以影响土体结构的稳定性或污染地下水环境的一类有毒、有害的物质。从工程角度说,污染物的存在威胁着土体结构的安全;从生态环境角度说,污染物的存在威胁着生态环境的可持续发展。可以预见,随着人类社会进程的发展,各种污染物引起的污染问题会进一步加剧,涉及的污染土体问题日渐突出,人们必将面临严重的土体结构安全稳定问题以及地下水环境的安全问题。因而,加强污染土体的研究,对于有效保障土体结构的安全运行以及维持生态环境的可持续发展意义重大。

云南广泛分布的红土大量应用于水库大坝、路基、地基、工民建、边坡、挡土墙等各种工程建设中,对云南地区经济的发展起着非常重要的作用。我国西部大开发的深入实施为云南经济建设的发展提供了良好机遇。但由于云南的经济发展相对落后,人们的环境保护意识相对薄弱,工业、农业以及生产生活产生的各种“三废”污染物没有严格按照环保要求处理,随意排放,造成污染物的扩散和渗漏,引起地基土体的污染问题,尤其是红土的污染问题,严重影响了云南红土地区的经济发展和生态环境的可持续发展。

1.1.2 污染物的来源及类型

1.1.2.1 污染物的来源

现代工业中的造纸厂、造糖厂、化工厂、水泥厂、冶炼厂、采煤矿、采煤厂,人类生活产生的各种垃圾,农业生产使用的各种肥料,等等,都不可避免地存在各种类型的污染物,这些污染物是引起大气、地下水以及土体污染的主要来源。

1.1.2.2 污染物的类型

根据污染物的来源,污染物可以分为工业污染物、生活污染物、农业污染物等类型。本书所指的工业污染物主要是指酸碱厂、造纸厂、冶炼厂、化工厂、水泥厂等产生的废



水、废气、废渣,以及处理过程中使用的各种处理剂渗入土体中所造成的污染物;农业污染物主要是指农业上使用的化肥和农药随雨水渗入土体中所造成的污染物;生活污染物主要是指人们生活中产生的各种垃圾、洗涤剂、污水以及污水处理剂所造成的污染物。根据污染物的构成,污染物又可以分为有机物污染和无机物污染;根据污染物的属性,污染物还可以分为酸污染、碱污染、盐污染、油污染、重金属污染、农药污染、化肥污染等。

1.1.3 土体污染的危害及防治

1.1.3.1 土体污染的危害

污染物的扩散和渗漏造成土体的污染,而土体受到污染后必然导致其性能的劣化,产生相应的危害问题。如地基土体受到污染,可能导致其承载力降低、沉降变形不均匀、开裂、渗漏、失稳等危害;农业土壤受到污染,可能导致重金属超标、土体富营养化、酸碱度不平衡、土质劣化、农作物减产、食品不安全等危害。早在 20 世纪 70 年代就发现了工业厂房地基土体被污染会引起承载力下降、房屋基础损坏等问题,实际案例如湖南长沙浏阳市的铬污染、云南曲靖的铬渣污染、昆明阳宗海的砷污染等。此后,土体污染的危害逐渐显现出来,参与相关研究的人员越来越多。黄世铭^[1] (1981) 研究了酸碱介质对黏性土工程地质性质的影响;顾季威^[2-4] (1981、1984、1988) 分析了酸碱废液侵蚀地基土对工程质量的影响;邓承宗^[5] (1985) 分析了硫酸对地基的腐蚀问题。

1.1.3.2 土体污染的防治

土体污染的危害可以采取相应的措施来防治,如固化、击实、添加、淋溶等。

胡中雄等^[6] (1994) 检测和处理了硫酸根离子污染地基土问题;范青娟等^[7] (1999) 分析了浸碱膨胀对地基土体的影响与处理方法;饶为国^[8] (1999) 分析了污染土的机理、检测及整治;郑喜坤等^[9] (2002) 分析了土壤中重金属污染现状与防治方法;张明义等^[10] (2003) 通过击实试验,研究了不同配比的碱渣土的击实性能,发现钢渣的加入可以改善碱渣土的击实效果;可欣等^[11] (2004) 分析了重金属污染土壤修复技术中有关淋洗剂的研究进展;崔德杰等^[12] (2004) 分析了土壤重金属污染现状与修复技术研究进展。

许丽萍等^[13] (2006) 总结了国内外污染土的修复治理现状;矫旭东等^[14] (2008) 分析了土壤中钒污染的修复与治理技术;张帆等^[15] (2009) 分析了污染土的工程特性与修复方法;廖华丰^[16] (2009) 研究了重金属污染土壤修复淋洗剂的遴选;陈蕾^[17] (2010) 研究了水泥固化稳定重金属污染土的机理与工程特性;查甫生等^[18] (2013) 研究了水泥固化重金属污染土的干湿循环特性;易进翔^[19] (2013) 等在室内模拟现场对固化污泥进行碾压,研究了击实功、固化污泥含水率、材料添加量对其干密度、孔隙比的影响,发现随着击实功增大,固化水泥的干密度先增加后趋于稳定;郝爱玲^[20] (2015) 研究了固化重金属污染土的工程性质与作用机理;何小红^[21] (2015) 研究了长春地区柴油污染土的性质及水泥固化效果;郭晓方等^[22] (2015) 研究了乙二胺四乙酸在重金属污染土壤修复过程的降解及残留特性;王欢^[23] (2016) 通过正交试验方法,研究了硫酸亚铁修复铬污染土壤的最佳工艺方案。



1.2 土体污染问题的研究

1.2.1 概述

早在 20 世纪六七十年代, 欧洲发达国家已经认识到土体污染对人类的生产生活带来的恶果, 先后在荷兰乌特勒支、美国华盛顿举行环境岩土工程会议, 试图解决土体污染对人类的生产生活带来的不良影响。国内从 20 世纪 70 年代开始, 在工业厂房改造过程中发现地基土体被污染、土质变差会造成建筑物地基承载力下降、房屋基础损坏, 进而开始污染土的勘察和研究工作。直到 20 世纪 80 年代, 同济大学才从环境保护的角度开展了对污染土的物理力学性质、污染物在土壤中的迁移转化规律, 以及固体废弃物的处理研究。此后, 土体污染问题的研究逐渐引起重视, 开展的研究越来越多, 许多研究者分析总结了污染土的研究进展。

Kooper W F^[24] (1986) 介绍了关于土体的污染问题; 李明清^[25] (1986) 介绍了污染土问题; 傅世法等^[26] (1989) 分析了污染土的岩土工程问题; 王超^[27] (1996)、张红梅等^[28] (2004) 分析了土壤及地下水污染的研究现状; 方晓阳^[29] (2000) 展望了 21 世纪的环境岩土工程问题; 陈先华等^[30] (2003) 分析了污染土的研究现状及展望; 苏燕等^[31] (2004) 分析了环境岩土工程的研究现状与展望; 薛翊国等^[32] (2005) 介绍了污染土的特性、污染机理、危害、监测、评价等研究现状; 朱春鹏等^[33] (2007) 分析总结了污染土的工程性质研究进展; 刘志斌等^[34] (2010) 介绍了有机物污染土的工程性质研究进展; 颜荣涛^[35] (2014) 分析了水化学环境变异下黏土的物理力学特性研究进展; 张芹等^[36] (2015) 分析了污染土的研究现状及其治理; 白龙飞等^[37] (2015) 分析总结了我国近年来污染土工程性质的研究进展。

目前, 针对污染土体问题主要开展了宏微观特性研究, 污染物的种类主要包括酸、碱、盐、重金属、油、农药、生活垃圾等。

1.2.2 污染土体的宏观特性

1.2.2.1 酸碱污染土体的宏观特性

目前, 污染土体的宏观特性研究主要从物理力学特性方面着手, 研究表明污染物的存在劣化了土体的工程性能。顾季威^[2-4] (1981、1984、1988) 通过室内浸泡模拟试验, 研究了酸碱废液污染侵蚀对地基土工程性质、工程质量的影响, 研究表明酸碱污染土的压缩系数增大, 凝聚力、内摩擦角减小, 抗剪强度降低; 邓承宗^[5] (1985) 分析了硫酸对地基的腐蚀问题; 吴恒等^[38,39] (1999) 对南宁市天然水化学场进行了模拟, 以模拟溶液作为土体的浸渍液, 研究变异后的水化学场对土体强度的影响; 侍倩等^[40] (2001) 研究了酸、碱对黏土物理性质的影响; 李相然^[41] (2004) 针对济南市典型地区的现场原状污染土, 通过室内试验, 研究了现场原状污染土的物理力学特性以及水—土化学作用, 发现被污染了的地基土体的物理力学性质会发生显著变化。

欧孝夺等^[42] (2005) 通过室内三轴试验, 研究了不同酸碱条件下广西南宁市河流相



沉积黏性土的热力学稳定性, 试验结果表明化学溶液的酸碱性越强, 对土体强度的热影响越大。张贵信等^[43] (2006) 通过浸泡试验方法, 并考虑自重应力、恒定荷载的影响, 研究了不同 pH 水环境下土体的变形特性, 试验结果表明水化学环境不同、应力路径不同, 土的变形特性不同。张晓璐^[44] (2007) 开展了酸碱污染土的试验研究。朱春鹏等^[45] (2008) 研究了酸、碱污染土的工程特性。朱春鹏等^[46] (2008) 研究了酸碱污染土的压缩特性, 研究表明: 随污染浓度的增加, 酸碱污染土的压缩系数、回弹指数增大, 前期固结压力减小, 且碱污染土压缩系数的变化大于酸污染土。刘汉龙等^[47] (2008) 研究了酸碱污染土的基本物理性质, 研究表明: 酸浓度增大会导致土样的有机质含量、土粒比重和液限减小, 塑限增大; 碱浓度增大会导致有机质含量减小, 土粒比重、液塑限增大。

纪晶晶等^[48] (2008) 通过不排水直剪试验, 研究了土壤酸碱度含量对土体抗剪强度的影响, 试验结果表明酸污染降低了土体的抗剪强度。赵永强等^[49] (2008) 通过室内模拟试验, 研究了硫酸污染水泥土的强度特性, 试验结果表明: 随养护龄期增长, 无论硫酸质量比多少, 硫酸污染水泥土试件的无侧限抗压强度增大。朱春鹏等^[50] (2009) 通过三轴固结不排水试验, 研究了不同浓度酸碱污染土的应力应变特性以及孔隙水压力特性, 研究表明: 污染土应力-应变关系曲线的形态随污染物不同而发生改变, 随酸浓度增大, 酸污染土软化特性愈显著; 随碱浓度增大, 碱污染土的软化特性愈不明显, 呈塑性破坏。孟庆芳^[51] (2009) 研究了污染粉质黏土的液塑限特性。Oscar Vazquez^[52] (2009) 研究了酸矿排水对黏土矿物铝释放的影响。张永霞^[53] (2010) 研究了污染土的电阻率特征。朱春鹏等^[54] (2011) 通过人工方法制备 4 种不同浓度的酸碱污染土样, 通过三轴和直剪试验研究了酸碱污染土的强度特性, 研究表明: 随酸、碱浓度增大, 酸、碱污染土的黏聚力逐渐增大, 其中碱污染土增大尤为显著; 酸污染土的内摩擦角总体减小; 碱污染土的内摩擦角随碱浓度增大而逐渐减小; 碱污染土的黏聚力随液性指数的增大逐渐增大; 内摩擦角随液性指数的增大逐渐减小, 酸污染土与此相反。

师林等^[55] (2011) 研究了酸碱度值对土体液塑限的影响。刘丽波^[56] (2012) 通过硫酸溶液浸泡试验, 研究了酸溶液污染环境对粉质粘土物理性质的影响, 研究表明: 硫酸溶液浸泡后, 土样的密度与浓度呈负相关; 土样的塑限、液限、塑性指数与溶液浓度呈负相关; 溶液浓度越高, 土样的最优含水率越低, 最大干密度越大。曹海荣^[57] (2012) 通过浸泡方法, 研究了不同浓度硫酸溶液和不同侵蚀时间对酸性污染土物理力学性质的影响, 研究表明: 土的孔隙比、液塑限、塑性指数随酸浓度增大而增大; 压缩系数随浸泡时间延长呈增大趋势。陈宇龙等^[58] (2016) 采用硫酸溶液浸泡方法, 通过压缩、界限含水、三轴固结不排水试验, 研究了不同酸性环境对污染土的力学性质和变形特性的影响, 研究表明: 硫酸溶液的浸泡, 导致土样的压缩量增大; pH 值越低, 硫酸溶液浓度越大, 溶蚀破坏越剧烈, 孔隙比越大, 压缩系数越大; 随着 pH 值降低, 扩散双电层被稀释, 土的可塑性变弱, 液限和塑性指数都减小。

1.2.2.2 碱污染土体的宏观特性

碱污染劣化了土体的宏观物理力学特性。边际等^[59] (1991) 开展了碱厂废液入渗现场模拟试验及其在环境评价中的应用研究。李琦等^[60] (1997) 研究了造纸厂废碱液污染



土的环境岩土工程问题,研究表明:被废碱液浸泡后,黏土、粉质黏土和粉土的孔隙比增加,压缩性增大,强度降低,比重以及界限含水率增大,工程性质劣化。闰澍旺等^[61] (2006)研究了碱渣土的化学成分、碱渣土回填场地的地基承载力和长期稳定性,研究表明:在最佳击实状态下,碱渣土的抗剪强度比一般素土高。李显忠^[62] (2008)研究了天津碱厂碱渣土的工程利用问题,研究表明:碱渣土可以作为工程用土,从而解决碱渣无处堆放和引起的环境恶化问题,其社会效益、经济效益和环境效益显著。纪晶晶等^[48] (2008)通过不排水直剪试验,研究了不同酸碱条件下土的强度,研究表明:碱污染土的强度受法向应力影响,法向应力小时抗剪强度稍稍提高;法向应力大时,抗剪强度降低。王栋^[63] (2009)通过室内试验,研究了不同浓度的 NaOH 污染土和 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 污染土的物理和力学性质的变化,以及微结构图像的变化,探讨了碱性条件下的土体腐蚀机理。

Deneele D 等^[64] (2010)对碱溶液侵蚀后的土样进行了 X 射线衍射试验,发现土样的膨胀力降低和孔隙率增大。杨爱武等^[65] (2010)开展了碱性环境对固化天津海积软土强度影响的试验研究,研究表明:碱性环境对水泥土强度的提高具有很大的促进作用,并能节省工程费用,值得推广。P Hari Prasad Reddy 等^[66] (2010)研究了碱溶液对不同矿物土壤膨胀行为的影响。相兴华等^[67]和韩鹏举等^[68]通过室内浸泡模拟试验,研究了 NaOH 和 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 碱溶液对碱污染粉土工程性质的影响,研究表明:随着溶液浓度提高,土样的密度、液限、塑限、塑性指数和压缩系数增大,孔隙比降低;NaOH 对于土样的影响强于 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 对土样的影响。张晓晓^[69] (2015)通过室内试验,研究了碱渣-粉煤灰拌合形成碱渣土的路用性能与微观结构特性,研究表明:路堤填垫中碱渣土的碱渣与粉煤灰的最佳配比为 4:1,在碱渣土中加入胶凝材料,能明显提升碱渣土的力学性能;通过 IPP 软件,测量了碱渣土的微观孔隙,发现碱渣土孔隙的等效直径、面积、周长随着元明粉含量的增加而逐渐减小,孔隙的圆度呈现先增大后减小的趋势。宋宇等^[70] (2015)研究了碱污染黏土的变形特性及微观结构演化规律,研究表明:NaOH 溶液降低了黏土的抗剪强度,碱液浓度越大,抗剪强度指标下降越多;NaOH 溶液会严重腐蚀黏土颗粒,溶蚀其中的胶结物质,造成黏土内部总孔隙度增加,结构松散,黏土表面的孔隙发育,碱液的腐蚀作用导致黏土体内部的小孔向大孔转化现象。

1.2.2.3 盐污染土体的宏观特性

喻以钊等^[71] (2010)通过击实试验,研究了不同含量硫酸钠盐渍土的击实特性,得到了盐渍土的最大干密度和最优含水率与盐分之间的变化关系。何斌等^[72] (2012)等在室内配制不同含量的 Na_2SO_4 和 MgCl_2 污染土,研究了 Na_2SO_4 和 MgCl_2 对土体物理指标和压缩特性的影响,研究表明: Na_2SO_4 和 MgCl_2 污染土的塑性指数和液限之间存在明显的线性关系,且随 Na_2SO_4 和 MgCl_2 含量增加,污染土的压缩系数减小。刘丽波^[55] (2012)通过氯化钠溶液浸泡试验,研究盐溶液腐蚀环境下土体的物理性质变化,研究表明:氯化钠溶液浸泡后,土样的密度与浓度成正相关,塑限、液限、塑性指数与溶液浓度成负相关;溶液浓度越高,土样的最优含水率越低,最大干密度越大。

韩鹏举^[67] (2012)通过室内浸泡模拟试验,研究了 NaCl 和 Na_2SO_4 盐溶液对盐污染粉土工程性质的影响,研究表明:随着盐溶液浓度增加,土样的密度、比重增大,孔隙比、液限、塑限、塑性指数和压缩系数降低,且 Na_2SO_4 对于土样的影响强于 NaCl。王勇



等^[73] (2013) 研究了生活钠铵盐污染对黏性土水理及力学性质的影响, 研究表明: NaCl 和 Na_2CO_3 的污染, 黏性土的塑性和压缩性提高, 渗透性和抗剪性降低; NH_4Cl 的污染, 黏性土的塑性和压缩性降低, 渗透性和抗剪性提高; 生活钠铵盐污染对黏土水理及力学性质的影响明显高于对粉质黏土的影响, 生活污染物通过改造黏粒表面的“双电层”结构, 影响黏性土的水理及力学性质。

1.2.2.4 重金属污染土体的宏观特性

张志红等^[74] (2014) 采用三联式柔性壁渗透仪开展污染土的渗透试验, 研究了重金属 Cu^{2+} 污染土的渗透特性及微观结构特性, 研究表明: 当 CuCl_2 溶液浓度恒定时, 渗透液无论采用纯净水还是 CuCl_2 溶液, 土体的渗透系数均随围压的增大而减小; 但在相同围压下, 渗透液为 CuCl_2 溶液的渗透系数小于纯净水的渗透系数, 并随围压的增大而增大; 围压相同、渗透液浓度不同的情况下, 土体的渗透系数随 CuCl_2 溶液浓度的增加先急剧减小, 随后逐渐增大。微观结构分析结果表明, 当 CuCl_2 溶液作为渗透液时, 土体的渗透系数与纯净水的渗透系数存在差异的主要原因是由于重金属 Cu^{2+} 改变了黏土的内部结构, 影响了黏土孔隙的大小, 从而造成了宏观渗透性的差异。

夏磊^[75] (2014) 研究了重金属污染土的工程性质。王平等^[76] (2014) 研究了淋洗剂乙二胺四乙酸对重金属污染土工程特性的影响。储亚等^[77] (2015) 研究了锌污染土的物理与电学特性。宋泽卓^[78] (2016) 通过室内击实、剪切试验, 研究了重金属污染土的工程性质及微观结构, 研究表明: 重金属浓度的增加会导致土的黏粒含量减小, 工程性质变差, 强度降低。

1.2.2.5 油污染土体的宏观特性

Mashalah Khomehchiyan 等^[79] (2007) 研究了原油污染对黏土和砂土的岩土性质的影响, 研究表明: 石油污染过的海滩砂质土和沉积物其最大干密度和最优含水率都会降低。郑天元等^[80] (2010) 通过击实试验, 以原油、柴油和水为介质, 研究了油污染土的击实特性, 研究表明: 石油污染土的干密度随含油率的增加而增加, 但远小于无污染土的最大干密度; 油水混合污染土和柴油污染土的击实曲线随含油率增加最终变成无峰值曲线。Ashraf K 等^[81] (2011) 研究了机油污染对过度固结黏土岩土性能的影响。郑天元等^[82] (2013) 通过室内试验, 研究了柴油污染土的击实特性、无侧限抗压强度特性和渗透特性随含油率的变化, 证实了柴油污染对土的工程性质的影响。周杏等^[83] (2015) 采用直剪、变水头渗透试验及压缩试验, 研究了柴油污染对上海地区粉质黏土工程性质的影响, 研究表明: 随柴油含量增加, 油污染土的黏聚力先增大后减小, 内摩擦角、渗透系数和压缩系数先减小后增大。

1.2.2.6 其他污染土体的宏观特性

边汉亮等^[84] (2014) 通过室内试验, 研究了有机氯农药污染土的强度特性、渗透特性, 研究表明: 有机氯农药的污染, 会导致土体的强度随农药浓度增加而减小, 随龄期的增长呈先增大后减小的趋势; 渗透系数随农药浓度的增大而减小, 随龄期的增长而增大。王勇等^[85] (2014) 研究了生活垃圾污染黏土的渗透特性, 发现生活垃圾的污染会导致黏土的渗透性降低, 随污染深度的增加, 污染土的渗透系数会增大。何斌等^[86] (2015) 研究了洗衣粉污染土的压缩特性及电阻率特性。边汉亮^[87] (2015) 通过室内试



验,研究了农药氯氰菊酯对土体基本性质的影响,研究表明:农药污染土的黏粒组分随农药掺量的增加而增大,液限和塑限随污染物浓度的增加而增大,塑性指数随浓度的增加呈先增大后稳定的趋势;不同龄期试样的pH值随污染物浓度的增加而减小,同一龄期污染土的电阻率随农药掺量的增加而减小。杨倩^[88](2016)研究了垃圾渗滤液对压实黏土工程特性的影响,研究表明:渗滤液侵蚀对黏土的各项工程性质有较大的影响,随渗滤液浓度的增大及浸泡时间的延长,浸泡黏土的渗透性、比重和剪切强度均减小,而含水率增大。

1.2.3 污染土体的微观特性

污染土体的宏观工程特性发生劣化,其实质是与其相对应的微观结构发生了损伤。关于污染土体的微结构特性,吴恒等^[89](2000)研究了水土作用对土体细观结构的影响,研究表明:地下水环境的变异,引起土体的可溶蚀相发生变化,从而改变了土体的细观结构。张信贵等^[90](2004)开展了城市区域水土作用与土细观结构变异的试验研究。姚彩霞^[91](2005)通过室内扫描电镜、CT等试验,并考虑酸碱、阴阳离子溶液等因素的影响,研究了城市区域水化学环境下土体细观结构的变异性。张晓璐^[44](2007)研究了酸、碱污染土的微结构特性。王栋^[63](2009)通过扫描电镜试验,并考虑碱浓度的影响,研究了NaOH和 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 碱污染土的微结构特性和碱性条件对土体的腐蚀机理。

Deneele D等^[64](2010)对碱溶液侵蚀后的土样进行了X射线衍射试验,发现其土样的膨胀力降低和孔隙率增大。陈宝等^[92](2013)借助扫描电镜和透射电镜试验,研究了NaOH碱性孔隙水侵蚀对膨润土微观性能的影响,研究表明:高碱性溶液的侵蚀造成了膨润土水化产生的羽翼状胶体的溶解和膨润土结构的不可逆性破坏,且破坏程度与碱溶液的浓度成正相关关系;高碱性溶液侵蚀膨润土试样表面溶蚀痕迹明显。张志红等^[74](2014)研究了重金属 Cu^{2+} 污染土的微观结构,研究表明:重金属 Cu^{2+} 改变了黏土的内部结构和孔隙大小,从而影响其宏观渗透性。边汉亮等^[84](2014)通过微观试验,研究了有机氯农药污染土的微观特性,研究表明:有机氯农药污染后,随农药浓度的增大,土体的絮状结构增多,可以对应解释其宏观力学特性的变化。廖朱玮^[93](2014)研究了镉溶液污染黏土微观结构的演化规律。

王勇等^[94](2014)利用扫描电镜观测和图像处理技术,研究了 Na_2CO_3 污染重塑黏土的微观结构特性,研究表明: Na_2CO_3 的污染侵蚀,破坏了重塑黏土的絮状结构,导致颗粒与孔隙重新分布,孔隙率显著降低;图像处理提取的污染重塑黏土的表观孔隙率随 Na_2CO_3 侵蚀程度的提高而显著降低,表观孔径呈现以大孔和中孔为主逐渐演化为以小孔和微孔为主的分布特征; Na_2CO_3 通过与黏土颗粒的离子交换和吸附、与非碱金属阳离子和游离氧化物的化学反应以及与腐植酸的中和作用,实现对黏土微观结构的多元化改造。王勇等^[85](2014)研究了生活垃圾污染黏土的微观结构,研究表明:黏土被生活垃圾污染后,随着污染深度的增加,污染黏土总孔隙面积、表观孔隙比和平均孔径逐渐增大,黏土孔隙逐渐由以小孔和中孔为主演化为以大孔和超大孔为主。

宋宇等^[70](2015)研究了碱污染黏土的微观结构演化规律,研究表明:NaOH溶液会严重腐蚀黏土颗粒,溶蚀其中的胶结物质,造成黏土内部总孔隙度的增加,使土体整



体呈松散结构；团聚体结构越疏松，其间孔隙越分散，黏土表面的孔隙极度发育，结构松散度极高；碱液的腐蚀作用引起黏土体内部的小孔向大孔转化。张晓晓^[69]（2015）通过室内试验，研究了碱渣土的微结构特性，并通过 IPP 软件测量了碱渣土的微观孔隙，研究表明：碱渣土孔隙的等效直径、面积、周长随着元明粉含量的增加逐渐减小，孔隙的圆度呈现先增大后减小的趋势。宋泽卓^[78]（2016）通过室内扫描电镜试验，研究了重金属污染土的微观结构，发现重金属浓度的增加会导致污染土的颗粒团聚，出现大孔隙。

1.2.4 污染土体的作用机理

污染土体的宏微观特性发生劣化，实质在于污染物与土体颗粒之间的相互作用，其作用机理就是污染物的溶蚀作用以及新生成物质的结晶溶解作用，其综合作用的结果最终改变了污染土体的宏微观特性。

吴恒、张信贵^[95]（1999）分析了水土作用系统中离子的交换吸附等作用，研究了强酸、强碱环境下地下水中的 H^+ 和 OH^- 与土体某些矿物成分发生化学反应，改变其成分、破坏其连结、引起强度降低的化学机理。蒋引珊等^[96]（1999）研究了黏土矿物酸溶解反应特征。路世豹等^[97]（2002）通过室内对比试验，研究了地基在长期受酸性物质侵蚀过程中的污染变化机理，提出了酸侵入—酸溶解土中的矿物—酸带着矿物质迁移—矿物重结晶—体积膨胀的污染过程，其中石膏形成过程中体积膨胀是变形的主要原因。刘志彬等^[98]（2008）研究了遭受典型工业污染物（如酸、碱、重金属和石油）侵入后，工业污染土工程行为的物理化学作用，研究表明：工业污染物导致天然土体的工程性质发生劣化，但各类污染物质与土体间的物理化学作用机制不同。王栋^[63]（2009）研究了不同浓度的 $NaOH$ 和 $NH_3 \cdot H_2O$ 对土体的污染腐蚀机理。杨华舒等^[99,100]（2012）研究了碱污染土的物理力学性质以及饱和氢氧化钙浸泡红土的腐蚀机理，研究表明：碱与红土中的硅、铝胶结物质发生了溶蚀反应，生成易溶于水的物质，在水溶条件下被水溶的坝体会形成细小的通道，导致库区产生渗漏。

伯桐震^[101]（2012）研究了 HCl 溶液与红土颗粒的相互作用，其作用机理可以从腐蚀阶段、成盐阶段和溶解阶段来解释。陈宝等^[92]（2013）借助扫描电镜和透射电镜试验，研究了 $NaOH$ 碱性孔隙水侵蚀对膨润土性能影响的微观机理，研究表明：碱性孔隙水的入渗侵蚀会逐渐溶解膨润土中的蒙脱石，破坏膨润土的结构，增大膨润土的孔隙率，降低膨润土的膨胀性，提高膨润土的长期渗透性，最终造成膨润土的封闭和缓冲性能降低。任礼强等^[102]（2014）研究了 $NaOH$ 碱溶液与红土颗粒之间的相互作用，其作用机理可以分为前期水解、初期侵蚀、中期胶结、后期溶解 4 个过程来解释。边汉亮等^[84]（2014）研究了有机氯农药污染土的微观机理。周杏等^[83]（2015）研究了柴油污染对上海地区粉质黏土工程性质的影响，发现其实质在于柴油的存在使得土粒发生絮凝，土颗粒粒径明显增大，大孔隙数目增多，并出现粉质黏土砂化现象。杨倩^[88]（2016）研究了垃圾渗滤液影响压实黏土的微观机理，研究表明：渗滤液对黏土的侵蚀主要来自其化学成分的吸附、黏结及水化学作用。杨小宝等^[103]（2016）研究了六偏磷酸钠溶液与红土颗粒之间的相互作用，其作用机理可以分为水解作用、吸附络合作用、还原氧化作用、成盐作用、溶解作用 5 个过程来解释。



1.3 红土污染问题的研究

1.3.1 一般污染红土研究

关于一般红土污染的问题,赵以忠^[104](1988)通过侵蚀模拟试验,研究了某厂强酸性废水对红黏土地基的侵蚀性,研究表明:酸污染导致地基红黏土中游离氧化物的胶结作用降低,孔隙比增大。孙重初^[105](1989)模拟红黏土在酸液侵入条件下的溶蚀作用,研究了酸液对红黏土物理力学性质的影响,研究表明:酸液浸泡会导致红黏土的比重减小、塑性指数降低、抗剪强度和压缩模量降低。王洋等^[106](2007)通过浸泡试验,研究了不同pH值的 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 和 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液对红土强度的影响,研究表明:酸性溶液可以增强含铁离子物质的胶结作用,提高红土的强度;而碱性溶液与酸性溶液相反,会降低红土的强度。

马琳等^[107](2009)通过室内试验,研究了人为调节pH值对红土颗粒组成、界限含水和三轴不排水抗剪强度的影响,发现红土的pH值越低,游离氧化铁与土的胶结能力越强,pH值越高,游离氧化铁与土的胶结能力越弱。顾展飞^[108](2012)开展了水化学作用对桂林红黏土性质影响的试验研究。顾展飞等^[109](2014)研究了酸碱及可溶盐溶液对桂林红黏土压缩性的影响,研究表明:HCl和NaOH溶液浸泡会导致红黏土的压缩系数增大,在 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 和 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液中浸泡后,红黏土的压缩系数随着溶液浓度的增大而降低。刘之葵等^[110](2014)研究了不同pH值条件下干湿循环作用对桂林红黏土力学性质的影响,研究表明:pH值相同,红黏土的黏聚力随干湿循环次数的增加而降低,内摩擦角随循环次数的增加而先增大后降低;干湿循环次数一定,无论随pH值的增大或减小,红黏土的黏聚力均减小,溶液酸性或碱性增大时内摩擦角均有不同程度的增大。

赵雄^[111](2015)通过室内试验和计算机图像处理系统,选用不同的化学溶液浸泡红黏土,研究了化学溶蚀作用下红黏土微细结构的变化规律,研究表明:红黏土在酸、碱溶液中会发生不同程度的化学溶蚀反应,其质量损失率随浸泡时间的延长而增加,并趋于稳定;随着溶蚀反应的进行,颗粒面积比例逐渐减小,颗粒定向度逐渐增大至稳定值,孔隙定向度小幅降低直至稳定;酸性溶液对红黏土的溶蚀作用最强。王志驹^[112](2015)通过三轴试验,研究了碱性环境下桂林红黏土的剪切特性。邱晓娟^[113](2015)开展了酸碱环境下改良的桂林红黏土的工程性质与微观结构研究,其方法是将改良土体浸泡到不同酸碱度的溶液中,研究不同掺量、浸泡时间和溶液酸碱度对改良红黏土力学性质和微观结构的影响。刘之葵等^[114](2016)研究了不同酸碱度对改良红黏土力学性质及微观结构的影响,研究表明:宏观上,酸性环境下改良土的黏聚力随浸泡时间的延长而减小;微观上,土粒的搭接形式、搭接程度以及颗粒间的胶结程度决定了土体的物理力学性质。

1.3.2 云南污染红土研究

关于云南红土的污染问题,国内学者已分别开展了酸污染红土、碱污染红土、硫酸



亚铁侵蚀红土、磷污染红土、铜污染红土、酸碱污染红土等问题的研究。Y Huang 等^[115] (2012) 通过迁移试验,研究了水环境下红土中铁离子的迁移特性。伯桐震等^[116] (2012) 通过宏微观试验,并考虑酸浓度、养护时间的影响,研究了酸污染红土的宏观物理力学特性及其微结构特性。刘鹏等^[117] (2012) 开展了云南红土铁离子迁移的试验研究。杨华舒等^[99] (2012) 研究了碱性材料对红土结构的侵蚀及危害。杨华舒等^[100] (2012) 研究了碱性材料与红土坝料的互损劣化特性。李晋豫^[118] (2012) 研究了碱性物质对红土大坝的破坏机理。Y Huang 等^[119] (2013) 研究了酸污染击实红土的微结构特性。王盼等^[120,121] (2013) 考虑酸浓度、养护时间的影响,研究了硫酸亚铁侵蚀红土的受力特性及微结构特性。任礼强^[122] (2014) 考虑碱浓度、养护时间的影响,研究了碱污染红土的宏微观特性及碱土作用特征。

杨华舒等^[123] (2014) 研究了碱侵蚀红土的工程指标与受损物质的关系。王毅^[124] (2014) 研究了酸碱侵蚀下红土的工程特性与受损化学成分的关系。樊宇航等^[125-127] (2014, 2016) 考虑干密度、含水率、浸泡时间的影响,研究了浸泡条件下酸污染红土的力学特性及微结构特性。杨小宝等^[128-130] (2015, 2016) 考虑磷浓度、时间、土柱深度的影响,研究了污染条件和迁移条件下磷污染红土的物理力学特性及微结构特性。潘泰等^[131,132] (2015, 2016) 考虑 pH 值、养护时间的影响,研究了不同 pH 值下酸碱污染红土的力学特性及微结构特性。范华^[133] (2015) 研究了碱侵蚀过程中红土的化学成分与工程性质的关系。李高等^[134,135] (2016) 考虑迁入、迁出时间的影响,研究了浸泡条件下碱污染红土的力学特性及微结构特性。李瑶等^[136,137] (2016) 考虑硫酸铜浓度、干密度、土柱深度、迁移时间的影响,研究了迁移条件下硫酸铜污染红土的抗剪强度特性及微结构特性。

这些研究都表明,环境变化会导致污染红土的宏微观特性发生相应变化,且总体向劣化的方向发展,最终必然危及红土土体结构的安全。

第2章 酸污染红土的宏微观响应

2.1 试验方案

2.1.1 试验材料

2.1.1.1 试验土样

试验土样为取自昆明世博生态城的红土，其基本特性见表2-1。由表2-1可见，该红土的颗粒组成以粉粒为主，按塑性指数分类为低液限粉质红黏土。

表2-1 红土的物理性质指标

风干含水率 $\omega_0/\%$	最优含水率 $\omega_{op}/\%$	比重 G_s	粒组含量		界限含水率		
			粉粒 $P_f/\%$ (0.005 ~ 0.075 mm)	黏粒 $P_n/\%$ (< 0.005mm)	塑限 $\omega_p/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑性指数 I_p
2.0	26.4	2.73	63.8	36.2	28.5	45.5	17.0

2.1.1.2 污染物的选取

因大部分的红土污染多为酸污染，其中以盐酸（HCl）污染为主，故本试验选取含量为36.46%的HCl作为污染源，其中含少量灼烧残渣、硫酸盐、亚硫酸盐、锡等，百分比含量为0.02%~0.05%。

2.1.2 宏观特性试验方案

本试验以昆明红土为研究对象，选取盐酸作为污染物，配制盐酸溶液，制备酸污染红土试样，开展酸污染红土的物理力学试验，研究酸污染红土的宏观特性。在试验过程中，考虑酸浓度、试样养护时间、洗盐、分散剂的影响。酸浓度 a 设定为0%、1.0%、3.0%、5.0%、7.0%、8.0%，对应盐酸溶液的pH值分别为1.16、0.86、0.53、0.37、0.21；试样养护时间 t 设定为0 d、1 d、4 d、7 d、14 d、30 d。其中，酸浓度0%代表未受酸污染的素红土，0 d代表试样未养护。

对于颗粒组成、比重、界限含水率等物理特性试验，其步骤如下：将制备好的不同浓度的盐酸溶液均匀喷洒在素红土样中进行浸润，并置于20℃的恒温水箱中进行养护；达到浸润养护时间后，充分搅拌均匀，开展物理性质试验，测试分析酸污染对红土宏观物理特性的影响。

对于击实、剪切、压缩等力学特性试验，先开展击实试验，即根据控制的含水率，将配制好的不同浓度的盐酸溶液分层洒在素红土样上，浸润1 d，然后充分拌合均匀，进