

## Mn<sup>2+</sup> 污染后膨胀土力学特性的试验研究

蒋忠凯<sup>1</sup>, 肖桂元<sup>1,2\*</sup>, 王一鹏<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学 土木工程学院广西岩土力学重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 针对污染后膨胀土的力学特性问题, 进行了无侧限抗压强度、直剪试验探讨宏观现象上力学特性的变化规律, 结合电镜扫描试验分析微观结构上的变化规律, 并在 X 射线衍射试验后, 采用了 JADE 分析软件对所收集到的原始数据进行了定量物相分析, 得出试样的各物相含量占比的变化趋势, 以此来探讨膨胀土力学特性的变化机理。试验结果表明: 在压实度与 Mn<sup>2+</sup> 浓度相同的条件下, 最优含水率的膨胀土试样强度最高; 在初始含水率相同的条件下, 试样的强度、内摩擦角和黏聚力均随着 Mn<sup>2+</sup> 浓度的增大而呈现出增大的趋势; 由 JADE 定量分析物相表明, 受 Mn<sup>2+</sup> 污染后土体内 SiO<sub>2</sub> 呈现出增加的趋势。原因为 MnSO<sub>4</sub> 溶液中的 Mn<sup>2+</sup> 水解后间接导致了膨胀土试样中的硅酸盐类矿物也发生水解, 释放了 SiO<sub>2</sub>, 增大了土体颗粒间的胶结作用, 使得土体整体性、稳定性提高。

**关键词:** 膨胀土; 锰离子; 力学特性; 应力-应变关系曲线; 微观结构

中图分类号: TU443

文献标识码: A

## Mechanical Characteristics of Expansive Soil Contaminated by Manganese Ions

JIANG Zhongkai<sup>1</sup>, XIAO Guiyuan<sup>1,2\*</sup>, WANG Yipeng<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering,

Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. School of Engineering,

China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430000, China)

**Abstract:** In response to the mechanical characteristics of contaminated expansive soil, unconfined compressive strength and direct shear tests were conducted to explore the changes in mechanical characteristics at the macroscopic level, combining SEM experiments to analyze the changes in microstructure. After XRD experiments, JADE analysis software was used to quantitatively analyze the collected raw data and obtain the trend of changes in the proportion of each phase content in the sample, in order to explore the mechanism of changes in the mechanical properties of expansive soil. The experimental results show that under the same compaction degree and Mn<sup>2+</sup> concentration, the expansive soil sample with the optimal moisture content has the highest strength; Under the same initial moisture content, the strength, internal friction angle, and cohesion of the sample all show an increasing trend with the increase of Mn<sup>2+</sup> concentration; Quantitative analysis of the phase by JADE indicates that SiO<sub>2</sub> in the soil shows an increasing trend after being contaminated with Mn<sup>2+</sup>. The reason is that the hydrolysis of Mn<sup>2+</sup> in MnSO<sub>4</sub> solution indirectly leads to the hydrolysis of silicate minerals in the expansive soil sample, releasing SiO<sub>2</sub> and increasing the bonding effect between soil particles, thereby improving the overall integrity and stability of the soil.

**Key words:** expansive soil; manganese ion; mechanical characteristics; stress-strain curve; microscopic structure

收稿日期: 2023-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52169022)

作者简介: 蒋忠凯(1999-), 男, 广西桂林人, 硕士研究生, 主要从事防灾减灾等领域的科研工作。

\* 通信作者: 肖桂元(1976-), 男, 湖南祁东人, 博士, 教授, 主要从事特殊土成灾机理及地下工程防灾的研究。

土壤的重金属污染是一个国际性问题。工业生产过程中废料处理不当导致重金属离子渗入土体的事件屡见不鲜<sup>[1-3]</sup>。锰是生活中一种常见的重金属,在工业中,锰及其化合物作原料用于许多工艺中;在农业中,土体中一定的锰离子含量对于农作物有一定的增产作用<sup>[4]</sup>。但是,外部环境施加的锰离子与土体本身如何相互作用尚未有全面的研究。

许多学者开展过关于重金属污染土力学特性的试验研究。如 Resmi 等发现重金属离子渗入土体会改变土体的液限和塑限,导致黏土含量减少、孔隙增加,进而降低土体强度<sup>[5-7]</sup>。另外,亦有学者如 Ratnaweera 等发现在低活性黏土中,土体受重金属离子污染后,土壤渗透系数增加,压缩指数降低,剪切强度增加,相反,高活性黏土,强度特性却呈现出相反的趋势<sup>[8-11]</sup>。这些研究中将引起强度特性变化的原因归于液限和塑限的改变,并用扩散双电层理论解释了这一现象。然而,针对于锰离子与土体之间相互作用的研究较少,邵伟等<sup>[12-13]</sup>进行了锰离子与土体之间的相互作用研究,发现  $Mn^{2+}$  能与其中矿物反应,并生成沉淀。

在众多污染土中,膨胀土作为一种特殊性黏土,也被称为“胀缩性土”<sup>[14]</sup>,其分布广泛,在中国东南部分布面积达 40% 以上<sup>[15-16]</sup>。在膨胀土分布区内,由于膨胀土特有的吸水膨胀和失水收缩引发的边坡失稳、路基塌陷等工程事故屡见不鲜<sup>[17-19]</sup>,受重金属污染后膨胀土力学特性发生变化而引发的工程事故也很多<sup>[20-21]</sup>,而锰作为一种重金属,在生产过程中亦存在着许多渠道使其入渗至土体中而造成污染。

以上各方面的研究表明,重金属污染对于土体力学特性有着不同程度的影响,主要体现在宏观上抗压抗剪强度、应力-应变关系曲线、胀缩等特性上的变化,许多学者从微观结构上定性分析了孔隙结构、矿物种类等的变化,以解释宏观现象上的变化<sup>[22-23]</sup>。但是,现有的研究关于微观上定量分析重金属污染土矿物成分相对较少,在微观层面上定量分析受  $Mn^{2+}$  污染后膨胀土的矿物成分的含量相比于定性分析显得更为重要。

故本研究引入一种新的方法,利用 JADE 分析软件和绝热法对 XRD 试验后的原始数据进行定量分析,旨在确定受  $Mn^{2+}$  污染的膨胀土试样内主要矿物成分定性和定量的变化,然后结合无侧限抗压强度试验、直剪试验和 SEM 试验的结果,寻找出

污染后膨胀土力学特性的变化规律,最后从微观角度解释引起其变化的机理,为初步了解污染后膨胀土的力学特性提供一定的参考。

## 1 试验方案

### 1.1 $Mn^{2+}$ 溶液制备

为模拟实际工程情况,本文采用的是分析纯级别的  $MnSO_4 \cdot H_2O$  化学试剂,并用蒸馏水配制四种不同浓度的  $MnSO_4$  溶液。

### 1.2 土样选取与重塑土制备

土样选取:试验所用膨胀土土样取自河南南阳市某建筑工地,取土深度 3~8 m,自由膨胀率 42%,具有弱膨胀性。将所选膨胀土进行风干,经碎土机碾碎,过 2 mm 土工筛,再进行膨胀土土样的基本物理性质试验,试验结果见表 1。

表 1 膨胀土的基本物理性质指标

Tab. 1 Basic physical property indicators of expansive soils

塑限 $W_p/\%$	液限 $W_L/\%$	塑性 指数	最优含 水率 $\omega/\%$	最大干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	自由膨胀 率 $\delta_{et}/\%$
25	44.1	19.1	21	1.65	42

重塑土制备:取过筛后的膨胀土和配制好的  $MnSO_4$  溶液,采用人工搅拌-击实制样法配制重塑土样,设计  $Mn^{2+}$  浓度与初始含水率两个变量, $Mn^{2+}$  浓度分别为 0、0.05、0.1、0.2 mol/L,初始含水率分别为 19%、21%、23%,将配制好的重塑土样放入保鲜袋密封,并置于标准室温环境中的保湿缸养护 48 h,以确保水分在土样中进行充分迁移。

### 1.3 无侧限抗压强度试验与直剪试验

无侧限抗压强度试验:将配制好的重塑土样放入制样器中,分四层压实,压实度为 95%,制成高 80 mm,直径 39.1 mm 的圆柱形土样。试验所用的仪器为标准万能试验机,加压速度设置为 1 mm/min,设有两个平行样,共计 24 个试样。

直剪试验:将上述配制好的重塑土样放入环刀制样器中压实,压实度为 95%,制成高 20 mm,直径 61.8 mm 的圆柱形土样。试验所用的仪器为 ZJ 型应变控制式直剪仪,对试样进行以剪切速率为 0.8 mm/min 的快剪试验,并记录千分表上最大位移读数,设有两个平行样,共计 96 个试样。

### 1.4 XRD 衍射试验与 SEM 扫描电镜试验

XRD 衍射试验:取重塑土样进行风干、研磨,

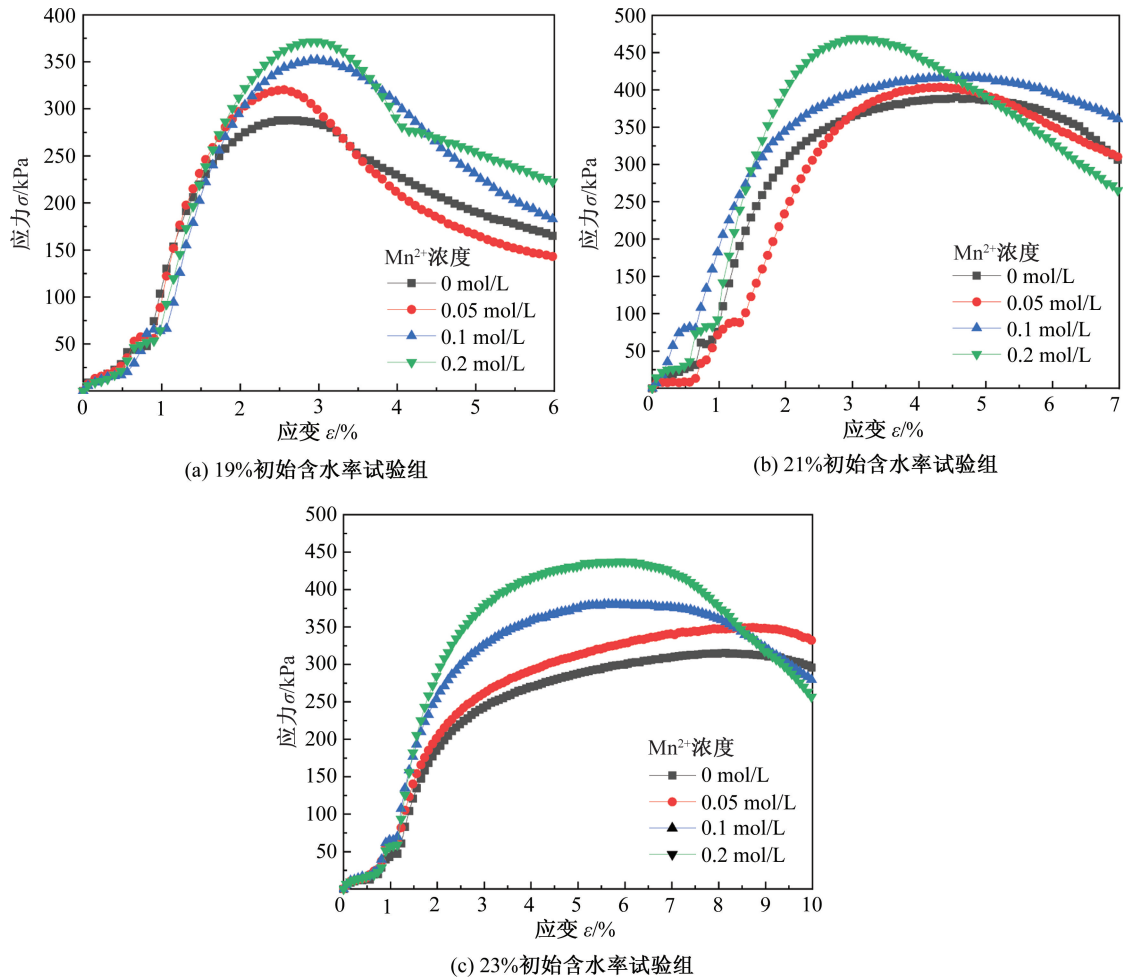


图1 相同初始含水率下应力-应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain curve for the same initial water content

过 0.075 mm 筛,再用小勺舀取 1 g 左右于置样器中。试验所用仪器为荷兰帕纳科公司生产的 X 射线衍射仪。

SEM 扫描电镜试验:取经直剪试验后的试样进行风干、切样,用镊子夹起一小块直径约为 2 mm 重塑土样于样台上,再对试样进行贴导电胶、固定和喷金处理。试验所用仪器为日本高新技术公司生产的 S-4800 场发射扫描电子显微镜。

## 2 结果与分析

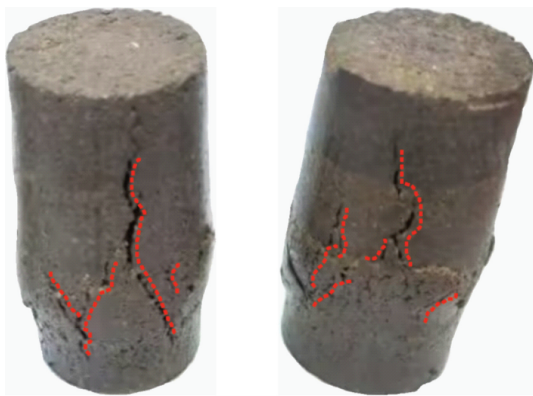
### 2.1 无侧限抗压强度试验

根据标准万能试验机所得出的数据,绘制相同初始含水率与压实度下不同  $Mn^{2+}$  浓度下重塑土试样的应力-应变关系曲线,如图 1 所示。

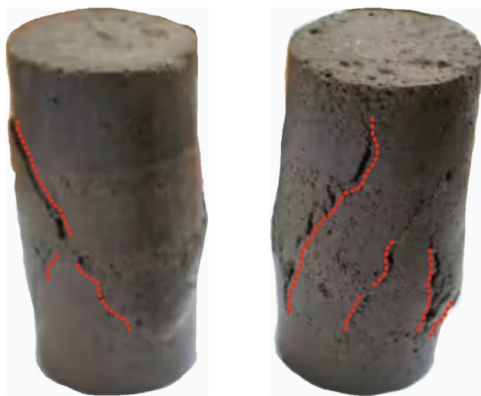
在处理数据过程中,取每条曲线的峰值作为相应变量土样的抗压强度。

由图 1 可知:(1)在相同初始含水率的条件下, $Mn^{2+}$  浓度对膨胀土试样的抗压强度有较为明

显的影响,且前者与后者成正比关系,即  $Mn^{2+}$  浓度越大,试样抗压强度越大。(2)不同初始含水率下土样出现峰值的应变也大不相同,图 1(a)中,在轴向应变加载到 2.5%~3.5% 时出现峰值;图 1(b)中,在轴向应变加载到 3%~4.5% 时出现峰值;而图 1(c)中,在轴向应变加载到 5% 以后才出现峰值。(3)三个试验组的应力-应变关系曲线均呈现为弹塑性模型,随着初始含水率的增加,曲线逐渐由应变软化型向应变硬化型发生转变,表现为曲线在出现峰值后的下降趋势逐渐变得缓慢。出现第二与第三个现象的原因可能为:随着初始含水率的增加,膨胀土试样黏稠度增加,逐渐由脆性破坏向塑性破坏转变。观察图 2 膨胀土试样破坏图得出,初始含水率为 19% 试样的破坏裂缝较大,且大多为垂直于水平方向,表现为脆性破坏,初始含水率为 21% (最优含水率) 试样的破坏主裂缝约与水平方向成 45°,其余小裂缝垂直于水平方向,而初始含水率为 23% 的试样的破坏裂缝不明显,只可观察到几条小裂缝,表现为塑性破坏。



(a) 19%初始含水率试验组



(b) 21%初始含水率试验组



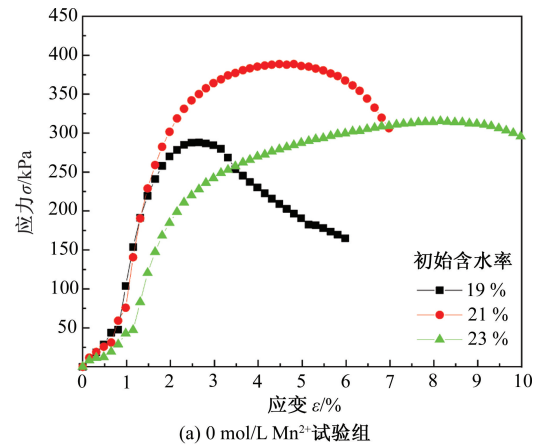
(c) 23%初始含水率试验组

图2 膨胀土试样破坏图

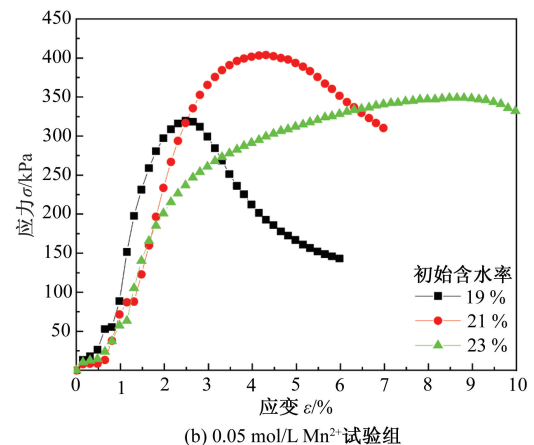
Fig. 2 Expansive soil specimens damage diagram

绘制相同  $Mn^{2+}$  浓度下不同初始含水率重塑土试样的应力-应变关系曲线,如图3所示。

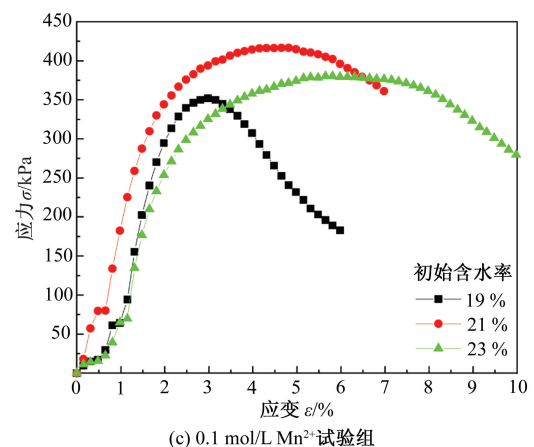
由图3可知,在压实度与  $Mn^{2+}$  浓度相同的条件下,初始含水率对膨胀土试样的抗压强度有较为明显的影响,在21%初始含水率(最优含水率)条件下,试样的抗压强度最大<sup>[24-25]</sup>,而23%初始含水率下的土样抗压强度略高于19%初始含水率下的土样抗压强度。由图3(d)可知,21%初始含水率下受0.2 mol/L  $Mn^{2+}$  浓度污染后膨胀土试样的抗压强度最大,可达468 kPa。



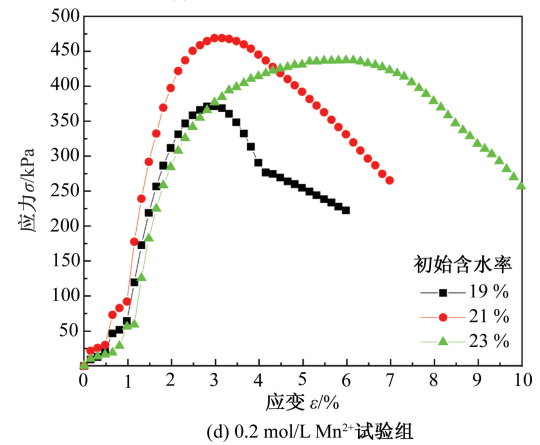
(a) 0 mol/L  $Mn^{2+}$  试验组



(b) 0.05 mol/L  $Mn^{2+}$  试验组



(c) 0.1 mol/L  $Mn^{2+}$  试验组



(d) 0.2 mol/L  $Mn^{2+}$  试验组

图3 相同浓度下应力-应变关系曲线

Fig. 3 Stress-strain curve at the same concentration

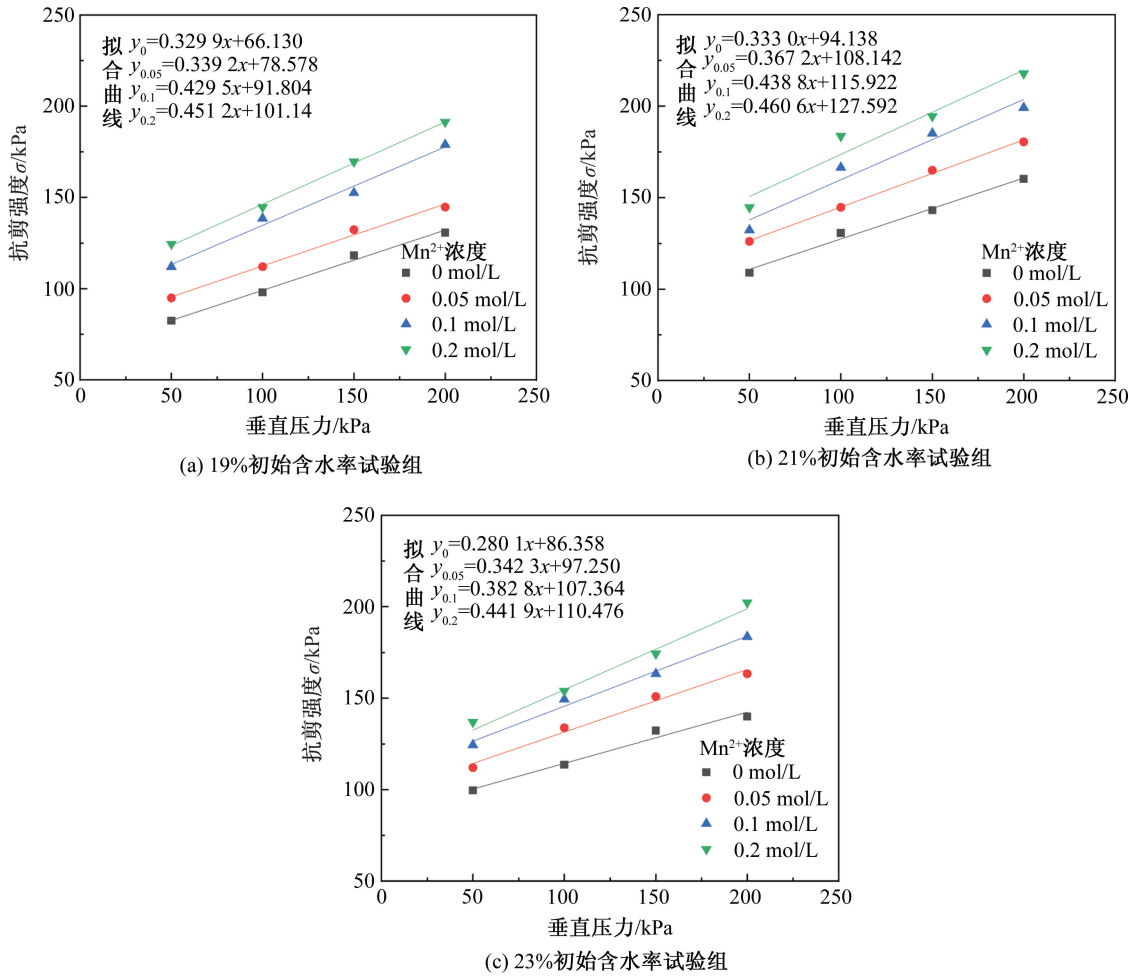


图 4 相同初始含水率下最大抗剪强度变化曲线

Fig. 4 Change curve of maximum shear strength with the same initial water content

### 2.2 直剪试验

本研究采用更适用于黏性土的库仑定律分析土体抗剪强度的变化规律,即:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中,  $\tau_f$ —抗剪强度, kPa;  $\sigma$ —总应力, kPa;  $c$ —土的黏聚力, kPa;  $\varphi$ —土的内摩擦角, ( $^\circ$ )。

根据直剪仪所得出的数据,绘制相同初始含水率、不同  $Mn^{2+}$  浓度下重塑土试样的最大抗剪强度变化曲线,如图 4 所示。

由图 4 可知,在试验过程中,试样的抗剪强度随着施加的竖向应力增加而增加,且两者呈一次函数关系,拟合曲线已在各图中予以画出。另外,在垂直压力和初始含水率均相同的条件下,试样的抗剪强度随着  $Mn^{2+}$  浓度的增加而增加,而在垂直压力和  $Mn^{2+}$  浓度相同的情况下,初始含水率为 21% (最优含水率) 的试样抗剪强度最大,最大可达 218 kPa。

根据库伦公式可知,抗剪强度的大小主要由

黏聚力与内摩擦角两大因素决定。然后根据图 4 中的拟合曲线,可得出试样的黏聚力与内摩擦角,最后分别绘制黏聚力  $c$  与内摩擦角  $\varphi$  变化曲线,如图 5 和图 6 所示。

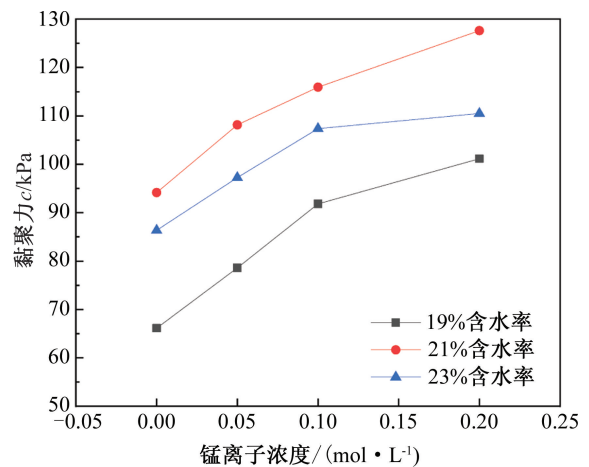
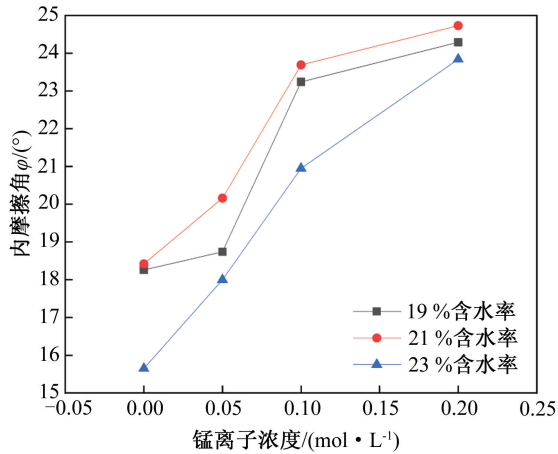


图 5 黏聚力  $c$  值变化曲线

Fig. 5 Change curve of cohesion  $c$ -value

图6 内摩擦角  $\varphi$  值变化曲线Fig. 6 Change curve of internal friction angle  $\varphi$ -value

由图5和图6可知,在压实度与  $\text{Mn}^{2+}$  浓度相同的条件下,初始含水率为21%试样的黏聚力与内摩擦角均最大,随着  $\text{Mn}^{2+}$  浓度的增加,膨胀土试样的黏聚力和内摩擦角均呈上升趋势,在低浓度条件下,两者都表现出快速提高的趋势,但在  $0.1 \text{ mol/L Mn}^{2+}$  浓度以后,这种上升趋势有所减缓,可能由于  $\text{Mn}^{2+}$  水解间接导致土中硅酸盐矿物水解后,其含量占比有所下降(于下文中作具体分析),反应变得没有低浓度下那么剧烈,因此随着  $\text{Mn}^{2+}$  浓度增加,黏聚力与内摩擦角增大的趋势逐渐减缓。

在直剪试验中,黏聚力与内摩擦角作为抗剪强度的重要指标,可以直接反映土体的强度变化趋势,而本研究中试样的黏聚力与内摩擦角双双呈上升趋势,不可否认地将导致试样抗剪强度的大幅提高。

### 2.3 XRD 衍射试验

本试验因条件有限,故选取最优含水率(21%)的膨胀土试验组进行试验。以受  $0 \text{ mol/L}$  与  $0.2 \text{ mol/L}$  的  $\text{Mn}^{2+}$  浓度污染后的膨胀土试样为例,分析对比两者前后的 XRD 图谱变化,见图7所示。

由图7可知,此膨胀土的主要矿物成分有石英、钠长石、伊利石和蒙脱石,且在加入  $\text{Mn}^{2+}$  后未出现新的矿物,但主要矿物成分的含量有一定的变化,即量变质不变。对比图7不难发现,石英( $\text{SiO}_2$ )的衍射峰值有所上升,原因可能为试样中加入  $\text{Mn}^{2+}$  后促使了土体中硅酸盐类物质发生水解,造成硅酸盐类物质的分解,释放出  $\text{SiO}_2$ ,导致石英的衍射峰值发生了明显的增加;而图7难以体现出钠长石、伊利石和蒙脱石的衍射峰值变化,需

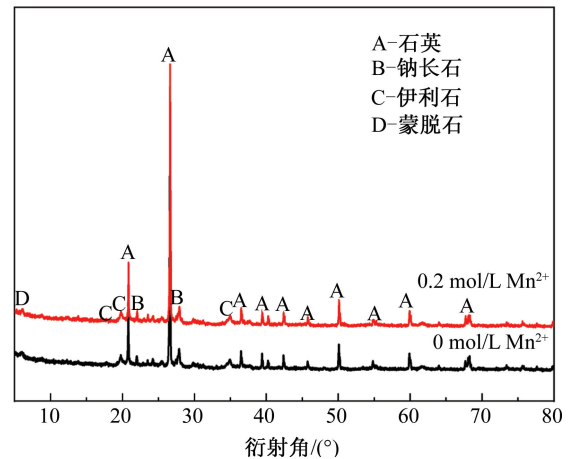


图7 XRD 衍射试验图谱合图

Fig. 7 Composite image of XRD diffraction test pattern

从矿物成分主要的含量占比出发讨论研究。

分析 XRD 衍射试验的原始数据采用了 JADE (Materials Data JADE 或者 MDI JADE) 软件,在软件中自定义了 20 种(H、O、S、Si、Ca、Na、Al、K、Mg 等)膨胀土中可能存在的元素作为 PDF 卡片,对 PDF 卡片上检索出来的各物相进行初步分析,得出每一个物相的  $K$  值( $RIR$  值)和最大衍射强度,再采用绝热法定量方程,见式(2),即可求出各物相的含量占比。本方法适用于任意物相作为参照物相  $i$  相,通过定量方程计算得出  $j$  相含量占比,具有较好的实用性,且可根据不用参照物相计算得出目标物相的含量占比,再对各自计算结果进行比较,保证了计算结果的准确性。通过以上分析计算得出的各矿物成分含量占比,如图8所示。

$$\omega_j = \frac{I_j}{K_i^j \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{K_i^i}} \quad (2)$$

式中,  $\omega_j$  —  $j$  相的含量占比;  $I_j$  —  $j$  相的衍射峰强度;  $K_i^j$  —  $j$  相的  $K$  值与  $i$  相  $K$  值的比值。

从图8中可看出,各矿物成分占比变化并非特别明显,最大变化量约为2%左右,但其增加或减少的变化趋势较为明显,尤其可从图8中较为直观地看出,在向膨胀土试样中加入  $\text{Mn}^{2+}$  后,石英与蒙脱石的含量占比呈稳定增加趋势,而钠长石与伊利石的含量占比呈稳定减少趋势。

石英的主要成分是  $\text{SiO}_2$ ,导致  $\text{SiO}_2$  含量逐渐增加的原因可能为:  $\text{MnSO}_4$  为强酸弱碱盐,随着向试样中逐渐加入  $\text{MnSO}_4$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  开始发生水解,不断生成  $\text{H}^+$  与  $\text{Mn}(\text{OH})_2$  沉淀,而在此不断引入  $\text{H}^+$  的情况下,促使了硅酸盐类矿物水解顺利进行,生成

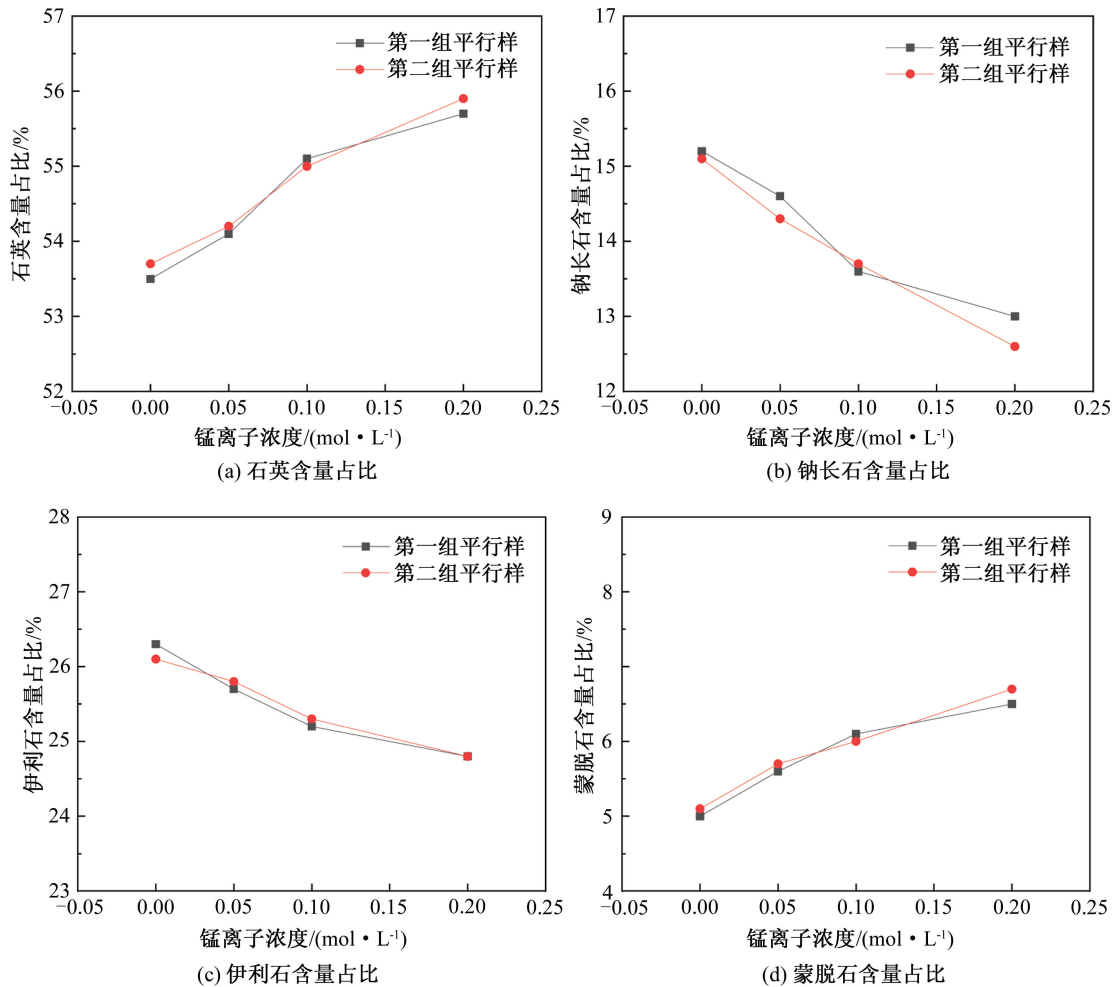
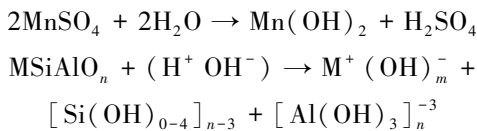


图 8 主要矿物含量占比变化图

Fig. 8 Changes of main mineral content ratio

了具有一定聚合程度的  $SiO_2$  群的络合物,即在图中体现为  $SiO_2$  含量的增加。 $SiO_2$  本身具有一定的胶结作用,对土体颗粒之间的相互连接及团聚体的构建具有促进作用,使土体颗粒由松散状态向聚集状态转变,这解释印证了为何上述直剪试验中膨胀土黏聚力与内摩擦角会有所提高。



前式为  $Mn^{2+}$  水解反应;后式中,  $n$  为不定原子比,  $m$  为化合价,  $M$  为金属离子;  $[Si(OH)_{0-4}]_n$  为具有一定聚合程度的  $SiO_2$  群的络合物;  $Si$  相对于  $(OH)$  的配位数变化在 0 到 4 之间,全式表示在氢离子不断进入硅酸盐矿物后置换出金属离子  $M$ 。

#### 2.4 SEM 扫描电镜试验

本试验以最优含水率(21%)的膨胀土试验组

为例,对受 0、0.05、0.1、0.2 mol/L 浓度  $Mn^{2+}$  污染后的试样进行试验,观测位置为试样表面,放大倍数为 500 倍,其结果如图 9 所示(图中已用红线圈出土体表面孔隙变化情况)。

由图 9 可知,在初始含水率相同的条件下,素土表面粗糙,不平整,呈絮凝状,且有许多大小不一的孔隙,整体呈松散、小部分聚集状态,土体颗粒间连接性较差,随着试样受  $Mn^{2+}$  污染后,土体中硅酸盐类物质分解后生成的  $SiO_2$  填充了颗粒之间的孔隙,颗粒之间的胶结作用变强,导致贯通大孔隙减少,逐渐形成较大的团聚体,其表面由絮凝状向片状转变,整体性、稳定性提高。尤其是图 9 (d),土体整体性良好,表面较为平整,颗粒呈团聚体紧密连接在一起,在直剪强度试验中表现为黏聚力与内摩擦角均增大。

#### 2.5 机理分析

这里主要对于膨胀土土体抗剪强度影响较大的两大因素(黏聚力与内摩擦角)进行分析。

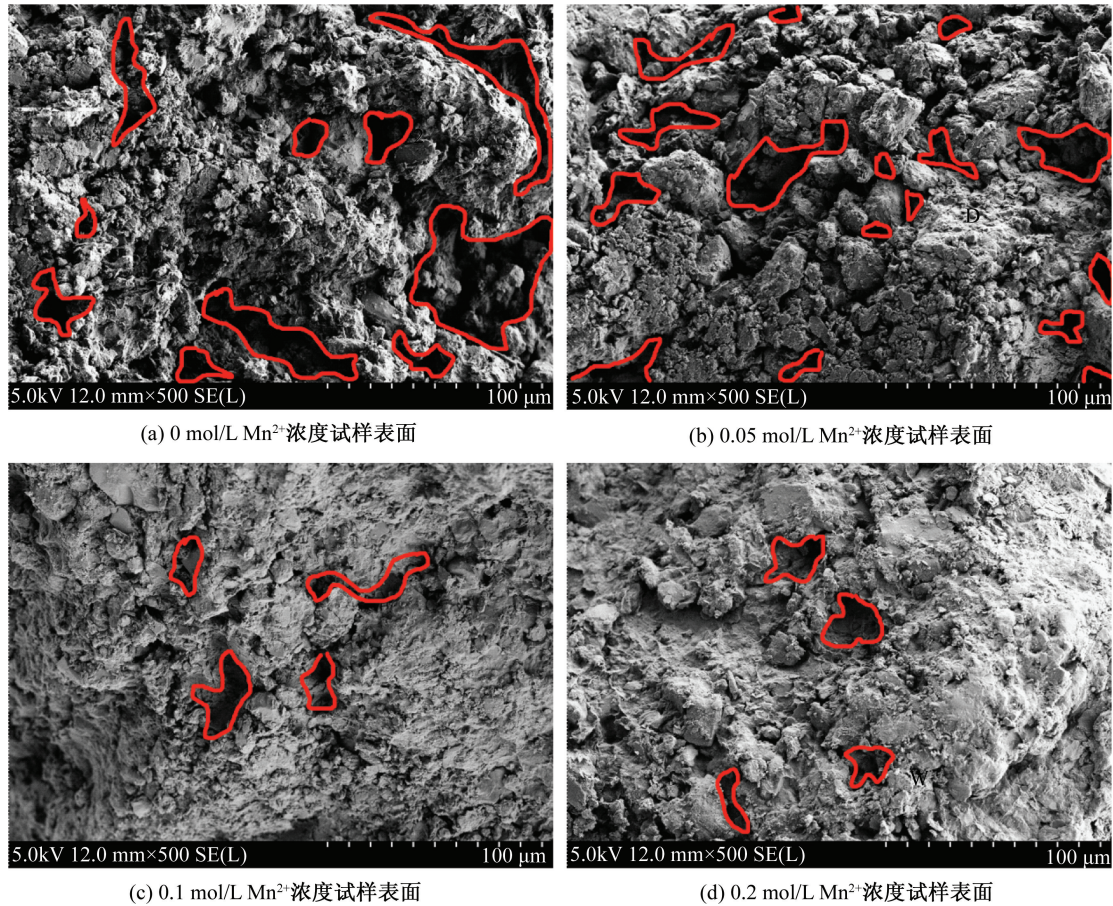


图9 SEM 扫描电镜试验结果

Fig. 9 SEM test results

膨胀土的黏聚力主要源于土体颗粒之间的结合水膜连接和土体颗粒分子之间的相互吸引、胶结作用,且以结合水膜与胶结作用为主导作用,膨胀土中矿物大多为硅酸盐类物质,随着试样中  $Mn^{2+}$  的加入,其与土体中的矿物发生化学反应,造成硅酸盐类物质的分解,释放出  $SiO_2$ ,而  $SiO_2$  具有一定的胶结作用,加强了土体颗粒之间的连接,即导致黏聚力的提高。

膨胀土的内摩擦角主要源于颗粒结构及土体密实度,本研究在试验中严格控制土体密实度为 95%,而在密实度一定的情况下,内摩擦角大小主要取决于颗粒结构。在最优初始含水率(21%)条件下,土颗粒在土体中游离氧化物(主要为氧化铁)的胶结作用下,形成了稳定牢固的团聚体,以团聚体的形式存在,整体性增强,结构强而密实,其干密度达到最大,故内摩擦角达到最大。而在 19%、23% 初始含水率条件下,土体团聚体结构不如前者,整体性与稳定性略逊于前者,故内摩擦角不如前者。而随着试样中  $Mn^{2+}$  的加入,可能由于  $Mn^{2+}$  与土体矿物反应释放出的  $SiO_2$  增加了土体颗

粒之间的胶结作用,导致了土体颗粒更容易形成团聚体,整体性与稳定性均提高,进而内摩擦角增大。

### 3 结论

综上所述,受  $Mn^{2+}$  污染后膨胀土的抗压、抗剪强度有所增加,整体性、稳定性有所提高。本研究可得出以下几点结论:

1) 南阳膨胀土的无侧限抗压强度与  $Mn^{2+}$  浓度成正比关系,即浓度越大,试样无侧限抗压强度越大;压实度与浓度相同的条件下,最优含水率(初始含水率为 21%)的试样无侧限抗压强度最大。

2) 南阳膨胀土的抗剪强度与  $Mn^{2+}$  浓度成正比关系,即浓度越大,试样抗剪强度越大;压实度与浓度相同的条件下,最优含水率(初始含水率为 21%)的试样抗剪强度最大;随着溶液浓度的增大,黏聚力与内摩擦角均增大。

3) 由 JADE 分析软件与 XRD 图谱得出:试样加入  $Mn^{2+}$  后,并未生成新的物相,但主要矿物成分含量有所变化,表现为石英与蒙脱石含量增加,钠

长石与伊利石的含量减少。 $Mn^{2+}$  水解后不断生成  $H^+$ , 促使土中硅酸盐类矿物在酸性环境下发生水解, 生成一定聚合程度的  $SiO_2$  群的络合物, 加强了土体颗粒之间的胶结作用, 提高了土体的抗压、抗剪强度。

4) 由 SEM 扫描电镜试验观察可得: 随着试样中  $MnSO_4$  溶液浓度的提高, 土体颗粒由松散状态向聚集状态转变, 硅酸盐类物质分解后生成的  $SiO_2$  填充了颗粒之间的空隙, 颗粒之间的胶结作用变强, 使得土体颗粒逐渐形成团聚体, 其整体性、稳定性提高。

#### 参考文献:

- [1] 葛红臣. 河南平顶山矿区地质环境综合评价分区研究[J]. 中国水运(下半月), 2009, 9(12): 145-147.
- [2] 吴炎, 潘子晴, 朱春鹏, 等. 重金属污染土工程性质研究进展[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 750-756.
- [3] 赵峰, 谌斌, 李明顺. 锰及锰镉复合污染对锰矿区茶园土壤酶活性的影响[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2008, 26(4): 128-131.
- [4] 桂松龄, 吴会昌. 锰元素与蔬菜生产关系研究[J]. 北方园艺, 2009(4): 116-117.
- [5] RESMI G, SANTOSH G, THAMPI S G. Impact of lead contamination on the engineering properties of clayey soil[J]. Journal of the Geological Society of India, 2011, 77(1): 42-46.
- [6] 查甫生, 刘晶晶, 夏磊, 等. 重金属污染土的工程性质试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S2): 1982-1985.
- [7] 刘志彬, 方伟, 陈志龙, 等. 锌离子污染对膨润土一维压缩特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2211-2217.
- [8] RATNAWEERA P, MEEGODA J N. Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, 29(2): 133-140.
- [9] LI J S, XUE Q, WANG P, et al. Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay[J]. Appl. Clay Sci. 2015, 105, 192-199.
- [10] WANG J, MOU C, ZHAO H, et al. Experimental study on the quantitative relationship between the strength of physical properties of heavy metal contaminated soils[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (in English and Chinese), 2020, 42(2): 30-36.
- [11] 储诚富, 查甫生, 夏磊, 等. 锌污染黏土工程性质的试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(1): 118-121.
- [12] 邵伟, 郑明宇, 高佳齐. 磁性膨润土的制备及其对水体中微量重金属离子  $Mn(II)$  的吸附研究[J]. 化工矿物与加工, 2021(7): 53-56.
- [13] 詹旭, 罗泽娇, 马腾. 高岭土吸附剂去除含锰废水中锰离子的实验研究[J]. 地质科技情报, 2005(1): 95-98.
- [14] 程展林, 龚壁卫. 膨胀土边坡[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [15] JONES L D, JEFFERSON I. ICE manual of geotechnical engineering. Geotechnical engineering principles, problematic soils and site investigation[M]. London: ICE Publishing, 2012.
- [16] NELSON J D, CHAO K C G, OVERTON D D, et al. Nature of expansive soils[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [17] 徐永福, 程岩, 唐宏华. 膨胀土边坡失稳特征及其防治技术标准化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 1-20.
- [18] CHEN N C, ZHENG Y J, HE X F, et al. Analysis of the report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [19] ZHANG L Y, CHEN T L, ZHANG D L. Progressive failure of expansive soil slopes under rainfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 70-77.
- [20] DUTTA J, MISHRA A K. Influence of the presence of heavy metals on the behaviour of bentonites[J]. Environment Earth Sciences, 2016, 75: 993-998.
- [21] 陈日高, 马福荣, 庞迎波. 重金属污染土强度特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(6): 94-98.
- [22] 肖桂元, 韦桐忠, 江廷荟, 等. 重金属  $Cu^{2+}$  污染作用下红黏土的膨胀变形特性[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(1): 15-24.
- [23] WEI T Z, XIAO G Y, AN R, et al. Microstructure and shear strength characteristics of copper contaminated ningming expansive clay[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 41(5): 93-98.
- [24] 卢召红, 王凯勃, 王尊策, 等. 含水率对冻结粉质黏土力学性能的影响[J]. 工业建筑, 2021, 51(3): 153-157+97.
- [25] 周伟洋, 刘建坤. 氯化钙预处理的压实黄土的力学特性[J]. 公路, 2021, 66(10): 291-295.

(责任编辑 王利君)