

# 含水率和干密度对三峡库区紫色土膨胀特性的影响<sup>①</sup>

薄纯悦<sup>1,2</sup>, 刘春红<sup>1,2,3\*</sup>, 冷佳欣<sup>1,2</sup>, 陈 聪<sup>1,2</sup>

(1 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 2 重庆师范大学三峡库区地表过程与生态修复重庆市重点实验室, 重庆 401331; 3 三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站, 重庆 401331)

**摘 要:** 为明晰土壤初始含水率和干密度对紫色土土体膨胀过程机制的影响, 选取三峡库区典型紫色土为研究对象, 通过室内无荷膨胀试验, 采用双因素方差分析、响应面分析, 探讨不同初始含水率(5%、10%、15%、20%、25%)、土壤干密度(1.1、1.3、1.5 g/cm<sup>3</sup>)的紫色土无荷膨胀特征。结果表明: ①紫色土无荷膨胀率随时间的变化规律可分为快速膨胀、缓慢膨胀和膨胀稳定 3 个阶段; ②在快速膨胀、缓慢膨胀阶段紫色土无荷膨胀率呈对数增长, 采用对数函数对紫色土膨胀时程进行拟合, 拟合效果较好( $R^2$  均大于 0.65); 紫色土无荷膨胀率随初始含水率升高而降低, 随干密度增加而升高; 方差分析表明, 土壤初始含水率、干密度及两者交互作用对紫色土无荷膨胀率的影响极显著( $P<0.01$ ); 响应面关系模型可较好地反映土壤初始含水率、干密度与紫色土无荷膨胀率的关系( $R^2=0.92$ ); ③紫色土膨胀过程与吸水过程具有过程上的一致性, 多在吸水初期发生大幅膨胀, 紫色土含水率达到稳定状态所需时长均短于土壤膨胀率稳定状态耗时。研究结果可为三峡库区的农业可持续发展和紫色土资源保护提供科学依据。

**关键词:** 三峡库区; 紫色土; 无荷膨胀率; 初始含水率; 干密度

**中图分类号:** S157.1      **文献标志码:** A

## Effects of Moisture and Dry Density on the Swelling Characteristics of Purple Soil in the Three Gorges Reservoir Area

BO Chunyue<sup>1,2</sup>, LIU Chunhong<sup>1,2,3\*</sup>, LENG Jiaxin<sup>1,2</sup>, CHEN Cong<sup>1,2</sup>

(1 College of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2 Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Ecological Restoration in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China; 3 Chongqing Field Observation and Research Station of Surface Ecological Process in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** In order to clarify the effects of initial soil moisture and dry density on the expansion process mechanism of purple soil, the typical purple soil was selected in the Three Gorges Reservoir area for indoor unloaded expansion test, two-factor analysis of variance and response surface analysis were used to investigate the unloaded expansion characteristics under different initial moistures (5%, 10%, 15%, 20%, 25%) and dry densities (1.1, 1.3, 1.5 g/cm<sup>3</sup>). The results showed that: 1) The variation of the unloaded expansion rate with time was obvious, which could be divided into three stages: rapid expansion, slow expansion and stable expansion. 2) In the stages of rapid and slow expansions, the unloaded expansion rate increased logarithmically, and the semi-logarithmic function was used to fit the expansion time course, and the fitting effect was better ( $R^2>0.65$ ). The unloaded swelling rate decreased with the increase of initial moisture, when the dry density was increased, the unloaded swelling rate increased. The analysis of variance showed that the initial moisture, dry density and their interaction had significant effects on the unloaded swelling rate ( $P<0.01$ ). The response surface relationship model could better reflect the relationship between the initial moisture, dry density and the unloaded expansion rate ( $R^2=0.92$ ). 3) The expansion process was consistent with the water absorption process, and most of them expanded greatly in the initial stage of water absorption. The time reaching to the stable state required was shorter for the moisture than that for soil expansion rate. The results can provide scientific basis for sustainable

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42107355)、重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0489)和三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室开放基金项目(DBGC201805)资助。

\* 通讯作者(20131490@cqu.edu.cn)

作者简介: 薄纯悦(2000—), 女, 山东东营人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: sushui3032938028@163.com

development of agriculture and protection of purple soil resources in the Three Gorges Reservoir area.

**Key words:** Three Gorges Reservoir area; Purple soil; Unloaded expansion rate; Initial moisture content; Dry density

膨胀性是土壤重要的物理性质,主要是因土壤中黏土矿物膨胀和土壤黏粒接触水分发生水化作用引起的土体体积增大的现象<sup>[1]</sup>。土壤膨胀会引起总孔隙度增加,孔径减小,膨胀压增大,改变土壤结构和水分运动方向,对土壤的入渗性、保水性有显著影响,进一步影响工程建设的安全性和农作物产量的稳定性<sup>[2-3]</sup>。因此,深入研究土壤膨胀性的规律,可以更好地管理和保护土壤资源,促进农业可持续发展。

土壤膨胀主要受土壤自身的结构、黏土矿物组分、颗粒组成、含水率、密度等因素的影响,如变性土中黏土矿物组成对土壤胀缩性具有决定性作用,其中蒙脱石含量对土壤胀缩性有较大影响,蒙脱石含量与黏粒含量呈线性相关<sup>[4]</sup>;黄土区土壤膨胀性与物理性黏粒和粒径<0.02 mm 土壤颗粒含量呈幂函数关系( $P<0.01$ ),土壤有机质、碳酸钙则有抑制土壤膨胀的作用<sup>[5]</sup>;土壤黏粒含量越高,膨胀性越强,其中细黏粒对土壤胀缩特性影响较显著<sup>[6]</sup>;崩岗区红土膨胀率随干密度的增加呈上升趋势,随初始含水率的增加,干密度对土壤膨胀性的影响高于初始含水率的影响<sup>[7]</sup>;游离氧化铁含量与崩岗土壤膨胀率呈线性递增关系( $P<0.01$ )<sup>[8]</sup>。此外,土体膨胀受外部环境的影响也较大<sup>[9]</sup>,如温度可以增加黏粒间扩散双电层厚度,温度越高膨胀率越大<sup>[10]</sup>;干湿循环的环境条件会破坏土体内部结构,使土颗粒破碎,随干湿循环次数的增加,土壤膨胀性能降低<sup>[11]</sup>;在酸性条件下,土壤中部分胶结物被稀释,土粒间联系减弱,土壤胀缩特性增强<sup>[12]</sup>;生物结皮可使干旱沙区土壤的膨胀高度增加 93 倍<sup>[2]</sup>,还可改变风沙土和黄绵土表层的膨胀性,其影响的程度和方向取决于土壤类型<sup>[13]</sup>。

紫色土是由紫色砂页岩发育而成的一种岩成土,在三峡库区广泛分布<sup>[14-15]</sup>,是我国重要的农业土壤资源之一,由于含有伊利石、蒙脱石等黏土矿物,具有一定的膨胀性<sup>[16-17]</sup>。目前土壤膨胀性研究集中在西北地区的栗钙土<sup>[18]</sup>、黄绵土和风沙土<sup>[13]</sup>和南方湿润区红黏土<sup>[19]</sup>等土壤类型,对紫色土等农业土壤的关注较少。因此,本研究以三峡库区沙溪庙组紫色土为研究对象,通过无荷膨胀试验,分析不同土壤初始含水率和干密度下紫色土膨胀性的变化特征,并构建紫色土膨胀性时程变化模型和影响因素模型,探讨初始含水率、干密度对紫色土膨胀性的影响机制,以期对三峡库区的农田建设和土壤结构改善提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区歇马镇白鹤林村(29°45'35"N~29°45'50"N, 106°22'15"E~106°22'30"E),地处缙云山脉和中梁山之间,平均海拔 241 m,属亚热带季风性湿润气候区,年均温 18.7℃,7、8 月高温天气较多,年均降水量为 1 163 mm,多集中在 5—9 月。区域内紫色土母质为侏罗系红层沙溪庙组砂页岩风化物,主要含蒙脱石、蛭石和少量伊利石<sup>[20-21]</sup>,质地为粉砂壤土,土壤 pH 呈中性。研究区内坡耕地主要农作物有油菜、红薯、玉米等。

### 1.2 土壤样品采集

2023 年 2 月中旬,根据多点等量采样原则,按照“S”形采集土样,共采集新鲜土壤重约 5 kg。均匀混合后自然风干,剔除石块、根系等杂质,并测定土壤的基本理化性质(表 1)。在采集土样的同时用环刀采集耕层原状土测定土壤容重。

表 1 紫色土基本理化性质  
Table 1 Basic physiochemical properties of tested purple soil

参数	值
pH	7.41 ± 0.13
自然含水率(%)	12.22 ± 1.53
容重(g/cm <sup>3</sup> )	1.35 ± 0.08
毛管孔隙度(%)	31.99 ± 2.22
自由膨胀率(%)	24.67 ± 3.68
塑限(%)	21.61 ± 2.05
液限(%)	51.51 ± 2.72
颗粒组成(%)	
黏粒 (<0.002 mm)	6.72 ± 2.20
粉粒 (0.002 ~ 0.05 mm)	36.85 ± 4.99
砂粒 (>0.05 ~ 2 mm)	56.43 ± 8.62

### 1.3 试样制备

根据紫色土区田间自然含水率、土壤容重的实际情况,将土壤初始含水率设置为 5%、10%、15%、20%、25% 5 个梯度,土壤干密度设计为 1.1、1.3 和 1.5 g/cm<sup>3</sup> 3 个梯度。各处理均重复 3 次,共计 45 个试样。试样所需加水量和所设干密度所需土壤质量分别可由公式(1)、(2)计算:

$$m_w = \frac{m_0}{0.01w_0 + 1} \times 0.01(w_1 - w_0) \quad (1)$$

式中:  $m_w$  为制样所需加水量(g);  $m_0$  为风干土质量(g);  $w_0$  为风干土含水率(%);  $w_1$  为制样所需含水率(%);

$$m_{\rho_b} = (w_0 + 1) \times V_{\text{环}} \times \rho \quad (2)$$

式中:  $m_{\rho_b}$  为制样所需风干土重(g);  $V_{\text{环}}$  为试验所用环刀体积( $\text{cm}^3$ );  $\rho$  为试验设计干密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $w_0$  为风干土含水率(%)。

称取过 2 mm 筛的风干土样平铺在搪瓷盆中, 用喷壶将配置初始含水率所需水量均匀喷洒在土样中并拌制均匀, 用保鲜膜密封并放入密封袋中, 静置 24 h。将配置好初始含水率的土样按照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》<sup>[22]</sup>要求, 制作直径 61 mm、高 20 mm 的环刀试样, 用压实法将土样分层压入环刀中, 确保干密度与设计干密度相等, 得到试样。

#### 1.4 土壤膨胀试验

无荷膨胀率是指在侧限条件下, 不施加上覆荷载时试样的膨胀增量与初始高度的比值<sup>[23]</sup>。将制备好的试样放入膨胀仪(TKA-PZY-1)中, 装好百分表并将电子百分表初始读数设置为零, 点击“开始采集”按钮的同时向水盒内注入纯水, 使水自下而上进入试样, 并保持水面高出试样 5 mm, 记录注水开始时间。同时采集膨胀率的实时数据, 数据采集间隔为 1 次/2 秒, 采集时长均为 8 h, 即当试样变形  $\leq 0.01$  mm 时

可终止试验。

#### 1.5 数据处理与统计分析

试验数据的统计、分析采用 Excel 2013 和 SPSS 25.0。对数据进行双因素方差和单因素方差分析, 并采用 LSD 法和 Duncan's 检验法进行多重比较。使用 Origin 2021 pro 对数据进行绘图制作, 并对紫色土无荷膨胀率进行时程拟合分析。采用 Design Expert 8 软件进行响应曲面方案设计和分析。

### 2 结果与分析

#### 2.1 紫色土膨胀变形特征

无荷膨胀率反映的是重塑土在侧限条件下的膨胀性, 与实际膨胀比较接近<sup>[24]</sup>。不同初始含水率和干密度下, 紫色土的无荷膨胀率介于 0.55%~8.28% (图 1), 膨胀性较弱。随初始含水率的增加, 紫色土无荷膨胀率呈降低趋势。膨胀稳定时, 初始含水率 5%、10%、15%、20%、25% 的紫色土在 3 组不同干密度条件下的平均无荷膨胀率依次为 5.84%、5.31%、4.47%、2.54%、1.14%。土壤干密度越大, 紫色土无荷膨胀率越大, 干密度为 1.1、1.3、1.5  $\text{g}/\text{cm}^3$  时, 紫色土无荷膨胀率范围分别为 0.55%~2.68%、0.78%~6.40%、2.08%~8.28%。

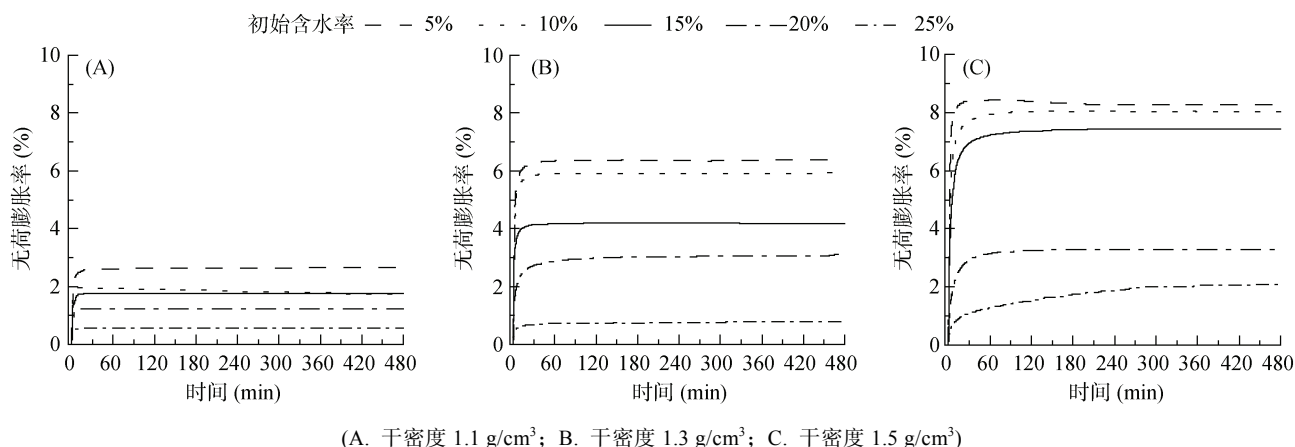


图 1 紫色土无荷膨胀率时程曲线

Fig. 1 Curve of unloaded expansion rate with time

随着时间的增加, 紫色土无荷膨胀率呈先迅速升高后又缓慢升高, 最后基本保持稳定的变化趋势(图 1)。紫色土膨胀过程可分为快速膨胀、缓慢膨胀和膨胀稳定 3 个阶段。在快速膨胀阶段(0~10 min), 紫色土无荷膨胀速度为 0~0.536 7 mm/min, 无荷膨胀率介于 0.50%~7.68%, 增幅最大, 无荷膨胀量占总膨胀量的 78.47%~89.90%; 其中, 干密度为 1.1  $\text{g}/\text{cm}^3$  时, 紫色土无荷膨胀量占总膨胀量的比例最大, 为 89.90%。缓慢膨胀阶段(10~75 min), 紫色土无荷膨胀速度显

著低于前一阶段, 膨胀速度为 0~0.023 3 mm/min, 膨胀量介于 0.05~0.27 mm, 占总膨胀量的 4.45%~38.42%, 这可能是因为紫色土含水量还未达到饱和状态, 仍在缓慢吸水; 与快速膨胀阶段相比, 该阶段紫色土无荷膨胀率增速大幅降低, 平均降幅在 71.58%~91.33%。而在膨胀稳定阶段, 紫色土无荷膨胀率变化速率相对前两个阶段大幅降低, 膨胀速度为 0~0.003 3 mm/min, 该阶段紫色土膨胀量仅在 0.003 3~0.01 mm 范围内变动, 平均约占紫色土总膨胀率的 0.21%~6.38%,

达到膨胀稳定阶段的平均耗时在 6~7 h。

2.2 初始含水率、干密度对紫色土无荷膨胀率的影响

在相同干密度条件下,紫色土无荷膨胀率随初始含水率的增加而降低(图 2)。干密度为 1.1 g/cm<sup>3</sup> 时,紫色土无荷膨胀率总体较低,当初始含水率由 5% 增加至 25%,无荷膨胀率由 2.68% 降至 0.55%;当干密度为 1.3 g/cm<sup>3</sup> 时,紫色土无荷膨胀率显著大于干密度为 1.1 g/cm<sup>3</sup> 的膨胀率,介于 0.78%~6.4%;干密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup> 的紫色土无荷膨胀率最大,膨胀率介于 2.08%~8.28%。相同干密度下,初始含水率从 5%~15% 的紫色土无荷膨胀率降幅较小,为 9.92%~34.69%;当初始含水率在 15%~25% 左右时,紫色土无荷膨胀率降幅较大,为 69.10%~89.34%。在相同初始含水率条件下,紫色土干密度越大,其无荷膨胀率越大,当干密度由 1.1 g/cm<sup>3</sup> 增加至 1.5 g/cm<sup>3</sup>,无荷膨胀率最大可由 2.68% 升至 8.28%(图 2)。

由方差分析可知(表 2),初始含水率、干密度及两者交互作用均对紫色土无荷膨胀率影响极显著( $P<0.01$ )。对比  $F$  值可知,相对土壤初始含水率和两者的交互作用,土壤干密度对紫色土的无荷膨胀率影响更大。同时,相同初始含水率不同干密度处理间差

异多较显著(表 3)。当初始含水率 $\leq 15\%$  时,同一初始含水率不同干密度紫色土间无荷膨胀率差异均显著( $P<0.05$ );当初始含水率为 20% 时,干密度为 1.1 g/cm<sup>3</sup> 的紫色土无荷膨胀率显著低于 1.3 和 1.5 g/cm<sup>3</sup> 的紫色土;而初始含水率为 25% 时,则是干密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup> 的紫色土无荷膨胀率显著高于干密度为 1.1 和 1.3 g/cm<sup>3</sup> 的紫色土( $P<0.05$ )。而相同干密度不同初始含水率处理间,多为初始含水率为 5%、10% 的紫色土无荷膨胀率显著高于初始含水率为 20%、25% 的处理( $P<0.05$ );初始含水率为 15% 的紫色土无荷膨胀率与 10%、20% 的处理间差异多不显著( $P>0.05$ )。

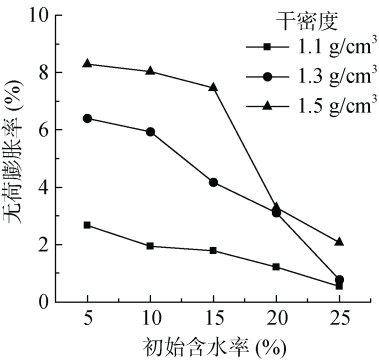


图 2 不同初始含水率和干密度条件下紫色土最终膨胀率  
Fig. 2 Final expansion rates of purple soils under different initial moistures and dry densities

表 2 有交互效应的双因素方差分析结果  
Table 2 Two-way ANOVA results with interaction effects

源	III 类平方和	自由度	均方	$F$	$P$
土壤干密度	0.013	2	0.007	131.313	<0.01
土壤初始含水率	0.014	4	0.003	67.487	<0.01
土壤干密度 $\times$ 土壤初始含水率	0.004	8	0	8.932	<0.01
误差	0.002	30	0.000 1		
总计	0.1	44			

表 3 不同环境条件下紫色土无荷膨胀率(%)  
Table 3 Unloaded expansion rates of purple soils under different environmental conditions

干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	初始含水率(%)				
	5	10	15	20	25
1.1	2.68 $\pm$ 0.007 0 Ac	1.95 $\pm$ 0.002 6 ABc	1.82 $\pm$ 0.002 3 ABc	1.45 $\pm$ 0.003 5 Bb	0.52 $\pm$ 0.002 1 Cb
1.3	6.50 $\pm$ 0.003 9 Ab	5.93 $\pm$ 0.001 5 Ab	4.18 $\pm$ 0.011 7 Bb	3.10 $\pm$ 0.007 2 Ba	0.78 $\pm$ 0.003 1 Cb
1.5	8.42 $\pm$ 0.007 0 Aa	8.08 $\pm$ 0.010 5 Aa	7.45 $\pm$ 0.006 3 Aa	3.30 $\pm$ 0.004 3 Ba	2.08 $\pm$ 0.001 6 Ba

注:表中同行数据大写字母不同表示相同干密度不同初始含水率处理间差异显著( $P<0.05$ );同列数据小写字母不同表示相同初始含水率不同干密度处理间差异显著( $P<0.05$ )。

2.3 紫色土无荷膨胀率时程拟合

紫色土膨胀时程具有明显的阶段变化(图 1),结合数据的区域性质、突变点、分段变化的趋势等对膨胀时程进行分段,对紫色土无荷膨胀率和膨胀时间变化进行分段拟合(表 4)。由于在膨胀时程中

的膨胀稳定阶段紫色土无荷膨胀率基本不会发生较大的变化,因此仅对变化较为明显的快速膨胀阶段和缓慢膨胀阶段进行拟合表述。对数函数可较好地反映紫色土快速膨胀、缓慢膨胀阶段随时间的变化规律( $R^2$  介于 0.65~0.99, RMSE 介于 0.000 1~

0.002 3), 且快速膨胀阶段拟合效果均优于缓慢膨胀阶段。仅有当土壤干密度为 1.1 g/cm<sup>3</sup>, 土壤初始含水率为 25% 时, 紫色土缓慢膨胀阶段的拟合效果较差( $R^2=0.47$ )。

表 4 不同变化阶段无荷膨胀率与时间关系拟合  
Table 4 Fitting of unloaded expansion rate with time at different changing stages

干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	初始含水 率(%)	快速膨胀阶段			缓慢膨胀阶段		
		拟合方程	$R^2$	RMSE	拟合方程	$R^2$	RMSE
1.1	5	$\delta_e=0.01401gt-0.0115$	0.94	0.000 6	$\delta_e=0.00081gt+0.0197$	0.84	0.000 2
	10	$\delta_e=0.01231gt-0.0090$	0.96	0.000 2	$\delta_e=0.00061gt+0.0156$	0.65	0.000 1
	15	$\delta_e=0.00721gt-0.0022$	0.94	0.000 3	$\delta_e=0.00131gt+0.0091$	0.88	0.000 1
	20	$\delta_e=0.00691gt-0.0056$	0.95	0.000 3	$\delta_e=0.00081gt+0.0070$	0.91	0.000 1
	25	$\delta_e=0.00301gt-0.0017$	0.97	0.000 1	$\delta_e=0.00021gt+0.0042$	0.47	0.000 1
1.3	5	$\delta_e=0.03741gt-0.0364$	0.93	0.001 4	$\delta_e=0.00261gt+0.0429$	0.89	0.000 6
	10	$\delta_e=0.03271gt-0.0289$	0.96	0.000 9	$\delta_e=0.00221gt+0.0417$	0.91	0.000 4
	15	$\delta_e=0.02141gt-0.0140$	0.96	0.000 9	$\delta_e=0.00171gt+0.0284$	0.87	0.000 4
	20	$\delta_e=0.01251gt-0.0111$	0.98	0.000 2	$\delta_e=0.00191gt+0.0129$	0.96	0.000 2
	25	$\delta_e=0.00241gt-0.0007$	0.99	0.000 1	$\delta_e=0.00041gt+0.0037$	0.92	0.000 1
1.5	5	$\delta_e=0.05331gt-0.0575$	0.91	0.002 3	$\delta_e=0.00281gt+0.0629$	0.89	0.000 5
	10	$\delta_e=0.03981gt-0.0392$	0.97	0.000 7	$\delta_e=0.00381gt+0.0476$	0.92	0.000 7
	15	$\delta_e=0.03331gt-0.0345$	0.98	0.000 6	$\delta_e=0.00381gt+0.0402$	0.89	0.000 8
	20	$\delta_e=0.01411gt-0.0168$	0.97	0.000 4	$\delta_e=0.00301gt+0.0063$	0.95	0.000 3
	25	$\delta_e=0.00521gt-0.0062$	0.98	0.000 1	$\delta_e=0.00441gt-0.0232$	0.98	0.000 2

注:  $\delta_e$  为无荷膨胀率(%),  $t$  为时间(s)。

由于拟合公式中两参数的值与紫色土的初始含水率和干密度关系密切, 分别对其中两参数与土壤初始含水率关系进行拟合并替换, 得到初始含水率、时间与无荷膨胀率的关系式(表 5)。依据土壤初始含水率、时间与紫色土无荷膨胀率的关系, 可更好地预测土壤初始含水率下紫色土无荷膨胀量的实时变化过程。

表 5 无荷膨胀率随时间变化拟合关系式  
Table 5 Relationship fitting of uncharged expansion rate with time

干密度(g/cm <sup>3</sup> )	快速膨胀阶段	缓慢膨胀阶段
1.1	$\delta_e=(-0.0005w_0+0.0169)1gt+(0.0005w_0-0.0129)$	$\delta_e=(-0.00002w_0+0.0010)1gt+(-0.0008w_0+0.0230)$
1.3	$\delta_e=(-0.0018w_0+0.0483)1gt+(0.0018w_0-0.0450)$	$\delta_e=(-0.0001w_0+0.0032)1gt+(-0.0021w_0+0.0581)$
1.5	$\delta_e=(-0.0024w_0+0.0657)1gt+(-0.0025w_0-0.0683)$	$\delta_e=(0.00004w_0+0.0028)1gt+(-0.0043w_0+0.0908)$

注:  $w_0$  为初始含水率(%),  $t$  为时间(s)。

2.4 初始含水率、干密度交互作用对紫色土无荷膨胀率影响

为研究初始含水率和干密度共同作用下紫色土无荷膨胀率的变化, 以土壤初始含水率和干密度为自变量, 无荷膨胀率为因变量进行回归分析, 建立无荷膨胀率与初始含水率、干密度之间的多元回归模型为:

$$\delta_e = -18.14 + 19.70\rho_b + 0.55w_0 - 0.61\rho_b w_0 \quad (3)$$

式中:  $\delta_e$  为无荷膨胀率(%);  $w_0$  为初始含水率(%);  $\rho_b$  为干密度(g/cm<sup>3</sup>)。

结果表明, 回归方程模型  $P<0.05$ , 模型响应值决定系数  $R^2$  为 0.92, 信噪比  $22.84>4$ , 证明模型具有较高的真实性<sup>[25]</sup>, 可以较好地反映无荷膨胀率与初

始含水率和干密度之间的关系。通过该回归方程生成响应曲面(图 3), 响应曲面的陡峭程度能反映紫色土无荷膨胀率受因素影响的变化情况<sup>[26]</sup>。曲面陡度越大、等高面倾斜的角度越大, 说明初始含水率与干密度的交互作用显著, 不同初始含水率和干密度组合下的紫色土无荷膨胀率之间差异明显。当土壤初始含水率为 5%、干密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup> 时, 无荷膨胀率最大为 8.28%; 当土壤初始含水率为 25%、干密度为 1.1 g/cm<sup>3</sup> 时, 无荷膨胀率最小, 仅为 0.52%。由于该曲面模型表示为完整连续的曲面, 因而可以对所设置初始含水率和干密度范围内的无荷膨胀率变化进行具体表示, 对紫色土无荷膨胀率具有较好的解释作用, 预测紫色



土的无荷膨胀率的效果较好。

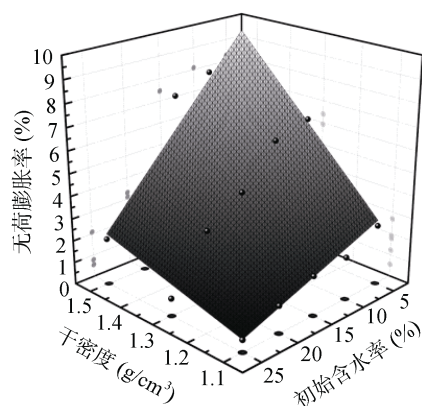


图3 无荷膨胀率对初始含水率与干密度的响应面分析  
Fig. 3 Response surface analysis of unloaded expansion rate to moisture and dry density

### 3 讨论

#### 3.1 紫色土无荷膨胀率与土壤含水率变化过程的关系

水分变化是土壤发生膨胀变形的基础条件,以初始含水率为 5% 的紫色土进行吸水试验,发现紫色土含水率增加过程与紫色土膨胀过程较为同步,分为快速吸水、缓慢吸水、稳定持水 3 个阶段(图 4)。在紫色土快速吸水阶段,土壤先通过毛管力吸水,此阶段吸水速度相对较快,平均耗时 20 min,吸水量占总吸水量的 83.75%~93.38%。当紫色土含水量达到田间持水量后,紫色土进入缓慢吸水阶段,此时水分进入非毛管孔隙,吸水速度逐渐降低,耗时约 60 min,该阶段吸水量占总吸水量的 4.97%~12.47%。当紫色土基本处于饱和状态时为稳定持水阶段,此时土壤含水率基本保持稳定。紫色土无荷膨胀率和土壤含水率呈极显著正相关关系( $r \geq 0.62$ ,  $P < 0.01$ )。根据紫色土无荷膨胀率-含水率关系利用半对数函数进行拟合,拟合结果较好( $R^2 \geq 0.72$ ),可较好地预测紫色土实际变形(图 5)。紫色土吸水过程与膨胀过程间既有相似性又表现出差异性,吸水过程与膨胀过程的差异性主要表现在随紫色土干密度增加,在快速吸水阶段土壤吸水速度较慢,使土壤吸水量与膨胀量无法保持一致增长,此时吸水量占总吸水量的 81.62%~92.17%,而膨胀量占膨胀总量的 91.30%~96.04%,平均差值介于 3.87%~12.24%;缓慢吸水阶段,除干密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup> 的组别外,土壤吸水过程仍慢于膨胀过程,两者的平均差距介于 0.85%~4.50%,低于快速吸水阶段。这与紫色土颗粒紧密程度、土壤量、孔隙度等有

密切关系。膨润土孔隙分为颗粒内和颗粒间孔隙<sup>[27-28]</sup>,紫色土快速吸水阶段,土壤水分通过颗粒间孔隙接触各层土壤,在水膜的楔入作用下颗粒间距增大,同时水分子进入水稳性较差的矿物晶格结构内,使晶层间距扩大,蒙脱石内表面不断吸持水分和各种离子,保持较稳定的吸水膨胀过程<sup>[29]</sup>,膨胀率、含水率均快速增长。快速吸水阶段,紫色土所吸水分一部分填充于土壤孔隙,一部分用于土粒表面水膜增厚和黏土矿物的晶格扩张反应,使土体膨胀能迅速释放,紫色土膨胀量较大幅度增加,因而土体吸收水分的体积小于土体膨胀的体积。干密度越大的土壤总量越多,土壤更紧实,总孔隙度和毛管孔隙度相对较小<sup>[30]</sup>,毛管水上升性能较弱<sup>[31]</sup>,土壤吸水速度更慢<sup>[32]</sup>,表现为干密度大的紫色土膨胀和吸水时程更长,在同一阶段紫色土累计吸水量占比和累计膨胀量占比之间的差距也越大。紫色土由快速吸水转为缓慢吸水阶段,说明土粒表面水膜增厚逐渐达到极限,土粒晶格扩张作用也在降低,膨胀潜力持续降低<sup>[7]</sup>,而后以较低速度膨胀。同时在缓慢吸水和稳定持水阶段,紫色土未达到饱和状态,仍在缓慢吸水,而紫色土膨胀潜力大幅降低,此时紫色土膨胀速度大幅低于土壤吸水速度,土壤吸水总量累计占比与膨胀量累计占比间的差距逐步减小。

#### 3.2 紫色土初始含水率和干密度对无荷膨胀率的影响

紫色土无荷膨胀率受初始含水率影响较大。在 3 种干密度条件下,不同含水率紫色土无荷膨胀率的大小均表现为 5%>10%>15%>20%>25%。干密度相同,初始含水率与无荷膨胀率呈负相关关系( $P < 0.01$ ),这与林敬兰<sup>[7]</sup>、张国栋等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。这是因为土壤初始含水率较低时,土壤颗粒表面的结合水膜较薄,颗粒间距较小<sup>[33]</sup>。而土壤初始含水率高时,土体颗粒已与水分充分接触,土体发生了膨胀提前释放了部分膨胀能;随时间推移,土壤吸水能力减弱、可吸收水量减少,膨胀势不足导致土壤最终膨胀率低。但当土壤干密度为 1.1 g/cm<sup>3</sup> 时,初始含水率较低的紫色土会在膨胀稳定阶段的后期出现误差允许范围内的膨胀率降低现象。出现这种现象一是由于紫色土在快速吸水膨胀的过程中存在一定的各向异性,待紫色土膨胀相对稳定后,这种各向异性又趋向同性,故无荷膨胀率会降低;二是紫色土属弱膨胀土,膨胀稳定后小幅度变化表现更明显<sup>[34-35]</sup>。

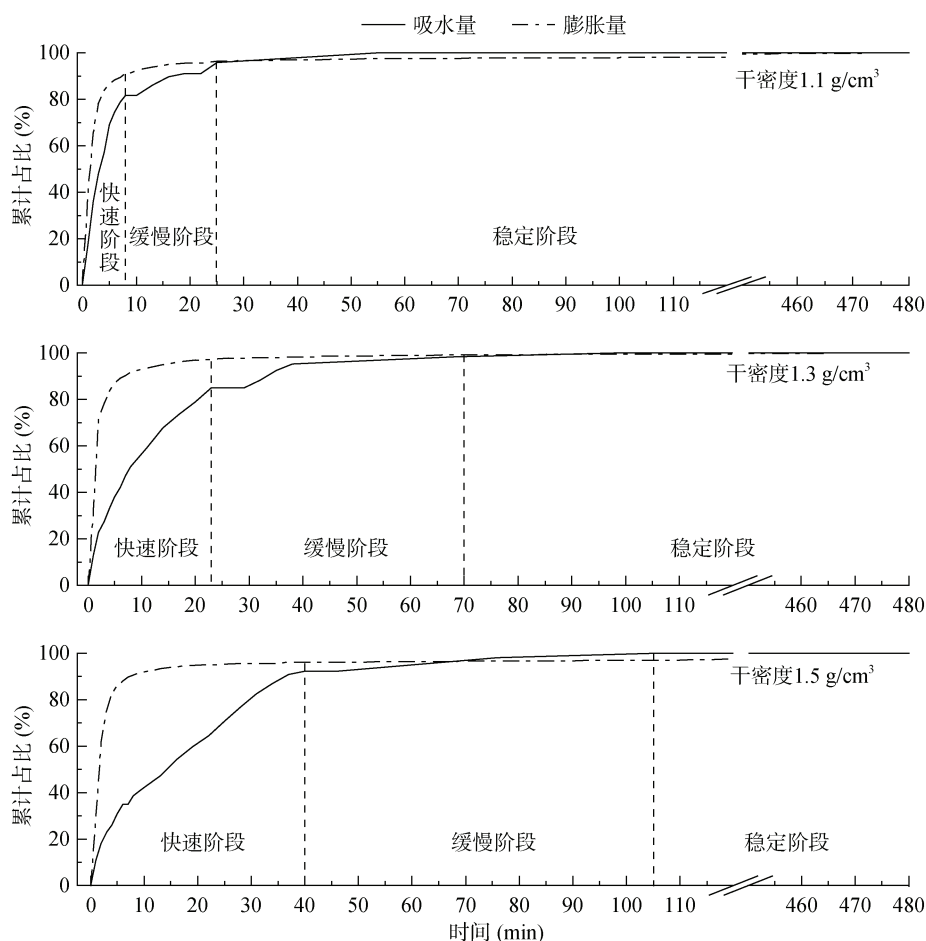


图4 紫色土增湿过程中累计吸水量占比与累计膨胀量占比变化

Fig. 4 Changes in proportion of cumulative water absorption and expansion of purple soil during humidification

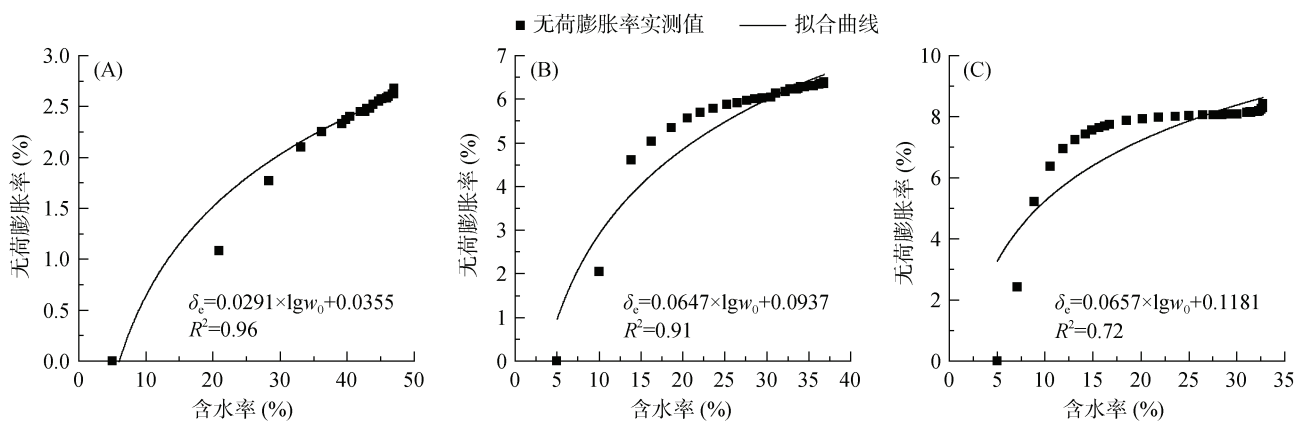
(A. 干密度 1.1 g/cm<sup>3</sup>; B. 干密度 1.3 g/cm<sup>3</sup>; C. 干密度 1.5 g/cm<sup>3</sup>)

图5 无荷膨胀率与土壤含水率变化拟合关系

Fig. 5 Relationship fitting of unloaded expansion rate with soil moisture

紫色土无荷膨胀率会随土壤干密度增加而增加<sup>[36]</sup>。5个初始含水率下,不同干密度紫色土无荷膨胀率均表现为  $1.5 \text{ g/cm}^3 > 1.3 \text{ g/cm}^3 > 1.1 \text{ g/cm}^3$  (图2)。干密度越大紫色土膨胀达到稳定状态所需时间越长,这是因为随干密度的增加,土壤毛细孔隙度更低,部分架空孔隙被颗粒填充,相同时间内水分进入量更少,吸水

速率慢<sup>[32, 37]</sup>,膨胀变形速度小,故所需时间长。土壤干密度越大,无荷膨胀率越高。这可能是因为干密度越大,热传导的速度越快,土体内部各点的稳态温度越高,保温层越厚,液态和气态水的迁移速度越慢;从应力角度看,土体吸水导致孔隙水压力增加,对有效应力产生影响,会使土壤颗粒间相互挤压,引起土

体变形。基于此,干密度越大的土壤产生膨胀力和膨胀潜势也越大,反之,干密度小土粒间距大,膨胀率越低。随着高标准农田建设项目的实施,为避免土体膨胀变形而导致的农业基础设施结构破坏和失稳问题,可通过湿度控制、压重处理等方法,确保高标准农田建设的顺利实施和长期稳定。受三峡库区夏季湿热条件的影响,紫色土上层土壤更容易胀缩变形或开裂,加剧了土体的破碎,削弱了土壤的抗侵蚀性,加上强降雨的冲刷,更易发生水土流失<sup>[17]</sup>。

本文仅探讨了土壤初始含水率和干密度对紫色土膨胀性的影响,紫色土收缩特性以及变化机理尚不明晰,土体膨胀、收缩共同作用对紫色土稳定性的影响还有待进一步研究。

## 4 结论

1) 紫色土无荷膨胀率随时间的变化表现为快速膨胀阶段、缓慢膨胀阶段、膨胀稳定阶段 3 个阶段,无荷膨胀率增长的变化速率先增后降,并最终趋于稳定。

2) 紫色土无荷膨胀率变化过程与时间、紫色土含水率均呈对数关系( $P < 0.05$ )。初始含水率、干密度以及两者的交互作用均对紫色土无荷膨胀率影响显著( $P < 0.05$ ),其中,干密度对紫色土无荷膨胀率变化的贡献较大。当干密度相同时,紫色土无荷膨胀率随初始含水率升高而降低;当紫色土处于低初始含水率(5%)、高干密度( $1.5 \text{ g/cm}^3$ )时,无荷膨胀率最大,为 8.28%。

3) 紫色土膨胀过程与吸水过程具有过程上的一致性,多在吸水初期发生大幅膨胀,紫色土含水率达到稳定状态所需时长均短于土壤膨胀率稳定状态耗时。

## 参考文献:

- [1] 刘海滢,甘永德,贾仰文,等.考虑土壤膨胀性的流域水文模型应用研究[J].中国农村水利水电,2020(4): 92–96, 101.
- [2] 贾鸿飞,贾荣亮,吴秀丽,等.干旱沙区生物结皮对土壤膨胀的影响[J].中国沙漠,2023,43(2): 28–36.
- [3] 邵丽媛,甘永德,苏辉东,等.土壤膨胀性对降雨入渗产流影响试验[J].中国农村水利水电,2018(11): 42–47, 54.
- [4] 张佩佩,张文太,贾宏涛,等.新疆北部地区与其他地区变性土壤线性膨胀系数的差异及矿物学机制[J].南京农业大学学报,2017,40(6): 1074–1080.
- [5] 张同娟,王益权,刘军,等.黄土地区影响土壤膨胀性的因子分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(6): 185–189.
- [6] McCormack D E, Wilding L P. Soil properties influencing swelling in canfield and geeburg soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1975, 39(3): 496–502.
- [7] 林敬兰.花岗岩崩岗红土层土体胀缩特性研究[J].水土保持学报,2019,33(2): 87–92.
- [8] 卢政铎,陈文祥,李灿娥,等.游离氧化铁对崩岗不同土层土壤胀缩特性的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2024,53(1): 106–113.
- [9] 刘观仕,陈永贵,曾宪云,等.环境湿度与温度对压实膨胀土裂隙发育影响试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(2): 260–268.
- [10] 项国圣,吕立勇,葛磊,等.温度对 GMZ 膨润土的膨胀性能影响研究[J].岩土工程学报,2021,43(1): 77–84.
- [11] 刘文化,杨庆,唐小微,等.干湿循环条件下不同初始干密度土体的力学特性[J].水利学报,2014,45(3): 261–268.
- [12] 常锦,杨和平,肖杰,等.酸性环境对百色膨胀土胀缩性能的影响及其微观解释[J].交通运输工程学报,2019,19(1): 24–32.
- [13] 王国鹏,肖波,李胜龙,等.生物土壤结皮对风沙土和黄绵土膨胀特性的影响[J].中国沙漠,2020,40(1): 97–104.
- [14] Wei J, Shi B L, Li J L, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Catena, 2018, 166: 124–133.
- [15] 李雪,李春培,李永梅,等.典型植物根系对紫色土化学属性和化学蚀变指数的影响[J].土壤,2024,56(2): 425–432.
- [16] 黎桢君,汪时机,李贤,等.三峡库区紫色土干缩裂隙形态几何尺寸效应[J].农业工程学报,2023,39(24): 117–126.
- [17] 赵景波,贺秀斌,邵天杰.重庆地区紫色土和紫色泥岩的物质组成与微结构研究[J].土壤学报,2012,49(2): 212–219.
- [18] 李航,郑丽萍,甘永德,等.膨胀性土壤干缩裂隙对入渗产流影响[J].中国农村水利水电,2023(10): 114–120.
- [19] 张国栋,巫锡勇,凌斯祥,等.初始含水率对膨胀性红黏土胀缩及崩解特性的影响[J].工程地质学报,2023,31(1): 32–42.
- [20] Du J, Luo Y J, Zhang W H, et al. Major element geochemistry of purple soils/rocks in the red Sichuan Basin, China: Implications of their diagenesis and pedogenesis[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(6): 1831–1844.
- [21] 陶婷婷,陈晓燕,黄永超,等.重庆沙溪庙组紫色土土壤基质和优先流入渗的定量测算[J].中国水土保持科学,2019,17(6): 41–51.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [23] 刘浩林,李丹,胡波,等.基于 MICP 技术改良的膨胀土膨胀特性试验研究[J].长江科学院院报,2022,39(6): 150–156.
- [24] 李丽华,黄畅,李文涛,等.稻壳灰-矿渣固化膨胀土力学与微观特性研究[J].岩土力学,2023,44(10): 2821–2832, 2842.
- [25] 童新宇,高峰,王旭东,等.响应面法优化混凝处理西北农村水窖水[J].环境工程学报,2023,17(3): 817–828.



- [26] 苟俊菲, 甘凤玲, 刘春红. 紫色土坡面细沟形态变化及其对产流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 61–68, 75.
- [27] 梁维云, 韦昌富, 张芹, 等. 膨润土吸湿过程中膨胀力演化及水分分布特征[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2): 283–291.
- [28] Dieudonne A C, Della Vecchia G, Charlier R. Water retention model for compacted bentonites[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(7): 915–925.
- [29] 范本贤, 黄英, 孙书君, 等. 云南红土的循环胀缩特性研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 120–127, 133.
- [30] 韦江杏, 邓羽松, 廖达兰, 等. 桂东南花岗岩崩岗土壤界限含水率空间变异及影响因素[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 749–761.
- [31] 吴珊眉. 中国变性土[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 246.
- [32] 高露, 张圣微, 赵鸿彬, 等. 退化草原土壤理化性质空间异质性及其对土壤水分的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 607–617.
- [33] 高晨, 李晓鹏, 刘毅仁, 等. 农田土壤压实过程及模型研究进展[J]. 土壤, 2024, 56(1): 1–9.
- [34] 文松松, 梁维云, 陈永健, 等. 弱膨胀土的膨胀特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 706–714.
- [35] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1–54.
- [36] 章智, 陈洁, 林金石, 等. 含水率对安溪县花岗岩崩岗土体胀缩特性的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 600–609.
- [37] 朱龙祥, 范昊明, 马仁明. 冻融循环和土壤含水率对棕壤崩解特性的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 77–88.