

马运庆, 秦宽, 张永政, 等. 基于土粒与含水率变化规律的触土部件黏附特性研究[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(1): 258-266.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.01.030

基于土粒与含水率变化规律的触土部件黏附特性研究

马运庆^{1,2}, 秦宽^{1,2}, 张永政^{1,2}, 赵运^{1,2}, 步坤亭¹, 束乐³

1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备实验室, 合肥 230036;
3. 安徽农业大学生命科学学院, 合肥 230036

摘要 为研究土壤干燥过程中触土部件与土壤之间的黏附特性变化, 以16种不同颗粒直径与含水率的湿土壤为试验材料, 先进行金属板(65Mn钢)斜坡滑落试验, 测量土壤颗粒直径、含水率高低与金属触土部件之间的黏附力大小关系, 然后利用显微镜装置观察土壤样品的微观结构以及干燥过程中土壤与金属板的黏附现象。结果显示, 含水率为30%、40%的土壤在金属表面上滑落后产生的“痕迹”比含水率为10%、20%的土壤更为明显。其中, 含水率30%、颗粒直径10~50 μm的土壤具有最大黏附力, 在土壤干燥前后, 颗粒直径、俯视周长和俯视面积的差异随含水率和颗粒直径的增加而增大; 干燥过程中, 颗粒之间的间隙逐渐减小, 某些颗粒出现“扩散”“收缩”等现象, 部分颗粒会发生相对位移, 其中30%含水率, 颗粒直径为10~50 μm的相对位移最大, 为13.78 μm。随含水率的增加, 土壤黏附力先增大后减小; 随着颗粒的减小, 土壤黏附力逐渐增大, 含水率在30%以下, 干燥前后颗粒位移量越大, 土壤黏附力越强。结果表明, 含水率为30%、颗粒直径在10~50 μm范围内的土壤表现出最强黏附力, 并在干燥过程中呈现出颗粒相对位移最大的现象。

关键词 触土部件; 黏附特性; 土壤干燥; 土壤含水率; 农机改良

中图分类号 S152.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)01-0258-09

随着农业机械化的发展, 提高农业机械的效率和节能性已成为亟需解决的问题^[1-2]。因此, 研究触土部件与不同颗粒直径和含水率的土壤之间的黏附特性具有重要的理论与实际意义^[2]。

减阻脱附大多通过降低土壤与金属触土部件界面之间的黏附力来提高脱土性能^[3]。从触土部件界面分析, 主要有4点: ①表面改性^[3-4]; ②机械减阻脱附^[5]; ③改善黏附界面条件^[6]; ④仿生物减阻^[7]。除界面因素外, 土壤本身因素对黏附性能也有影响。在土壤颗粒直径方面, Shaikh等^[8]研究了黏土、壤土和不同含水率的土壤对界面黏附力的变化规律。Jiang等^[9]研究表明, 土壤黏附力与含水率、颗粒直径和固体界面条件有关。在土壤含水率方面, Huang等^[10]研究了土壤含水率对接触面的摩擦和黏附的影响。Yang等^[11]研究了含水率、温度、固结时间等与界面黏附力之间的关系。在对土壤的作业方式方面, 张国忠等^[12]研究表明, 随着法向拉拔、切向速

度的增加, 黏附力增大; 随着水田空间深度的增加, 黏附力先增大后减小。

上述研究对土壤黏附特性改善有一定的效果, 但目前针对土壤干燥过程中黏附情况的研究甚少。因此, 有必要从宏观和微观角度探究土壤颗粒结构和含水率对于触土部件与土壤之间黏附特性的影响。本研究首先通过宏观斜坡试验测量土壤颗粒直径、含水率及土壤与金属触土部件之间的黏附力, 再利用显微镜装置对土壤样品进行微观结构观察, 探讨土壤颗粒直径和含水率对触土部件之间黏附力的影响, 旨在为农机触土部件的节能改良研究提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 土样制备

土壤样品采集自安徽农业大学校内农萃园(31°86'N, 117°27'E, 亚热带季风气候)。土壤中随

收稿日期: 2023-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52105239); 茶树生物学与资源利用国家重点实验室开放基金项目(SKLT0F2021021)

马运庆, E-mail: Myq@stu.ahau.edu.cn

通信作者: 秦宽, E-mail: qinkuan@ahau.edu.cn

机取20份样本,测定其平均土壤物理参数。利用环刀法^[13]测定容重,结果为 1.36 g/cm^3 。采取土壤表层土,利用烘干法^[14]测定土壤含水率,结果为 3.72% 。不同颗粒直径的土壤占比是先利用标准分样检验筛(上海言锦丝网加工厂)筛分,再测量各级样品的质量并计算比值得到。根据国际土壤分类标准,质地为砂土及壤质砂土^[15]。其中,黏粒($<0.002\text{ mm}$)占比 3.62% ,粉砂粒($0.002\sim 0.02\text{ mm}$)占 7.64% ,砂粒($0.02\sim 2\text{ mm}$)占 88.74% 。将原始土壤利用分样筛振动仪调试 50 min ,共筛选到4种不同颗粒直径的试验土壤,分别记作S1($10\sim 50\ \mu\text{m}$)、S2($50\sim 75\ \mu\text{m}$)、S3($75\sim 100\ \mu\text{m}$)、S4($100\sim 250\ \mu\text{m}$),再分别加水均匀搅拌混合至含水率为 10% 、 20% 、 30% 、 40% (分别记作W1、W2、W3、W4)的湿土壤,共得到16种不同颗粒直径及含水率组合的试验土壤。

1.2 土壤滑落试验装置与方法

土壤滑落试验装置(图1)包括:金属板(农机触土部件,主要成分65Mn钢^[16])、铝制圆环(避免发生流变、坍塌等,圆环 $r=25\text{ mm}$, $h=15\text{ mm}$)。试验过程是通过调整金属板与地面的角度(最上方的高度与金属长度的比值(正弦),反推其角度),使土壤块滑落到底部。滑落过程中会存在部分土壤与斜面产生黏附而留在接触界面上的土壤,故称之为土壤块在板上留下的“痕迹”。试验中需观察并记录:滑落产生的“痕迹”形态和明显程度;每种土壤块刚开始滑落所需高度。

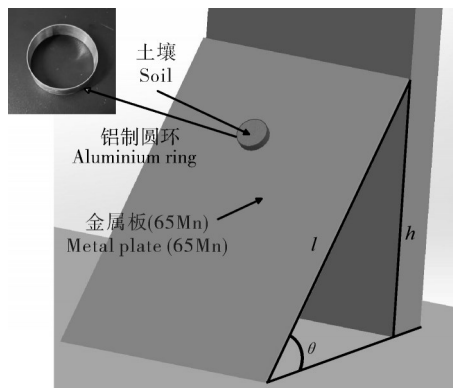


图1 土壤滑落试验装置

Fig.1 Soil slide test device

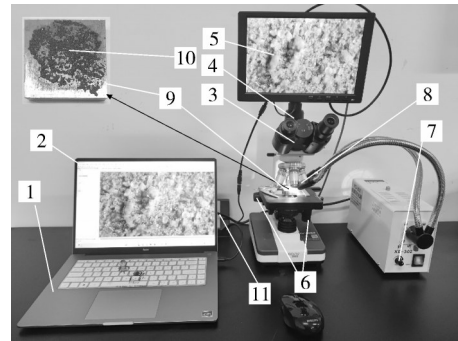
为保证试验严谨,将土壤块完全滑落至底部后,取得角度平均值,每种试验重复做30次后再取其平均值。角度计算公式如下:

$$\theta = \arcsin(h/l) \quad (1)$$

式(1)中, θ 为滑落所需的角度值, $(^\circ)$; l 为斜面长度,cm; h 为滑落时所需要的高度,cm。

1.3 土壤数据测量试验装置与方法

土壤数据测量试验装置如图2所示,奥斯维生物显微镜(XSP-H1600)上有相机及显示屏,显示屏一端与电脑相连,侧面旋钮可以对载物台上的土壤样品进行清晰度调节。XD302光纤卤素灯(功率 150 W)接通电源,同一组试验中灯光的功率保持不变。每组数据测量30遍后,重复3次,取平均值。



1. 电脑 Computer; 2. 软件“Image View”界面“Image View” screen; 3. 显微镜 Microscope; 4. 相机 Camera; 5. 显示屏 Display screen; 6. 载物台位置旋钮 Pedestal position knob; 7. 卤素灯功率旋钮 Halogen lamp power knob; 8. 灯源 Lamp source; 9. 金属板 Metal plate; 10. 土壤样品 Soil sample; 11. 220 V 电源 Power supply.

图2 土壤数据测量装置

Fig.2 Soil data measurement test equipment

1.4 土壤含水率-干燥时间的标定方法

在温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度为 40% 、无风室内条件下,取 0.01 g 土壤置于金属板,摊至露出接触界面。用计时秒表(YS-810)从显示屏观察,从土壤接触金属板起开始计时,到土壤颗粒不再发生颜色变化为止(实际含水率约为 4%),为1次土壤干燥试验的时间标定^[17]。

1.5 颗粒干燥前后变化及位置形态试验

测量土壤样本在干燥前后的直径、周长和面积等参数,了解不同颗粒直径的土壤在不同含水率下的增减变化。测量样本在干燥前后尺寸的变化,以评估土壤的收缩和膨胀性质与黏附力之间的关系。

1.6 颗粒摆放位置关系试验

本试验探究土壤干燥过程中颗粒的摆放位置关系(颗粒在界面上会呈现不同的状态)对其干燥前后形态变化的影响。试验选取3种摆放位置的系列土壤颗粒进行研究。第1种为“全分散”系列,颗粒之间不发生黏合接触,此状态下,整体呈现较松散结构;第2种为“半分散”系列,颗粒之间是以当前接触面积较小的一面进行贴合,此状态下,土壤结构介于松散和紧密之间;第3种为“聚合”系列,颗粒之

间是以当前接触面积较大的一面进行贴合,此状态下,颗粒之间的间隙相对较小(图3)。

1.7 颗粒相对位移变化试验

用显微镜观察含水率为40%时不同颗粒直径的

土壤颗粒在干燥过程中各个时期对应的含水率的相对位移情况。使用软件“Image View”记录干燥前后各个颗粒的位置坐标,连接前后2次的位置坐标再计算其距离。

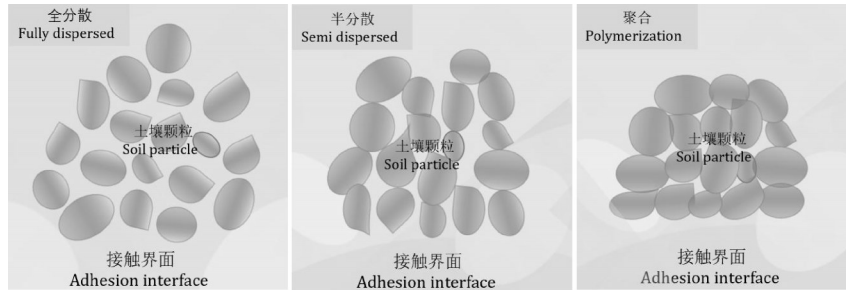


图3 土壤颗粒摆放位置

Fig.3 Placement position of soil particle

1.8 数据处理

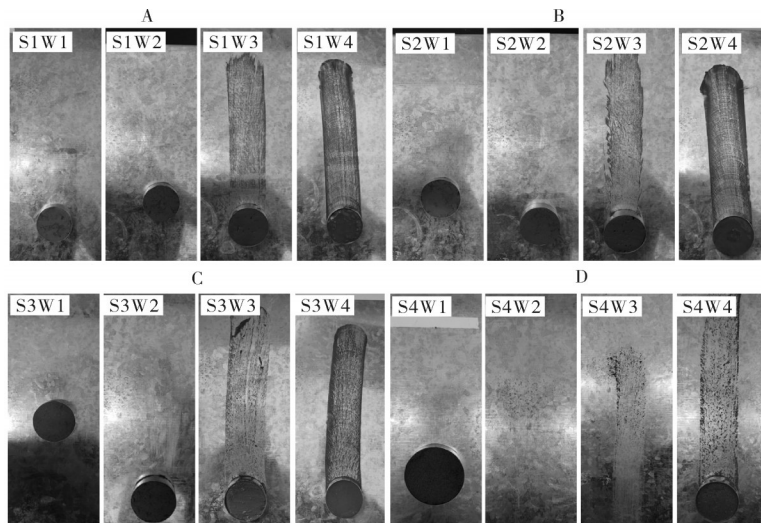
采用软件“Image View”对土壤颗粒直径、俯视周长、俯视面积、位移量等数据进行手动测量,Excel 2021 进行数据统计,SPSS 26 进行显著性分析,Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同类型土壤对金属界面滑落的影响

土壤块在金属板上滑落的“痕迹”如图4所示。

测试条件是满足土壤块从65Mn板上缓慢滑落。由图4可见,颗粒直径对土壤滑落“痕迹”并没有明显的影响,但含水率对其滑落“痕迹”产生较大的影响。当含水率分别为10%、20%时,土壤滑落所留下的“痕迹”相对较轻(S1W1、S1W2、S2W1、S2W2、S3W1、S3W2、S4W1、S4W2)。但在高含水率(30%、40%)情况下,则留下更明显的“痕迹”(S1W3、S1W4、S2W3、S2W4、S3W3、S3W4、S4W3、S4W4)。



S1、S2、S3、S4分别表示10~50、50~75、75~100、100~250 μm 的土壤颗粒直径;W1、W2、W3、W4分别表示10%、20%、30%、40%的含水率。下同。S1, S2, S3 and S4 indicate the soil particle diameter of 10~50 μm , 50~75 μm , 75~100 μm and 100~250 μm , respectively; W1, W2, W3 and W4 represent 10%, 20%, 30% and 40% moisture content, respectively. The same as below.

图4 土壤滑落现象

Fig.4 Soil sliding phenomenon

由图5和表1可知,对于含水率相同、颗粒直径不同的土壤,其滑落角度差值最大出现在S1W3与S4W3情况,差值为19.1°,土壤颗粒直径与含水率均

会影响土壤块的滑落角度。其中,含水率对滑落角度的影响显著性较大($P < 0.05$),而土壤颗粒直径对其滑落角度的影响较小($P > 0.05$)。由图5可见,S1

(10~50 μm)土壤颗粒,含水率30%与10%的滑落角度差值接近30°。最大滑落角度和误差均出现在S1W3土壤,为59.6°、2.66°;最小滑落角出现在S4W1土壤,而S4W4土壤的相对误差最大,为5.21%。土壤颗粒直径相同,含水率过低或过高,所需的滑落倾角较小,表明此状态下黏附力较小;而在含水率处于临界值时(含水率30%),所需的滑落倾角较大,表明此状态下黏附力较大。此外,含水率相同,土壤颗粒越小则滑落倾角越大,颗粒越大则滑落倾角越小。试验中发现,S1型土壤在同等含水率下所需滑落角度最大,即黏附力最大。试验中,不同颗粒直径出现

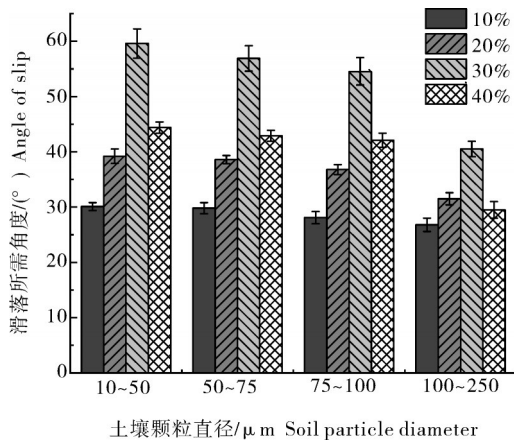


图5 土壤颗粒滑落所需角度

Fig.5 Angle required for soil particle sliding

的最大黏附力所需的含水率并不相同。如:S4类(100~250 μm)土壤,在此试验中含水率对应的黏附力排序为:30%>20%>40%>10%,其余S1、S2、S3类土壤在此试验中含水率对应的黏附力大小排

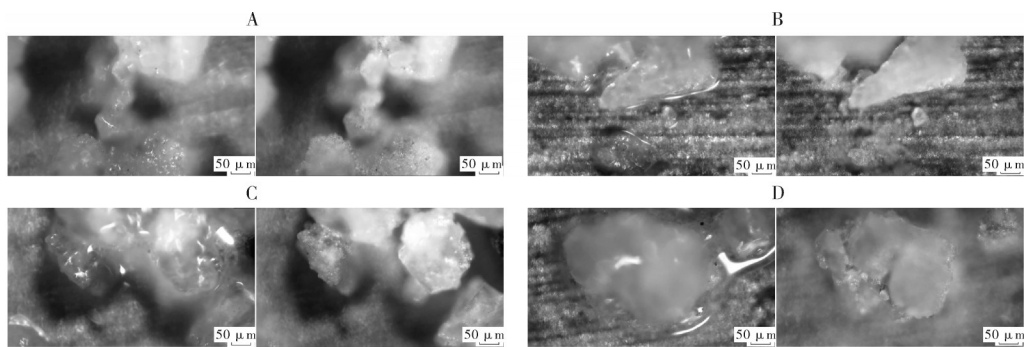


图6 土壤干燥前后对比

Fig.6 Comparison of soil before and after drying

2.3 土壤干燥过程中颗粒参数及位置形态的变化

由表2可见,各试验组土壤在金属上干燥前后,颗粒直径、俯视周长和俯视面积的变化相对较小,而

序为:30%>40%>20%>10%。此外,颗粒直径为S1、S2、S3(<100 μm)的情况下,同等含水率的颗粒直径对其黏附力的影响差异不大;而S3与S4之间的黏附力差异较大。

表1 显著性分析结果

Table 1 Results of significance analysis

组别 Group	滑落角度比较 Slide angle comparison	P值 P value
含水率 Moisture content	W2	0.151
	W1	W3 0.000
		W4 0.028
	W2	W3 0.002
		W4 0.353
	W3	W4 0.012
颗粒直径 Particle diameter		S2 0.908
	S1	S3 0.678
		S4 0.192
	S2	S3 0.597
		S4 0.159
	S3	S4 0.358

注:极显著: $P < 0.01$;显著: $P < 0.05$. Note:Extremely significant: $P < 0.01$; Significant: $P < 0.05$.

2.2 土壤含水率-干燥时间的标定结果

各级颗粒直径的土壤均会经历湿润变干燥的过程,以土壤颗粒直径100~250 μm为例,分别观察土壤含水率10%(图6A)、20%(图6B)、30%(图6C)、40%(图6D)干燥前后所用时长,平均值依次为146、307、422、638 s。将数据拟合(图7)可知,在此试验条件下,含水率的减少与时间呈近似线性关系,即每平均160 s,含水率减少10%。

且这些参数的数值之间存在一定数学计量关系。然而,不同颗粒直径和含水率的组别对干燥前后的数值变化影响较为显著。其中S4W4土壤干燥前后的

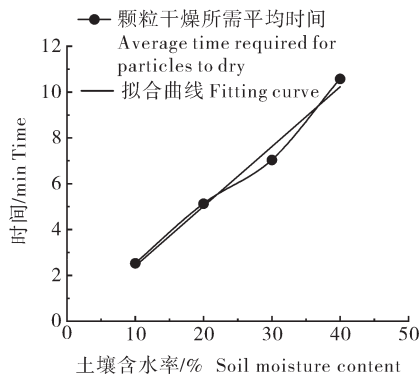


图7 含水率与干燥时间的线性关系
Fig.7 Linear relationship between water content and drying time

颗粒直径差值为 $16.84 \mu\text{m}$ 、俯视周长差值为 32.28

μm 、俯视面积差值为 $4146.73 \mu\text{m}^2$ 。土壤颗粒直径较大组 S3、S4 ($75\sim 100$ 、 $100\sim 250 \mu\text{m}$) 干燥前后对颗粒直径、俯视周长、俯视面积等数值的影响比颗粒直径较小组 S1、S2 ($10\sim 50$ 、 $50\sim 75 \mu\text{m}$) 的大;高含水率组 W3、W4 (30%、40%) 干燥前后对数值的影响比低含水率组 W1、W2 (10%、20%) 的大。在含水率 (30%、40%) 干燥前后对数值的影响比含水率 (10%、20%) 的大。这是因为较大颗粒和较高含水率的土壤在干燥过程中,在水溶液作用下,导致颗粒被“分解”或重新“合成”新的土壤,而对数值产生的影响;大颗粒土壤在高含水率中水的折射效应较大,从而比小颗粒、低含水率的影响大。综上,大颗粒、高含水率的土壤更容易在干燥黏附过程中产生尺寸变化。

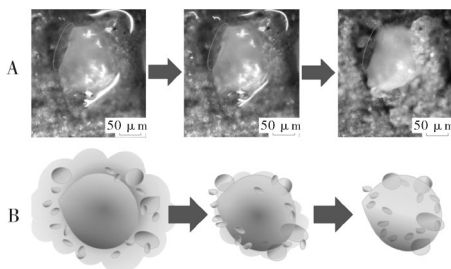
表2 土壤颗粒干燥前后直径、周长、面积的变化

Table 2 Changes of soil particle diameter, circumference and area before and after drying

组别 Group	土壤类型 Soil type	W1		W2		W3		W4	
		干燥前期 Pre-drying period	干燥后期 Late drying period	干燥前期 Pre-drying period	干燥后期 Late drying period	干燥前期 Pre-drying period	干燥后期 Late drying period	干燥前期 Pre-drying period	干燥后期 Late drying period
土壤颗粒直径/ μm Soil particle diameter	S1	43.72	43.76	41.28	40.79	42.13	41.23	42.05	40.49
	S2	68.67	68.89	63.59	64.79	62.58	63.91	66.06	62.92
	S3	93.57	92.45	92.77	91.52	92.04	90.14	89.30	85.65
	S4	208.91	206.14	193.63	196.93	197.59	211.60	219.64	202.80
土壤颗粒周长/ μm Soil particle circumference	S1	133.89	131.67	130.41	126.49	121.65	132.55	128.32	143.20
	S2	219.65	220.36	222.46	187.82	173.57	220.31	218.78	216.72
	S3	286.12	283.65	285.45	288.47	279.47	290.61	290.15	295.89
	S4	638.27	618.19	616.33	594.38	603.98	626.66	647.96	615.68
土壤颗粒面积/ μm^2 Soil particle area	S1	1516.46	1466.39	1508.10	1480.10	1495.75	1475.08	1475.71	1528.48
	S2	3475.69	3539.74	3485.10	3301.32	3022.38	3033.76	3240.48	3470.12
	S3	6934.24	6387.45	6518.36	6773.89	6742.60	7124.29	7024.22	6720.79
	S4	34646.52	28410.01	33730.06	31827.84	28528.02	34674.17	30451.51	31598.24

试验发现,干燥前后各组的土壤颗粒在随机摆放后具有相似特点。图8A ($100\sim 250 \mu\text{m}$) 显示,在土壤干燥过程中,颗粒之间的间距逐渐减小,且小颗粒

总靠近于大颗粒。40% 含水率的土壤在干燥过程中具有更明显的变化现象。即土壤干燥过程中,小颗粒逐渐靠近大颗粒,最后在大颗粒“下面”(图8B)。需注意的是,土壤在非光滑金属上的组别中,最下方的土壤可能存在较大颗粒。这可能是非光滑金属的粗糙间隙阻碍了大颗粒发生较大的位移变化,导致大颗粒出现在粗糙间隙中。还可能是因为大颗粒在粗糙间隙中更利于土壤整体的稳定性,从而使底部界面存在较大土壤颗粒。即干燥过程中颗粒总趋向稳定状态。



A: 颗粒间距缩小图 Reduction of particle spacing; B: 间距模拟图 Simulation of spacing.

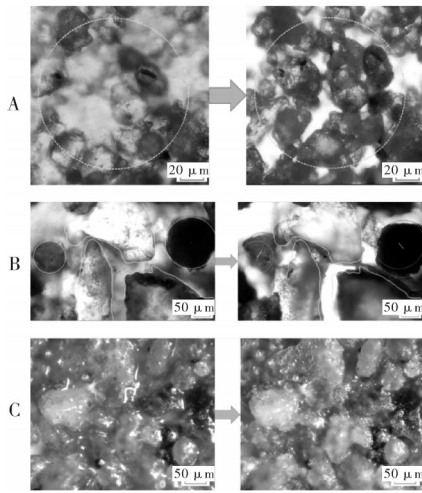
图8 干燥前后的土壤颗粒位置关系

Fig.8 Position relationship between soil particles before and after drying

2.4 颗粒摆放位置对土壤干燥过程的影响

试验中土壤颗粒置于3种不同摆放位置时,会导致颗粒在界面上出现不同的形态。在“全分散”系列中(图9A, $10\sim 50 \mu\text{m}$),开始时颗粒之间互不接触,干

干燥过程中,颗粒整体趋于“抱团缩进”状态,颗粒间距不断减小,到最后聚集。且从干燥前形态不稳定,到干燥后形态趋于稳定,整个过程颗粒具有明显的位移变化;在“半分散”系列中(图 9B, 100~250 μm),开始时颗粒之间相互接触面积较小,且无良好稳定状态,干燥过程中,颗粒整体以稳定状态进行黏合,整个过程中颗粒间距依旧减小,且具有一定的位移变化;在“聚合”系列中(图 9C, 50~75 μm),开始时各颗粒之间相互接触,且接触面积较大,有很好的稳定状态,到干燥后颗粒无明显位置变化,土壤颗粒位移也没有明显的变化。



A: 全分散 Full dispersion; B: 半分散 Semi-dispersion; C: 聚合 Polymerization.

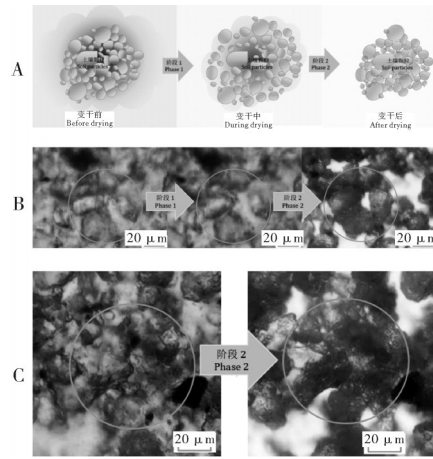
图 9 土壤颗粒干燥前后状态

Fig.9 State of soil particles before and after drying

不同含水率的土壤颗粒在黏合干燥过程中存在阶段一“扩散”和阶段二“收缩”的现象(图 10A)。颗粒在高含水率(40%)情况下,干燥过程中聚集颗粒整体呈现的趋势为:先“扩散”再“收缩”(图 10B, 10~50 μm);而在低含水率(10%、20%、30%)情况下直接“收缩”(图 10C, 10~50 μm)。土壤颗粒在干燥过程中,由于水溶液的表面张力等原因,使得颗粒之间“运动”而产生“间隙”,从而产生“扩散”。而低含水率的土壤在干燥时,颗粒无法在水中“运动”,直接受水的张力作用使得土壤颗粒之间进行“收缩”。即土壤在干燥过程中会发生“扩散”和“收缩”现象。

2.5 不同土壤干燥过程中颗粒位移的变化分析

试验中,土壤颗粒在金属界面上的干燥过程中产生的相对位移会受到不同颗粒直径及含水率的影响。分别将不同含水率、不同颗粒直径的土壤在干燥前后的位移量取平均值进行拟合,由图 11 可知,



A: 模拟图 Simulation figure; B: 高含水率 High water content; C: 低含水率 Low water content.

图 10 土壤干燥过程中不同阶段的情况

Fig.10 The situation of different stages during soil drying process

土壤颗粒 S1W3 具有更大的平均位移量,为 13.78 μm;土壤颗粒 S4W1 平均位移量最小,为 1.99 μm。由拟合曲线可知,含水率 30% 的颗粒相对位移量较大,含水率 10% 的颗粒位移量较小。颗粒的相对位移大小,会受到不同颗粒直径和不同含水率的影响。在相同含水率时,颗粒越小,自身的相对位移越大;颗粒越大,自身相对位移越小。在相同颗粒直径时,土壤颗粒的含水率高会影响颗粒的自身相对位移。试验中含水率由低到高的过程中,颗粒自身的相对位移则是先由小变大再变小直到稳定。干燥过程中,因水挥发使得颗粒之间产生“扩散”而发生位移,由于含水率的减少,土壤颗粒受到水张力作用产生“收缩”而发生位移,且前后存在一定的位移差,因此存在相对位移。而过高含水率并不能使得颗粒本身发生相对位移变化,故颗粒相对位移不再发生较大变化。而低含水率不能满足颗粒的漂浮移动的条件,在干燥过程中会受水的张力作用,使得颗粒直接“收缩”而产生一定相对位移。

为进一步验证试验结果,结合本文“1.4”结果,取含水率为 40%、颗粒平均干燥时间为 640 s 的土壤,并将时间均分 4 段(40%~30%、30%~20%、20%~10%、10%~4%),每段时长为 160 s。S1(10~50 μm)在刚开始观察到 160 s 时,土壤含水率由 40% 变为 30%,此时颗粒在 160 s 内的相对位移为 1.56 μm,其结果与平均位移量差值(图 11 中含水率为 40% 与 30% 的 S1 类型)1.87 μm 相差较小。在此后的每段

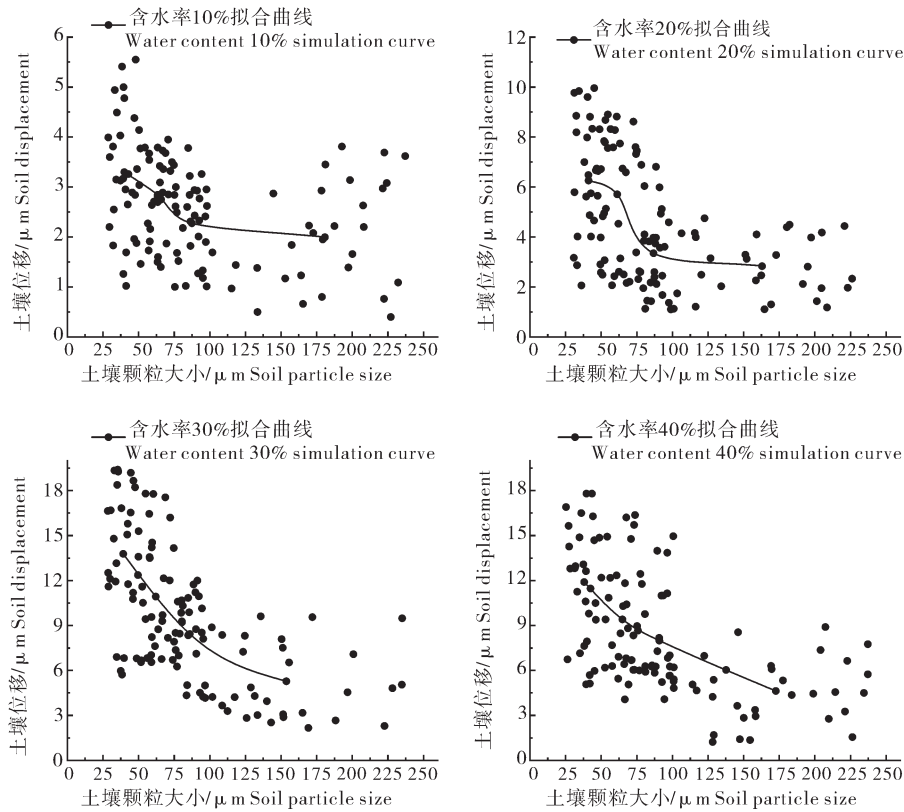


图11 土壤干燥前后颗粒位移量

Fig.11 Displacement before and after soil drying

160 s, 颗粒相对位移分别为 6.45、2.71、2.54 μm 。土壤颗粒直径逐渐减小, 而干燥过程中其位移逐渐增加, 相应地, 土壤块需要的滑落角度也逐渐增加, 这意味着黏附力逐渐增强。

2.6 土壤含水率、颗粒直径和位移量的相关性分析

结合图5、图12可知, 土壤干燥过程中, 无论土壤颗粒直径大小, 在含水率30%的情况下, 均具有滑落

所需最大角度和最大相对位移量。同时S1、S2、S3组中, 颗粒的相对位移量与土壤块在金属板上滑落所需角度存在一定的对应关系。即在一定范围内(含水率低于30%), 颗粒的相对位移量越大, 土壤块滑落所需角度越大, 反之则越小。S4组中的20%含水率的颗粒, 在干燥过程中相对位移量较40%含水率的要低, 但土壤块在金属板上所需滑落的角度却高于40%含水率的土壤块。

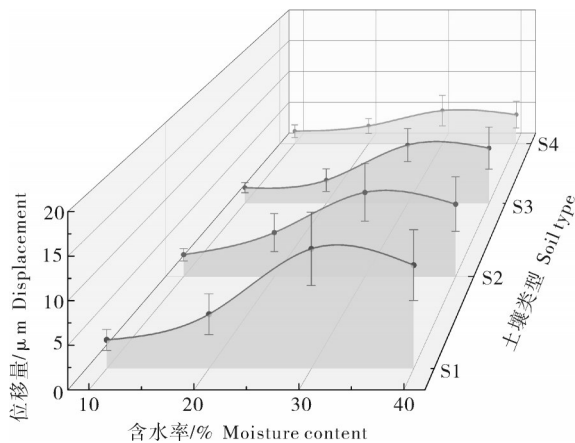


图12 不同颗粒直径和含水率的土壤与位移量之间的关系
Fig.12 The relationship between soil displacement and different particle diameter and moisture content

3 讨论

本研究中, 含水率对金属界面产生的土壤“痕迹”影响较大。根据土壤与斜板的滑落角度分析可知, 土壤黏附力随着含水率的增加, 先增大后减小, 而随着颗粒的减小, 黏附力逐渐增大, 其中含水率30%、颗粒直径为10~50 μm 的土壤具有最大黏附力。在土壤干燥前后, 土壤颗粒直径、俯视周长和俯视面积的数值差异随含水率和颗粒直径的增加而增大。在干燥过程中, 颗粒间隙逐渐减小, 小颗粒逐渐靠近大颗粒, 直到趋于稳定, 这是因为小颗粒更容易发生絮凝或凝聚, 产生大的团聚体, 更容易靠近大颗粒^[18]。某些颗粒出现“扩散”“收缩”等现象, 同时颗

粒产生相对位移。含水率的高低会影响颗粒运动空间,水的张力使得土壤颗粒之间进行“扩散”“收缩”运动^[19]。因小颗粒自身质量轻、形状小,故颗粒在干燥过程中,更容易受水张力的影响而发生相对位移。导致这一现象的可能原因是,高含水率情况下颗粒具有更多的漂浮空间,其中含水率30%、颗粒直径10~50 μm土壤的相对位移在试验中平均值最大,为13.78 μm。分析可知,一定条件下(含水率低于30%),干燥前后颗粒的位移量越大,土壤黏附力越强。试验中含水率30%、颗粒直径在10~50 μm内的土壤表现出最强黏附力,并在干燥过程中呈现出颗粒相对位移最大的现象。

本研究中可能存在手动测量、土壤制备、非理想环境条件等原因误差,后续试验工作中考虑将对手动测量改为半自动方式,进一步稳定环境条件,细化土壤制备标准等。

参考文献 References

- [1] GUAN C, FU J, CUI Z, et al. Evaluation of the tribological and antiadhesive properties of different materials coated rotary tillage blades[J/OL]. *Soil and tillage research*, 2021, 209: 104933 [2023-04-30]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104933>.
- [2] 贾洪雷,王万鹏,陈志,等.农业机械触土部件优化研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 1-13. JIA H L, WANG W P, CHEN Z, et al. Research status and prospect of soil contact components optimization of agricultural machinery [J]. *Transactions of the CSAM*, 2017, 48(7): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- [3] 任露泉.土壤黏附力学[M].北京:机械工业出版社, 2011. REN L Q. *Soil adhesion mechanics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2011 (in Chinese).
- [4] MARANI S M, SHAHGOLI G, MOINFAR A. Effect of nano coating materials on reduction of soil adhesion and external friction[J]. *Soil and tillage research*, 2019, 193:42-49.
- [5] LIU G, XIA J, ZHENG K, et al. Effects of vibration parameters on the interfacial adhesion system between soil and metal surface[J/OL]. *Soil and tillage research*, 2022, 218: 105294 [2023-04-30]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105294>.
- [6] MASSH J, FARD M R, AGHEL H. An optimized bionic electroosmotic soil engaging implement for soil adhesion reduction[J]. *Journal of terramechanics*, 2021, 95(5):1-6.
- [7] SONI P, SALOKHE V M. Bio-inspired macro morphologic surface modifications to reduce soil tool adhesion[M]. Singapore: World Scientific, 2016: 421-484.
- [8] SHAIKH S A, LI Y, ZHENG M, et al. Effect of grouser height on the tractive performance of single grouser shoe under different soil moisture contents in clay loam terrain[J]. *Sustainability*, 2021, 7(4):1414-1423.
- [9] JIANG Y N, SONG C. Study on the formation mechanism of bonding layer around pile body in soft clay[J]. *Stavební obzor civil engineering journal*, 2019, 28(3):386-397.
- [10] HUANG J, KOGBARA R B, HARIHA-RAN N, et al. A state of the art review of polymers used in soil stabilization[J/OL]. *Construction and building materials*, 2021, 305: 124685 [2023-04-30]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124685>.
- [11] YANG X, YANG Z, ZHANG X, et al. Experimental study on the influences of water content, consolidation time, and soil conditioning on the adhesion of clay in EPB shields[J]. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2022, 81(10):1-15.
- [12] 张国忠,左志,王洪昌,等.水田土壤黏附力测量仪设计与试验[J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(4): 169-174. ZHANG G Z, ZUO Z, WANG H C, et al. Design and experiment of soil adhesion measuring instrument for paddy field[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(4): 169-174 (in Chinese with English abstract).
- [13] 杨玮,兰红,李民赞,等.基于图像处理和SVR的土壤容重与土壤孔隙度预测[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12): 144-151. YANG W, LAN H, LI M Z, et al. Soil bulk density and soil porosity prediction based on image processing and SVR [J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(12): 144-151 (in Chinese with English abstract).
- [14] FU Z, HU W, BEARE M H, et al. Contributions of soil organic carbon to soil water repellency persistence: characterization and modelling [J/OL]. *Geoderma*, 2021, 401(3): 115312 [2023-04-30]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115312>.
- [15] 周健民,沈仁芳.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社, 2013. ZHOU J M, SHEN R F. *Soil science dictionary* [M]. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese).
- [16] 曹道成.基于涂层强化和表面织构的65Mn钢耐磨减粘研究[D].武汉:华中农业大学, 2022. CAO D C. Study on wear resistance and viscosity reduction of 65Mn steel based on coating seng-thening and surface texture[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘玉华,史纪安,韩清芳,等.中子仪测定苜蓿田土壤含水量的标定研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(2): 115-119. LIU Y H, SHI J A, HAN Q F, et al. Research on calibration of soil moisture content in alfalfa field by neutron analyzer [J]. *Agricultural research in the arid areas*, 2007, 25(2): 115-119 (in Chinese with English abstract).
- [18] 邵明安,吕殿青.土壤收缩特征曲线的实验研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(3): 471-474. SHAO M A, LÜ D Q. Experimental study on soil shrinkage characteristic curve [J]. *Acta pedologica sinica*, 2003, 40(3): 471-474 (in Chinese with English abstract).
- [19] 赵伟,林青,徐绍辉.胶体颗粒对不同粒径饱和和多孔介质渗透性

的影响[J].土壤学报, 2020, 57(2): 336-346. ZHAO W, LIN Q, XU S H. Effect of colloid particles on permeability of satu-

rated porous media with different sizes [J]. Acta pedologica sinica, 2020, 57(2): 336-346 (in Chinese with English abstract).

Adhesion characteristics of soil-touching components based on changing law of particle and moisture of soil

MA Yunqing^{1,2}, QIN Kuan^{1,2}, ZHANG Yongzheng^{1,2}, ZHAO Yun^{1,2}, BU Kunting¹, SHU Yue³

1. College of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2. Anhui Intelligent Agricultural Machinery Equipment Laboratory, Hefei 230036, China;

3. College of Life Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

Abstract 16 kinds of wet soil with different particle diameter and moisture were used to study the changes in adhesion characteristics between soil-touching components and soil during soil drying. The slope sliding test of metal plate (65Mn steel) was conducted to measure the relationship between the particle diameter and moisture of soil and the adhesion between metal soil-touching components. The microstructure of soil samples was analyzed with microscope. The adhesion phenomena between soil and metal plates during the drying process was observed. The results showed that the "traces" produced by soil with a moisture of 30% and 40% sliding on the metal surface were more obvious than those by soil with a moisture of 10% and 20%. Among them, the soil with moisture of 30% and the particle diameter of 10-50 μm had the maximum adhesion. The differences in particle diameter, overlooking perimeter, and overlooking area increased with the increase of moisture and particle diameter before and after soil drying. During the drying process, the gap between the particles gradually decreased, some particles had "diffusion", "contraction" and other phenomena, some particles occurred relative displacement. The soil with moisture of 30% and the particle diameter of 10-50 μm had the maximum relative displacement of 13.78 μm . The soil adhesion first increased and then decreased with the increase of moisture. As the particles decreased, the soil adhesion gradually increased. When the moisture was below 30%, the greater the particle displacement before and after drying, the stronger the soil adhesion. It is indicated that the soil with moisture of 30% and particle diameter of 10-50 μm exhibits the strongest adhesion and the phenomenon of maximum relative displacement of particles during soil drying.

Keywords soil-touching components; adhesion characteristics; soil drying; soil moisture; improvement of agricultural machinery

(责任编辑:赵琳琳)