

无黏性土增湿—脱湿过程中接触角的特性

吴玉琴, 杨蕊, 代启亮, 杨松

(云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650201)

摘要: [目的] 研究粉土颗粒的接触角滞后特性, 掌握土壤增湿或脱湿过程中的界面特性, 为建立离散元接触模型提供相应的试验基础。[方法] 用躺滴法对土颗粒表面的初始接触角及动态接触角进行测量, 用直接观测法对增湿和脱湿条件下土颗粒与孔隙水的接触角进行测量。[结果] 天然粉土的平均初始接触角为 41.5° , 远大于 0, 广泛用在具有连续表面固体动态接触角测量的 3 种方式仅有 1 种能测出土颗粒表面的动态接触角, 且 3 种土样的后退接触角都大于 0。初始接触角的大小对蒸发(脱湿)过程中土颗粒与孔隙水的接触角变化规律影响不大。同一试样, 不同土颗粒与孔隙水间的接触角在脱湿过程中的变化规律并不一致, 甚至会出现脱湿过程中接触角由小变大的情况。亲水土与斥水土的增湿模式差异较大, 亲水土在增湿过程中先形成液桥再形成包裹土颗粒的液膜, 而斥水土则是先在土颗粒表面形成液滴, 再由液滴连接成包裹土颗粒的液膜。[结论] 土颗粒的接触角存在明显的接触角滞后现象, 土颗粒表面的接触角和土颗粒间的接触角并不一致, 实际应用时需要严格区分。

关键词: 初始接触角; 动态接触角; 非饱和土; 土颗粒

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)01-0167-06

中图分类号: S157

文献参数: 吴玉琴, 杨蕊, 代启亮, 等. 无黏性土增湿—脱湿过程中接触角的特性[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 167-172. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2021. 01. 024; Wu Yuqin, Yang Rui, Dai Qiliang, et al. Contact angle characteristics of cohesionless soil during humidification and dehumidification [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 167-172.

Contact Angle Characteristics of Cohesionless Soil During Humidification and Dehumidification

Wu Yuqin, Yang Rui, Dai Qiliang, Yang Song

(College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

Abstract: [Objective] The contact angle hysteresis characteristics of silty particles were studied to understand the interface characteristics in the process of soil humidification or dehumidification, as well as to provide the corresponding experimental basis for the establishment of a discrete element contact model. [Methods] The initial contact angle and dynamic contact angle on the surface of soil particles were measured by the sessile drop method, and the contact angles between soil particles and pore water under the condition of humidification and dehumidification were measured by the direct observation method. [Results] The average initial contact angle of the natural silty soil was 41.5° , which was much greater than 0. Only one of the three methods widely used for measuring the dynamic contact angle of a continuous surface solid can measure the dynamic contact angle of the surface of soil particles with a receding contact angle of three soil samples greater than 0. The initial contact angle had little influence on the change rule of the contact angle between the soil particles and pore water during the process of evaporation (dehumidification). The change rule of the contact angle between different soil particles in the dehumidification process of the same sample was not consistent, and the contact angle may even change from small to large in the dehumidification process. The humidification modes of hydrophilic and hydrophobic soil were quite different. In the humidification process, pore water first formed a liquid bridge and then formed a liquid film covering the hydrophilic soil particles, while repellent soil first formed liquid droplets on the surface of the soil particles and then connected the droplets to

收稿日期: 2020-09-29

修回日期: 2020-10-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“干湿循环条件下非饱和土的界面—吸力、界面—强度特性研究”(41867038), “气—液界面张力作用下土颗粒移动的力学机理及其宏观反映”(41662021)

第一作者: 吴玉琴(1985—), 女(汉族), 云南省昭通市人, 硕士, 助教, 主要从事农业水土工程方面的研究。Email: ynausoils@163.com。

通讯作者: 杨松(1982—), 男(汉族), 云南省昆明市人, 博士, 教授, 主要从事非饱和土力学方面的研究。Email: yscliff007@126.com。

form a liquid film covering the soil particles. [Conclusion] The contact angle of soil particles lags significantly, and the contact angles between the soil particles and the surfaces of the soil particles are not consistent. Therefore, the contact angle must be strictly distinguished in practical applications.

Keywords: initial contact angle; dynamic contact angle; unsaturated soil; soil particle

固-液接触角是衡量固体表面润湿性能的重要参数^[1-4]。非饱和土与饱和土的主要区别是非饱和土中存在基质吸力,基质吸力大小可以通过 Young-Laplace公式算出,接触角又是该式中的一个重要参数,因此接触角的大小必然会影响非饱和土中基质吸力大小^[5-10]。栾茂田等^[11-12]利用等直径理想球体颗粒液桥模型计算出土颗粒间的基质吸力并建立了理论土水特征曲线,每一条理论土水特征曲线对应一个接触角,接触角的变化范围为 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。贺炜等^[13]建立了不等直径的理想球体颗粒模型,对不同接触角条件下的单个弯液面和不同堆积形式土粒的土水特征曲线进行了计算,每一条土水特征曲线对应一个接触角,接触角分别假设为 0° 、 20° 和 40° ,计算结果表明接触角对土水特征曲线有重要影响。张昭等^[14]将粗粒土简化为一对不等径球体颗粒,研究了接触角对毛细力与颗粒间距的无量纲关系的影响,并和试验结果进行了对比,他们的计算模型中接触角分别假设为 0° 和 40° 。刘星志等^[15]建立了3个不等径球体颗粒模型对土水特征曲线展开研究,计算结果表明接触角对土水特征曲线影响明显,接触角的取值分别为 0° 、 20° 和 40° 。如果接触角进一步增大(大于 50°),则基质吸力可能由“吸引”变为“排斥”^[16-18]。

考虑到接触角对土水特征曲线的影响,Zhou^[19]建立了考虑接触角的土水特征曲线,模型假定增湿所对应的接触角较大(前进接触角),脱湿所对应的接触角为 0 (后退接触角)。Liu等^[20-21],杨松等^[22]在毛细上升试验基础上,认为忽略接触角的影响可能会在建立 SWCC 模型时带来明显误差,然而毛细管上升法

测出的是土体的前进接触角,当接触角大于 90° 时,这种方法将失效^[23]。躺滴法能测土壤的初始接触角及接触角在蒸发过程中的变化规律,测量范围可为 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$,随着土颗粒表面液滴的不断蒸发,接触角不断减小,接触面积保持不变^[24],然而,躺滴法所测的土颗粒接触角为多颗粒表面的固-液接触角,其变化规律是否适用于土颗粒内部所形成液桥还有待研究,另一方面,球体颗粒模型中所假定的一条土水特征曲线对应一个接触角是否合理,也没得到试验证明。为解决以上问题,本文人工配置不同斥水程度的斥水土,用微观观测法研究土颗粒间的接触角在蒸发过程中的变化规律,并和躺滴法测出的初始接触和前进、后退接触角做对比。本研究将为进一步认识土颗粒间固-液接触角的变化规律及建立与实际更接近的球体颗粒模型提供相应的试验依据。

1 材料与方法

1.1 土样的基本物理性质及斥水土的制备

土样于2020年1月取自昆明市团街乡,土样基本物理性质见表1。通过在粉土中加入十八胺增大其接触角,试验选择3种不同斥水度土样,分别为:天然土样(S_1),十八胺含量 0.01% 土样(S_2)和 0.06% 土样(S_3)。制作过程如下,粉土风干后过 2 mm 的筛,把筛好的土样加入粉末状的十八胺($C_{18}H_{39}N$),搅拌均匀后放入烘箱内在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下持续烘 8 h ,其间每隔 2 h 把土样取出并保持温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上搅拌土样 5 min 。烘好的土样过 0.075 mm 的筛用于躺滴法,筛选出 $0.5\sim 0.25$ 粒径的土样用于直接观测试验。

表 1 试验用土样的基本物理参数

土壤质地	比重	液限	塑限	塑性指数	不同粒径颗粒分布		
					$\geq 0.075\text{ mm}$	$0.075\sim 0.005\text{ mm}$	$\leq 0.005\text{ mm}$
粉土	2.73	21.4	15.1	6.3	55.8%	35.3%	8.9%

1.2 接触角测量试验

1.2.1 躺滴法测量土颗粒接触角 土壤接触角测量分亲水土和斥水土分别制样,亲水土的制样方法采用沉积法^[25],具体步骤如下:把风干后的天然亲水土样过 0.05 mm 的筛,按质量百分数为 2% 配置成土水混合液,超声分散 3 min 后,把混合液体小心倒入放有载玻片的玻璃皿中,溶液深度约为 3 倍载玻片厚度,让混合液在室内自然蒸发,当水分全部蒸发后载玻片

上均匀沉积着粉土颗粒,载玻片试样制作完成。斥水土接触角测量试验则参照 Bachmann^[23]的方法进行,制作试样的具体步骤如下:取长度为 4 cm 左右的双面胶带贴到载玻片上,将准备好的土颗粒均匀覆盖载玻片,并用重量为 200 g 的砝码压住载玻片,持续时间为 2 min ,移开砝码后反复轻轻磕碰载玻片以去除多余的土颗粒,直到胶带表面覆盖有一层薄薄的土颗粒,且土颗粒分布均匀,试验保持温度为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,

相对湿度为 $30\% \pm 2\%$ 。

躺滴法可以测出固体表面的前进接触角、初始接触角和后退接触角^[26]。接触角测量试验在 JC2 000 型接触角测量仪上进行,步骤如下:把制作好的载玻片样品放到测试台上,在微量进样器中抽入去离子水,把进样器固定在仪器自动注液仪上,自动注样 $5 \mu\text{L}$ 后液体在注样器针尖产生悬滴,同时注样器针尖

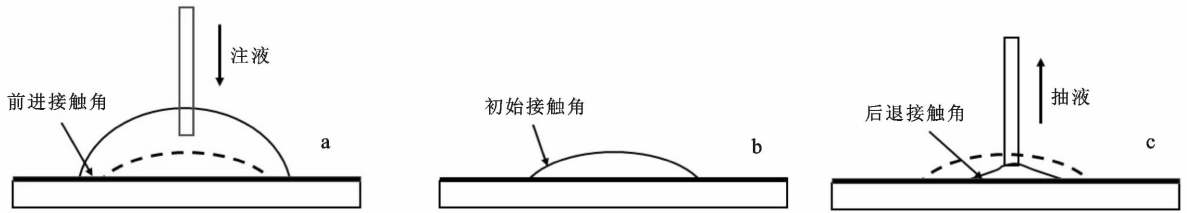


图 1 躺滴法测量土颗粒表面接触角示意图

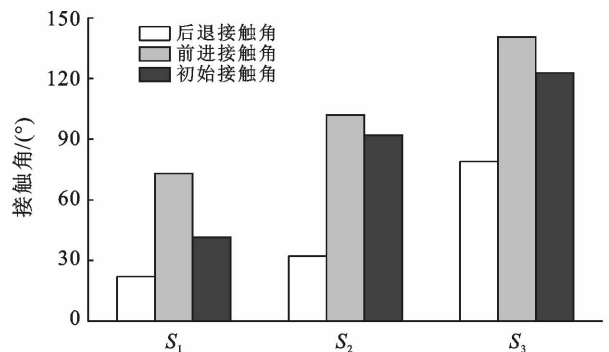
1.2.2 直接观测法测量土颗粒接触角 脱湿观测试验是在 MIT500 型金相显微镜上进行,本试验选用目镜放大倍数为 10 X,物镜放大倍数为 5 X。试样在室温下自然蒸发以达到脱湿目的,显微镜光源为卤钨灯箱照明,经过显微镜反射装置照射在载物平板上,保证由光源产生的温度对试样蒸发造成的影响甚微。试验步骤如下:将制好的土颗粒取少量放于载玻片上,用滴管向载玻片上滴一滴水覆盖土粒,轻轻磕碰载玻片边缘使得放置的粉土颗粒分布均匀且土粒没有叠擦现象。将制好的载玻片样本放置载物平板上,微调试样位置,直至与显微镜相连的数码相机清晰地将图像呈现在电脑屏幕上,滤色片作为显微镜的辅助部件,合理选用可以提高成像质量。经过多次的调试发现相比较其他颜色的滤色片,选取蓝色时能够明显区分载玻片上的液相与固相。试验开始后,每隔 5 s 采集一张图片保存,试验结束后对图片中的接触角进行测量。以上为脱湿(蒸发)过程观测试验,增湿试验与脱湿试验不同之处是试验开始阶段用一个小量增湿器对着土颗粒喷洒微小水滴,其余试验步骤与脱湿试验相同。

2 结果与分析

2.1 基于躺滴法的土颗粒接触角

3 种试样表面接触角平均值大小见图 2。3 种土样躺滴法测出的接触角都表现为:后退接触角最小,前进接触角最大,初始接触角介于前进接触角和后退接触角之间,这个试验结果和具有连续表面固体的接触角试验结果一致。天然无黏性土颗粒(S_1)表面的平均初始接触角为 41.5° ,最小的后退接触角为 22.1° ,前进接触角达到了 73° ,由此可见,假设亲水土颗粒的后退接触角为 0 或初始接触角为 0 与实际情

况并不相符。 S_2, S_3 的初始接触角均大于 90° ,分别为 92° 和 122.8° ,后退接触角则缩小到 32.2° 和 79° ,固体表面液滴的后退接触角不仅可以用抽液的方式得到,还可以通过固体表面的液滴蒸发得到^[27](见图 3)。



注: S_1 为天然土样; S_2 为十八胺含量 0.01% 土样; S_3 为十八胺含量 0.06% 土样。下同。

图 2 躺滴法测出的 3 种试样表面接触角

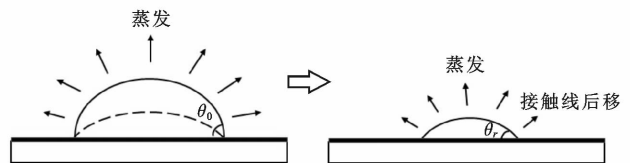


图 3 固体表面液滴蒸发模式下的后退接触角测量 θ

观察 3 种试样表面液滴的蒸发过程,接触角不断减小,接触面积保持不变,最终接触角变为 0,如果按照 Erbil 等^[27]的后退接触角的液滴蒸发测量法则表明此时的后退接触角为 0,显然,这个结果与抽液法测出后退接触角出现了很大偏差。

图 4 为典型固体表面液滴的前进接触角与后退接触角^[1]。液滴静置在一块平板上,当平板倾斜,则液滴朝下部分的接触角逐渐增大,朝上部分的接触角逐渐减小,当液滴开始滑动时,朝下的接触角达到最

大值,即为前进接触角,朝上的接触角减小到最小值,即为后退接触角。 S_3 试样即使放置成垂直状态,其表面的液滴也没有出现向下滑动的迹象,这种法方是不能测出土颗粒表面的前进接触角和后退接触角。这种测量方法对具有连续表面的光滑固体比较有效,由许多细小土颗粒黏附制作而成的载玻片试样表面相对粗糙,液滴并不能顺其表面下滑。

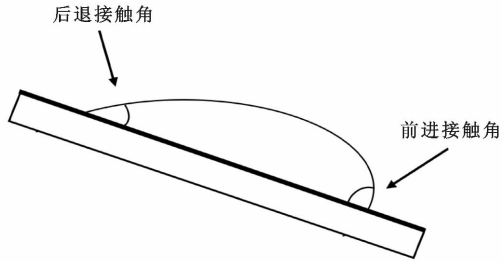


图 4 液滴滑动过程中的前进接触角与后退接触角

2.2 基于微观观测法的土颗粒间接触角

2.2.1 脱湿过程中土颗粒间液桥的接触角 用金相数码显微镜直接观测得到的蒸发条件下粉土颗粒间的孔隙水形态(见图 5)。每种土样的蒸发过程分别取 4 副典型图片由上到下依次排列。仅从图像上看,并不能通过孔隙水与土颗粒间的接触角大小去判断土样是否是亲水或斥水,即使是躺滴法测出的初始接触角为 122.8° 的 S_3 样。在图 5 中也没有出现较大接触角情况,并且所有斥水土样间都没有找到凸液面的液桥。

为观测土颗粒间接触角随时间的变化规律,每种土样在观测时分别选择 4 个点(分别为 P_1, P_2, P_3 和 P_4)测量其蒸发过程中的接触角大小,结果见图 6。躺滴法很容易从初始接触角的大小区分出 3 种不同斥水程度的试样,而直接观测法则不行,斥水度最大的 S_3 样在脱湿过程中刚出现的接触角甚至小于亲水土

样 S_1 ,如 $S_1(P_1)$ 脱湿初始接触角为 $38^\circ, S_2(P_4), S_3(P_1), S_3(P_2), S_3(P_3)$ 均小于 38° 。 S_1 试样观测到土颗粒间最大接触角为 70.5° ,最小为 12.3° ; S_2 试样土颗粒间的最大接触角为 52° ,最小为 27.3° ; S_3 样的最大接触角为 67.2° ,最小则为 9.8° 。接触角在蒸发过程中的变化规律也不是递减的,有的甚至出现了增大情况,如 $S_1(P_1)$ 点,接触角在蒸发的末尾阶段接触角从 48° 增加到 70.5° , $S_3(P_2)$ 在蒸发过程中从 20.2° 增加到 64.4° ,接触角增大过程中往往伴随着颗粒间相对位置的变化或者孔隙形态的突然变化,表明蒸发过程中土颗粒间的接触角和颗粒的形态及相对位置有关。有的点在蒸发过程中接触角基本保持不变,并且接触线明显滑移,如: $S_2(P_1)$ 和 $S_3(P_1)$,这与躺滴法测量固体表面液滴蒸发过程中的“去钉扎”现象一致,此时的接触角为该点的后退接触角。

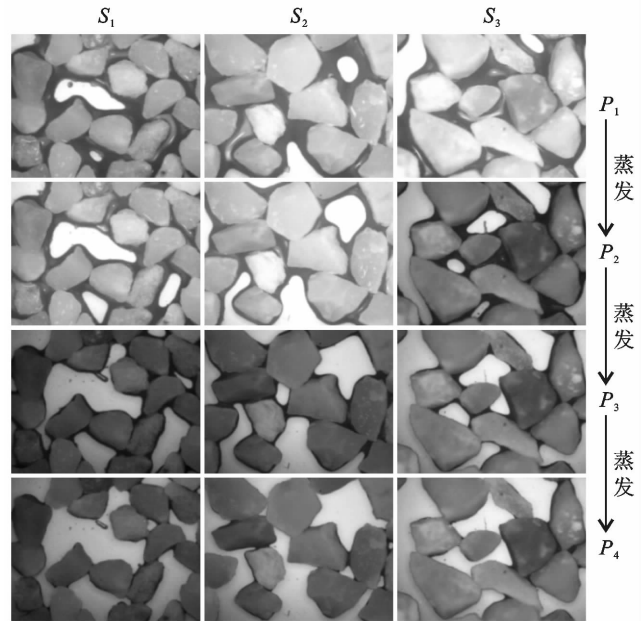


图 5 蒸发过程中土颗粒间孔隙水形态

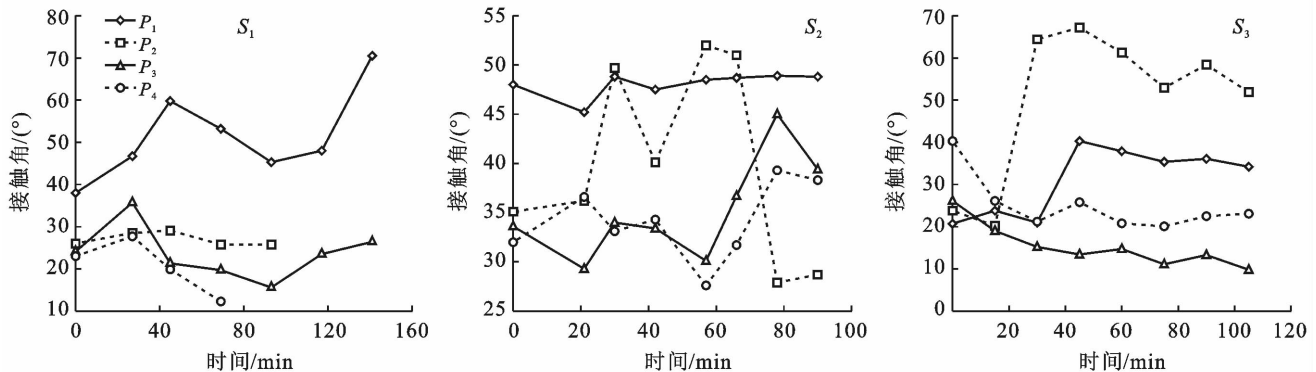


图 6 土颗粒间的孔隙水与土颗粒接触角随时间变化关系

2.2.2 增湿过程中土颗粒接触角 增湿条件下 3 种试样土颗粒间的孔隙水形态见图 7。每种土样的增

湿过程分别取 4 副典型图片由上到下依次排列。在整个增湿过程中,亲水试样(S_1)和斥水试样(S_2, S_3)

会出现明显差异(见图 8)。土颗粒的初始状态为①,亲水试样 S_2 增湿后会在土颗粒间形成液桥③,继续增湿则液桥会形成完全包裹土颗粒的水膜④。与亲水试样的增湿不同,斥水试样从干燥的固体颗粒增湿后,会先在土颗粒表面形成大小不同的水滴②。图 9 为斥水试样 S_1 表面形成不同大小水滴的显微镜图像,随着水滴数量的增加,这些水滴最终会相互结合形成包裹斥水土颗粒的水膜(图 8③)。亲水土试样的增湿和脱湿过程中土样的形态是互逆的,即脱湿过程是从水膜包裹的土颗粒形成液桥,最后孔隙水完成蒸发,增湿过程则是先形成液桥,最后形成包裹土颗

粒的液膜。斥水土的增湿和脱湿则不是两个可逆过程,斥水土颗粒在脱湿过程中从水膜包裹的土颗粒形成液桥,增湿过程中则是先在颗粒表面形成接触角较大的液滴,液滴数量不断增加后形成包裹土颗粒的液膜,即:斥水土颗粒增湿过程中没有出现液桥。与脱湿不同,通过增湿就能明显区分亲水与斥水试样,在图 9 中观测到增湿过程中单个土颗粒表面液滴的接触角为 90° 左右,与躺滴法测出的多颗粒表面接触角比较接近,在一定程度上说明基于多颗粒表面液滴接触角测量的躺滴法可以反映单个土颗粒表面的初始接触角。

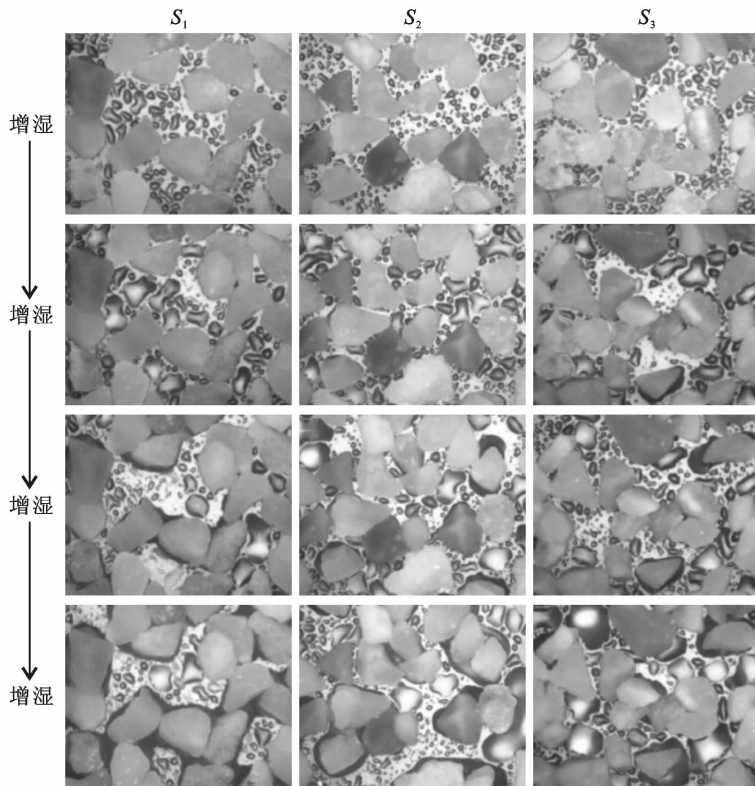


图 7 增湿过程中土颗粒间孔隙水形态

2.3 结果分析

当土壤从饱和状态变为非饱和状态时,土中的水气形态会随饱和度的改变而发生变化。Vanapalli^[28] 根据土水特征曲线的变化规律把不同非饱和土的水气形态分成了 3 个区域:边界影响区、过渡区和残余区。很多学者给出了不同含水率下土颗粒与孔隙水形态示意图(图 10),通过本文前面的直接观测试验,亲水土壤的增湿、脱湿和斥水土壤的脱湿都存在表 2 所示的 5 种状态,但是斥水土壤的增湿水气形态并没有包含在其中,图 8②与图 9 所示的水气形态是斥水土增湿过程中表现出来的特殊形态。

表面化学中,一种具有连续表面的固体物质,其接触角往往指这种材料的初始接触角,动态接触角则

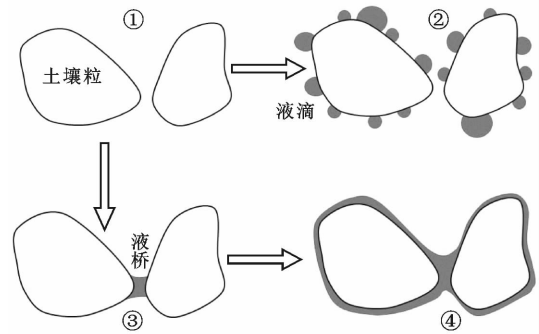


图 8 亲水、斥水土颗粒增湿过程示意图

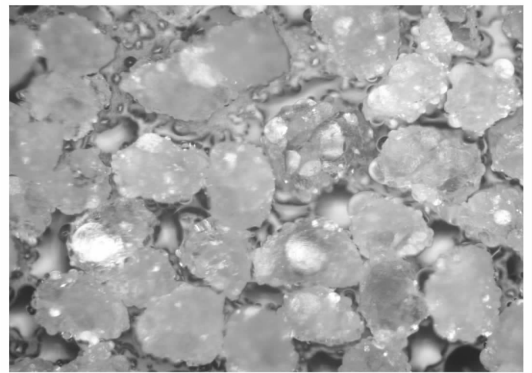


图 9 斥水土颗粒表面形成的液滴

包括了前进接触角和后退接触角,初始接触角反映了这种材料的润湿性能。土力学及土壤学领域在涉及到接触角部分,并没有严格区分动态接触角和初始接触角,在实际应用时也没有区分散体材料和连续体材料的区别,即:一种土样往往对应一个接触角或者一种土样脱湿(增湿)对应一个接触角,即增湿对应前进接触角,脱湿对应后退接触角。从前面的试验及分析可以看出,直接把具有连续表面固体材料的接触角概念应用到多颗粒物质的土体中,可能会带来较大的误差。在非饱和土力学中,应用球体颗粒模型对其基质吸力或土水特性进行研究时,需要考虑不同斥水性土体增湿或脱湿条件中接触角的变化规律,才能建立起更符合真实状况下的颗粒液桥模型。

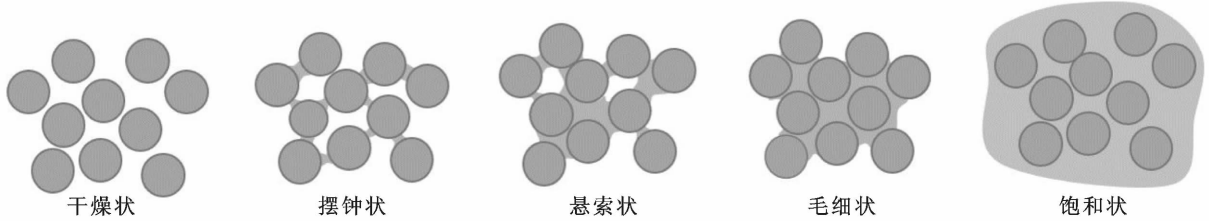


图 10 粉土中的孔隙水形态

3 结论

(1) 用躺滴法测出的天然粉土的平均初始接触角为 41.5° , 远大于 0。躺滴法测量具有连续表面固体材料动态接触角的 3 种方法应用到土颗粒表面接触角的测量时会产生完全不同的结果, 其中, 平板倾斜方法由于液滴在载玻片表面不能滑动, 该方法失效; 抽液和注液法则可以测量土颗粒表面的前进接触角和后退接触角。

(2) 用直接观测法测量土颗粒与孔隙水的接触角可以发现: 不同初始接触角的土颗粒在脱湿过程中不能通过接触角去判断土颗粒属于亲水或斥水, 不同土颗粒的固-液接触角在蒸发过程中变化规律并不一致, 甚至会出现接触角增大的现象, 这是由于土颗粒的几何形态或土颗粒孔隙变化引起的。

(3) 亲水土和斥水土增湿过程中土颗粒与孔隙水形态会有明显区别, 斥水土增湿过程中先在土颗粒表面形成液滴, 液滴最后连接成包裹土颗粒的液膜, 而亲水土则是先形成液桥, 最后由液桥生长为包裹土颗粒的液膜。

[参 考 文 献]

[1] 沈钟, 赵振国, 康万利. 胶体与表面化学[M]. 4 版. 北京: 化学工业出版社, 2012.

[2] Joanny J F, de Gennes P G. A model for contact angle hysteresis [J]. The Journal of Chemical Physics, 1984, 81 (1): 552-562.

[3] He B, Lee J, Patankar N A. Contact angle hysteresis on rough hydrophobic surfaces [J]. Colloids and Surfaces (A): Physicochemical and Engineering Aspects, 2004, 248 (1/2/3): 101-104.

[4] Schwartz L W, Garoff S. Contact angle hysteresis on heterogeneous surfaces [J]. Langmuir, 1985, 1 (2): 219-230.

[5] De Souza E J, Gao L, McCarthy T J, et al. Effect of contact angle hysteresis on the measurement of capillary forces [J]. Langmuir, 2008, 24(4): 1391-1396.

[6] Restagno F, Poulard C, Cohen C, et al. Contact angle and contact angle hysteresis measurements using the capillary bridge technique [J]. Langmuir, 2009, 25(18):

11188-11196.

- [7] Carroll B J. The accurate measurement of contact angle, phase contact areas, drop volume, and Laplace excess pressure in drop-on-fiber systems [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1976, 57(3): 488-495.
- [8] Shanahan M R. Meniscus shape and contact angle of a slightly deformed axisymmetric drop [J]. Journal of Physics (D): Applied Physics, 1989, 22(8): 1128-1135.
- [9] Emelyanenko A M, Ermolenko N V, Boinovich L B. Contact angle and wetting hysteresis measurements by digital image processing of the drop on a vertical filament [J]. Colloids and Surfaces (A): Physicochemical and Engineering Aspects, 2004, 239(1/2/3): 25-31.
- [10] Lu Ning, Likos W J, 简文星译. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [11] 栾茂田, 李顺群, 杨庆. 非饱和土的理论土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 611-615.
- [12] 栾茂田, 李顺群, 杨庆. 非饱和土的基质吸力和张力吸力[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 863-868.
- [13] 贺炜, 赵明华, 陈永贵, 等. 土-水特征曲线滞后现象的微观机制与计算分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1078-1083.
- [14] 张昭, 刘奉银, 齐吉琳, 等. 考虑固-液接触角影响的粗颗粒间液桥毛细力计算方法[J]. 水利学报, 2016, 47 (9): 1197-1207.
- [15] 刘星志, 刘小文, 陈铭, 等. 基于 3 个不等粒径颗粒接触模型的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 651-656.
- [16] Likos W J, Lu Ning. Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(6): 646-655.
- [17] Yang Song, Lu Tinghao. Study of soil-water characteristic curve using microscopic spherical particle model [J]. Pedosphere, 2012, 22(1): 103-111.
- [18] Megias-Alguacil D, Gauckler L J. Analysis of the capillary forces between two small solid spheres binded by a convex liquid bridge [J]. Powder Technology, 2010, 198(2): 211-218.
- [19] Zhou Annan. A contact angle-dependent hysteresis model for soil-water retention behavior [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 49: 36-42.

- [6] 李新,黄春林,车涛,等. 中国陆面数据同化系统研究的进展与前瞻[J]. 自然科学进展,2007,17(2):163-173.
- [7] Shi Chunxiang, Xie Zhenghui, Qian Hui, et al. China land soil moisture En KF data assimilation based on satellite remote sensing data [J]. Science China(Earth Sciences),2011,54(9):1430-1440.
- [8] Chen Yingying, Yang Kun, Qin Jun, et al. Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013,118(10):4466-4475.
- [9] 宋海清,李云鹏,张静茹,等. 内蒙古地区多种土壤湿度资料的初步评估[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(8):139-144.
- [10] 秦道清,赵岩,王红瑞,等. 基于站点观测和模式模拟的北京市土壤湿度[J]. 自然资源学报,2019,34(1):191-204.
- [11] 胡伟,马伟强,马耀明,等. GLDAS 资料驱动的 Noah-MP 陆面模式青藏高原地表能量交换模拟性能评估[J]. 高原气象,2020,39(3):486-498.
- [12] 陈燕丽,黄思琦,莫建飞,等. 基于 CLDAS 数据的甘蔗干旱监测评估标准对比:以 2011 年广西干旱为例[J]. 干旱气象,2020,38(2):188-194.
- [13] 李登宣,王澄海. 青藏高原春季土壤湿度与中国东部夏季降水之间的关系[J]. 冰川冻土,2016,38(1):89-99.
- [14] 刘川,余晔,解晋,等. 多套土壤温湿度资料在青藏高原的适用性[J]. 高原气象,2015,34(3):653-665.
- [15] Berg A A, Famiglietti J S, Walker J P, et al. Impact of bias correction to reanalysis products on simulations of North American soil moisture and hydrological fluxes [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003,108(D16):4490.
- [16] Rodell M, Houser P R, Jambor U E A, et al. The global land data assimilation system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004,85(3):381-394.
- [17] 王玉娟,王树东,宋文龙,等. GLDAS 数据产品在渭河流域潜在蒸散发模拟中的应用研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(12):53-58.
- [18] González-Zamora A, Sánchez N, Martínez-Fernández J, et al. Root-zone plant available water estimation using the SMOS-derived soil water index [J]. Advances in Water Resources, 2016,96:339-353.
- [19] 朱智,师春香. 中国气象局陆面同化系统和全球陆面同化系统对中国区域土壤湿度的模拟与评估[J]. 科学技术与工程,2014,14(32):138-144.
- [20] Entekhabi D, Reichle R H, Koster R D, et al. Performance metrics for soil moisture retrievals and application requirements [J]. Journal of Hydrometeorology, 2010,11(3):832-840.
- [21] 刘欢欢,王飞,张廷龙. CLDAS 和 GLDAS 土壤湿度资料在黄土高原的适用性评估[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(5):270-276,294.
- [22] 邓明珊,孟宪红,马英赛,等. 基于 GLDAS 产品的青藏高原土壤湿度特征分析[J]. 干旱气象,2018,36(4):595-602.
- [23] Zeng Jiangyuan, Li Zhen, Chen Quan, et al. Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations [J]. Remote Sensing of Environment, 2015,163:91-110.

(上接第 172 页)

- [20] Liu Zhen, Yu X B, Wan Lin. Influence of contact angle on soil-water characteristic curve with modified capillary rise method [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013,2349(1):32-40.
- [21] Liu Zhen, Yu Xiong, Wan Lin. Capillary rise method for the measurement of the contact angle of soils [J]. Acta Geotechnica, 2016,11(1):21-35.
- [22] 杨松,龚爱民,吴珺华,等. 接触角对非饱和土中基质吸力的影响[J]. 岩土力学,2015,36(3):674-678.
- [23] Ramírez-Flores J C, Bachmann J, Marmur A. Direct determination of contact angles of model soils in comparison with wettability characterization by capillary rise [J]. Journal of Hydrology, 2010,382(1/2/3/4):10-19.
- [24] 杨松,马泽慧,王磊,等. 躺滴法测量干湿循环条件下土壤固-液接触角的滞后特性[J]. 农业工程学报,2018,34(2):114-119.
- [25] Alghunaim A, Kirdponpattara S, Newby B M Z. Techniques for determining contact angle and wettability of powders [J]. Powder Technology, 2016,287:201-215.
- [26] Pittoni P G, Lin C H, Yu T S, et al. On the uniqueness of the receding contact angle: Effects of substrate roughness and humidity on evaporation of water drops [J]. Langmuir, 2014,30(31):9346-9354.
- [27] Erbil H Y, McHale G, Rowan S M, et al. Determination of the receding contact angle of sessile drops on polymer surfaces by evaporation [J]. Langmuir, 1999,15(21):7378-7385.
- [28] Chaney R C, Demars K R, Vanapalli S K, et al. The relationship between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till[J]. Geotechnical Testing Journal,1996,19(3):259-268.