doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.030

斥水性砂土水-气形态及其对斥水-亲水转化的影响分析

杨 松 黄剑峰 罗茂泉 马泽慧 王 磊 吴玉琴
(云南农业大学水利学院,昆明 650201)

摘要: 处于地球表面的土壤,尤其是耕作层土壤,受外界因素影响其接触角可能会发生改变。通过试验对不同接触角的壤质砂土中的孔隙水-气形态分布状况进行研究,试验结果表明:砂土颗粒与孔隙水间的接触角增大会使表层土壤中水封闭土层厚度减小,但接触角增大到一定值后,水封闭层的厚度不再发生变化。随着接触角的增大,气封闭层的厚度不断减小。与连续固体表面不同,砂土颗粒的接触角小于90°甚至降低至36°也会出现明显的斥水现象,但随着砂土中饱和度的增大,斥水现象会消失,砂土斥水与亲水转化时对应的饱和度与水封闭向双开敞转化时对应的饱和度基本一致,因此,砂土亲水与斥水转化时对应的临界含水率与孔隙水气分布形态密切相关,通过理想模型对两种不同水-气形态下土壤的基质吸力变化分析可以发现,产生这种现象是因为当土壤由水封闭变为双开敞时,水-气交界面在液体侧的曲率中心消失(接触角小于90°),气-液界面引起的基质吸力恒为"正"。

关键词: 孔隙水-气形态; 土壤斥水性; 接触角; 颗粒模型; 孔隙模型

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)11-0247-06

Pore Water - Air Configurations in Water Repellent Sandy Soil and Its Effects on Transformation of Hydrophilicity to Hydrophobicity

YANG Song HUANG Jianfeng LUO Maoquan MA Zehui WANG Lei WU Yuqin
(*College of Water Conservancy*, *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650201, *China*)

Abstract: The earth surface soil, especially cultivated soil, contact angles of soil may be changed by external factors. Hydrophilic soil will translate into hydrophobic soil because of the bigger contact angle. Repellent soil will bring a series of agricultural and environmental problems. To develop the study to the pore water - air shape distribution in different contact angle soils, some tests were carried out. The experimental results showed that the increase of contact angles between soil particles and pore water can make the thickness of the closed-water soil layer reduced. When the contact angle was increased to a certain value, the closed-water soil layer thickness would remain unchanged. With the increase of the contact angle, the thickness of closed-air layer was reduced. It was different from the continuous solid surface, the contact angel of soil granule was less than 90°, even reduced to 36°, it would also appear the water-repellent phenomenon obviously, but with the increase of the saturation degree in the sand, the water-repellent phenomenon would disappear. The corresponding saturation of water repellent and hydrophilic conversion was basically consistent with the corresponding saturation of closed-water system and bi-opened system transformation. Therefore, the critical water content of hydrophilicity to hydrophobicity was closely related to pore water - air configurations. The matric suction in different pore water - air configurations was analyzed with ideal models, the causes of this phenomenon was the disappearance of water - air surface centers of curvature in water side (contact angle was less than 90°), the matric suction caused by water - air surface was greater than zero. The results suggested that it was not enough to focus on chemical property of soil water repellency, the mechanics of interface was also an important aspect of repellent soil study.

Key words: pore water - air configurations; soil water repellency; contact angle; particle models; pore models

收稿日期:2017-02-10 修回日期:2017-05-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(41662021、51209182)
作者简介: 杨松(1982—),男,副教授,博士,主要从事农业水土工程研究,E-mail:yscliff007@126.com

引言

随着深度的增加,地表土壤层中的水分不断增多,呈现出不同的形态。根据非饱和土壤中的水-气形态可以分为3类[1]:水封闭非饱和土、双开敞非饱和土和气封闭非饱和土。当土壤处于气封闭状态时,水-气界面没有与固体表面相交,此时气相为封闭气泡,只有液相连续,通常将其视为饱和土壤[2];随着土壤含水率不断降低,气相和液相分别连续,此时土壤为双开敞状态;如果土壤含水率进一步降低,孔隙水被气相隔离封闭,土壤进入水封闭状态。

斥水性土壤是指水分不能或者很难湿润土颗粒表面的土壤,即:土颗粒与孔隙水间的接触角较大。处于地表的耕作层土壤,受外界因素影响其接触角可能会发生改变,如:表层土壤含有机物、森林火灾、再生水灌溉等[3-6]。当土颗粒与孔隙水的接触角增大,土壤可能变为斥水。斥水性土壤由于降低了土壤的渗透性从而对耕作层土壤的土水特性有重要影响[7]。斥水性土壤增加了地表径流,加快土壤侵蚀,还可能降低种子的发芽率和阻碍作物的生长[8]。影响土壤斥水性的因素很多,含水率是其中一个重要因素[9]。当含水率不断增大,土壤可能由斥水变为亲水,此时对应的含水率为临界含水率。其机理被解释为:土壤中水分增加溶解了土壤中造成斥水的有机物成分[10]。然而,对于斥水成分稳定的土壤也会出现临界含水率的现象,其机理目前还不清楚。

通过理想颗粒模型或孔隙模型可以从微观角度对土壤中的三相界面特性及毛细力展开研究,从而对土壤的土水特性有更深刻的认识。栾茂田等[11]以理想球体颗粒模型为基础,考虑张力吸力的影响,在双开敞基础上进一步把非饱和土划分为搭接双开敞和不搭接双开敞两种状态。张昭等[12-13]利用不等直径的球体颗粒模型对非饱和土的水力特性及毛细力的演化规律进行了深入探讨。一般情况下,球体颗粒模型更适用于比表面积较小的壤质砂土,采用片状颗粒模型模拟黏土更为恰当[14]。另外,还可以用理想孔隙模型对土壤的土水特性展开研究,很多土水特征曲线模型都是在圆柱形孔隙模型基础上推导的[15-16],有学者则通过建立正弦型孔隙模型对土壤中的水分迁移特性展开研究[17-18]。用于描述两类模型的方程组都涉及到接触角,因此两类模型都可以反映土壤的斥水性,然而,两类模型所对应的水-气形态是不同的。

本文对具有稳定斥水性的壤质砂土中孔隙水-气形态展开研究,在试验基础上分析斥水性砂土临界含水率所对应的孔隙水-气形态,并据此分析理想颗粒模型和孔隙模型的适用性,最后通过理想模型对砂土斥水-亲水随含水率变化的原因进行解释。为进一步认清土壤斥水-亲水的转化机理提出一种思路。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自云南省昆明市团结乡某风化土坡,土壤的基本物理性质如表1所示,土样经过风干碾碎后过2 mm筛,采用混合法改变砂土的表观接触角,在砂土中加入不同量的斥水剂(十八胺:$C_{18}H_{39}N$,白色蜡状粉末)并混合均匀(由于十八胺不溶于水,所以配出的土样具有稳定的斥水性),准备5种风干砂土试样,十八胺质量分数分别为0、0.05%、0.1%、0.2%、0.3%,分别编号为S1、S2、S3、S4、S5。

表1 土样的物理性质

Tab.1 Physical properties of test samples

土样	比重	比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	不同粒径质量分数/%					
			>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.10~0.25 mm	0~0.10 mm
壤质砂土	2.61	3.453	0.04	18.49	33.75	22.14	13.99	11.59

1.2 接触角测量试验

采用躺滴法对土颗粒接触角进行测量。待测土样过0.5 mm筛,取长度为4 cm左右的双面胶带贴到载玻片上,将筛好的土颗粒均匀覆盖载玻片,并用200 g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,且土颗粒分布均匀无明显凸起。接触角测量试验在JC2000型接触角测量仪上进行,由于水滴能在S1样制成的压片上迅速摊开,因此认为此时的接触角为0°,其余4种试样的接触角测量结果如图1所示,S2、S3、S4、S5接触角分别为36°、57°、70°、77°。

1.3 确定孔隙水-气状态的试验过程

文献[1]给出了确定砂土孔隙水-气形态的试验方法,本文在其基础上进行了适当改进,具体操作步骤如下:

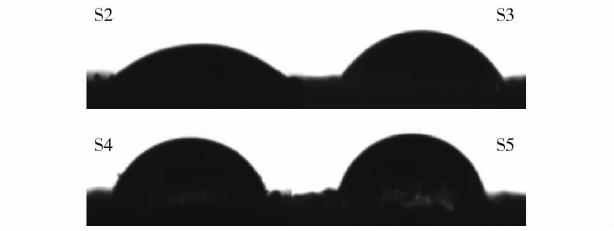

图 1　S2、S3、S4、S5 的接触角

Fig. 1　Contact angles of samples S2, S3, S4 and S5

(1)准备 5 根长度为 1 m,内径为 5 cm 的透明玻璃管。玻璃管底部用滤纸封堵,将 5 种不同斥水度的砂土分别装入不同玻璃管内,每 10 cm 装入 314 g 砂样,振捣后使其干密度为 1.6 g/cm^{3}左右,直至装满玻璃管,如图 2 所示。

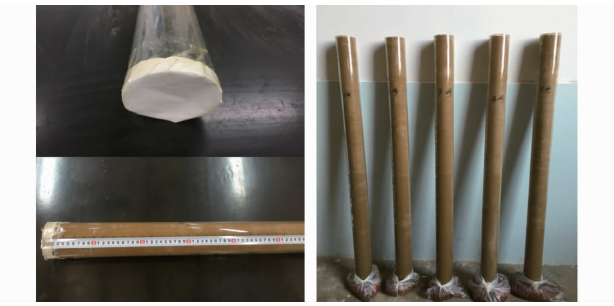

图 2　试验装置

Fig. 2　Test devices

(2)先把装满砂样的玻璃管竖直放入盛满蒸馏水的容器中,从玻璃管顶部注蒸馏水(由于混有十八胺砂土的接触角较大,需要施加一定的初始水头促使水下渗),待整根玻璃管顶部有水漫出后停止注水,静止 10 min 后再继续注水,如此反复 3 次。把玻璃管从容器中移出,在玻璃管底部用充分吸水的海绵保湿,套上塑料膜防止水分蒸发,保持玻璃管底部的砂土处于饱和状态。

(3)试样在室内静置 12 h,把 1 m 长的玻璃管分成 50 小段,每段 2 cm,每段取适当土样放入铝盒干燥、称量,测其含水率并计算相应的饱和度。

1.4　滴水入渗试验

通过滴水入渗试验确定水滴入渗时间可以评价土壤的斥水性,其操作步骤如下:

(1)S2、S3、S4、S5 每种土样配制 24 个不同含水率,分别为:3.0%、3.5%、4.0%、4.5%、…、14.0%、14.5%,密封静置 24 h 后制成干密度为 1.6 g/cm^{3}铝盒试样。

(2)如图 3 所示,试样表面保持平整,为延长液滴的蒸发时间,试验时的相对湿度保持在 90% 以上。用注液器把体积为 0.02 mL 的蒸馏水滴到试样表面,用秒表记录液滴完全渗透进试样内所用的时间。试样表面不同部位进行 7 次滴水入渗试验,将 7 滴水的入渗时间去掉最大值和最小值后求出的算术平均值为每个试样的最终测定结果,取 5 s 作为斥水和不斥水的分界点[4]。

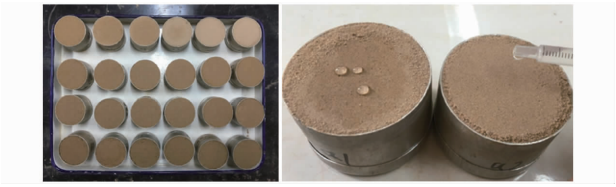

图 3　滴水入渗试验

Fig. 3　Test of water drop penetration

2　试验结果

2.1　水-气形态随土层深度变化

从地表面到潜水面,土层饱和度(含水率)的变化规律如图 4a 所示[19],在这个区域内(包气带),饱和度随土层深度变化关系曲线可以分为 3 个阶段,这 3 个阶段分别对应非饱和土的 3 种水-气形态,在曲线上部,随着土层深度增加,含水率基本没有变化,此时的非饱和土处于水封闭状态。当到达一定的土层深度后,土中的水-气形态将由水封闭转变为双开敞,在整个双开敞区域内,随着土层深度的增加,土壤的饱和度不断增大。到达曲线下部后,土壤进入气封闭状态,趋于饱和,随着深度的增加饱和度基本不变。

试验得到的曲线与示意图基本一致,但土颗粒的接触角不同,土中水-气形态转化的分界点位置可能会发生改变。如图 4b ~ 4f 所示,亲水土样 S1 中,水封闭状态转化为双开敞的分界点 A 位于深度为 28 cm 左右的土层中,对应的饱和度为 36%,当土颗粒的接触角增大,S2、S3 样的分界点 A 深度为 24 cm 和 20 cm 左右,相应的饱和度减小为 32% 和 27%。土颗粒的接触角进一步增大,S4、S5 样中,水-气形态转化的分界点 A 位置则维持在深度为 20 cm 的土层中,饱和度也保持在 20% 左右。接触角的增大会使水封闭土层厚度减小,但接触角增大到一定值后,水封闭土层的厚度就基本保持不变。分界点 A 处的饱和度随接触角的增大而减小,接触角增大到一定值后,分界点 A 处的饱和度不受接触角的影响。

当试样中孔隙水-气形态由双开敞转化为气封闭时,5 个试样在分界点 B 处的饱和度基本都保持在 90% ~ 92%,相应的 S1、S2、S3、S4、S5 试样转化点所在的土层深度分别为 82、84、88、94、96 cm。由此可见,接触角对试样双开敞状态转变为气封闭状态时的饱和度影响不大,但随着接触角的增大,气封闭层的厚度不断减小。

2.2　滴水入渗时间随饱和度变化

当水滴滴到亲水土样 S1 表面时,无论土样的饱

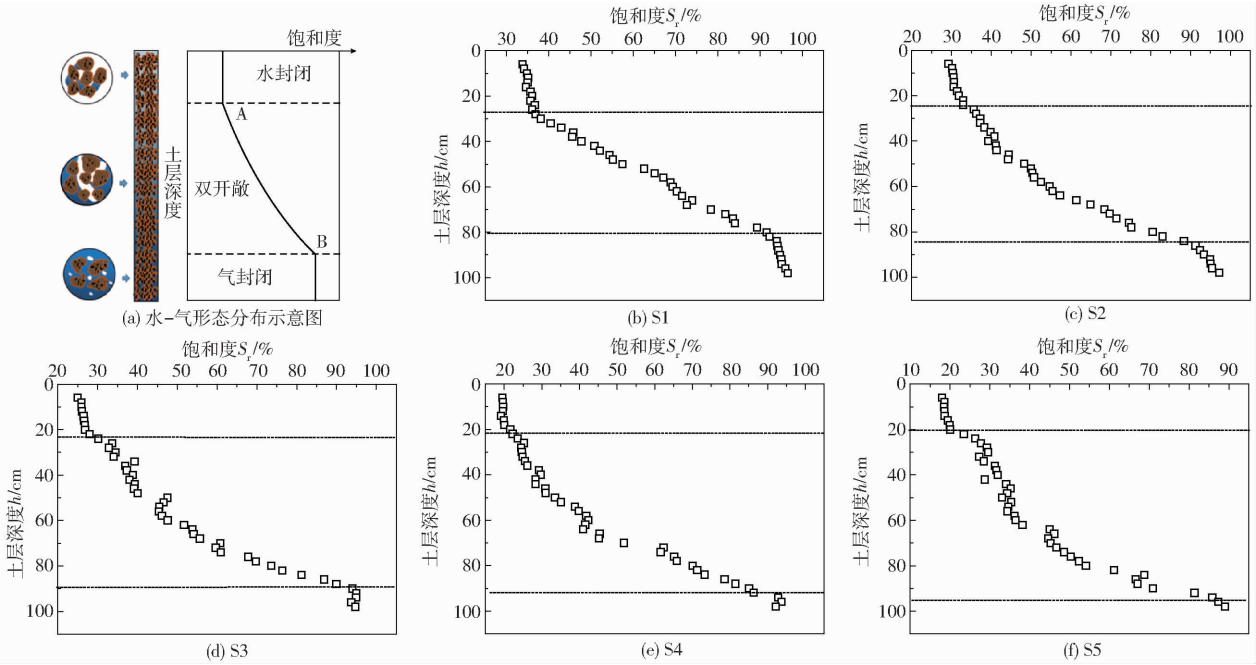

图 4 饱和度随土层深度的变化曲线

Fig. 4 Changing curves of saturation with soil depth

和度如何变化,水滴都会迅速入渗,入渗时间趋近于零。其余土样(S2 ~ S5),由于接触角较大,水滴落到土样表面后并不会立刻入渗,其入渗时间与饱和度的关系如图 5 所示,土壤处于风干状态时(S_r < 5%),水滴在土样表面直至蒸发结束后也不入渗,土壤表现出了剧烈的斥水性。随着饱和度的增大,4 种土样表面水滴的入渗时间不断减小。S2 样在饱和度增加到 28% 左右,水滴入渗时间缩短到 5 s 以内;S3、S4、S5 样在饱和度为 20% ~25% 之间时,水滴入渗时间缩短到 5 s 以内。对比前面的孔隙水-气形态确定试验可以发现,土样斥水与亲水转化时对应的饱和度与其水封闭向双开敞转化时对应的饱和度基本一致。

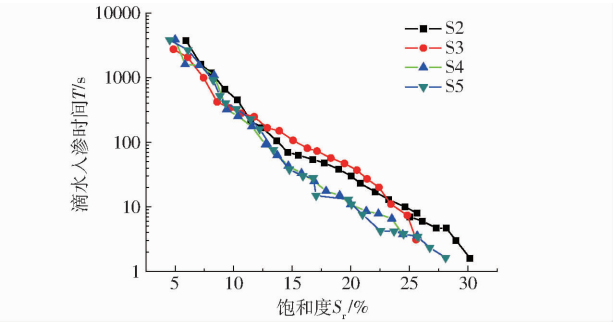

图 5 滴水入渗时间 T 随饱和度 S_r 变化曲线

Fig. 5 Changing curves of water penetration time with saturation

3 讨论

3.1 土壤的斥水性与接触角

通常情况下认为,固体表面的接触角大于 90° 为斥水,小于 90°为亲水。然而,通过滴水入渗试验可以看出,土样 S2、S3、S4、S5 的接触角小于 90°仍然出现了明显的斥水现象,特别是 S2,其接触角仅为 36°,斥水现象依然很明显。其实,土壤的斥水和亲水并不是以 90°为分界点,SHIRTCLIFFE 等[20]从能量的角度证明了等直径球体颗粒亲水与斥水转化时对应的接触角小于 90°。LIKOS 等[21]和 YANG 等[22]通过等直径球体颗粒模型计算的结果表明:球体颗粒间可能在接触角小于 40°时就发生斥水现象,这与本文试验结果是一致的。除接触角外,土颗粒的几何形态对土壤亲水和斥水性质也有重要影响,在斥水性砂土中加入黏土颗粒可以明显改善土壤的斥水性[23]。

滴水入渗试验结果表明:随着含水率的增大,土壤的斥水性会减小甚至消失。一般情况下,天然土壤随着深度的增加,含水率是不断增大的,直到进入饱和区。因此,孔隙水与土颗粒的接触角主要对水封闭和双开敞状态下的非饱和土产生影响,特别是处于水封闭状态下的土层,可能存在基质吸力消失的情况。

3.2 斥水性土壤中的保水性

斥水性土壤带来负面影响的同时,也有其有益的一面。如:土壤斥水性可以增强土壤团聚体的稳定性,保持土壤中的有机碳含量[24-25]。很显然,当土壤处于水封闭状态时含水率要低于双开敞状态。通过前面的试验可知,亲水性土壤表层水封闭土层的厚度要明显大于斥水性土壤。这表明,虽然斥水性土壤阻止了地表水的入渗,但同时也能很好地保

持土壤中的原有含水率，减少土壤水分的蒸发量，这也可以视为斥水性土壤的有益面。

3.3　颗粒模型与孔隙模型

各种理想模型为土壤中基质吸力计算及水分迁移分析提供了方便，然而各模型的适用范围至今也没有明确的限定。就模型的几何形态而言，球体颗粒模型（图 6a）更适合比表面积较小的砂土或粉土，片状颗粒模型（图 6b）则更符合黏土颗粒的特性，由于模型中土颗粒由液桥连接，所以两种模型应该对应于水封闭状态。孔隙模型（图 6c、6d）适合于各种类型的土壤，然而其几何形态对应于双开敞状态更为恰当。

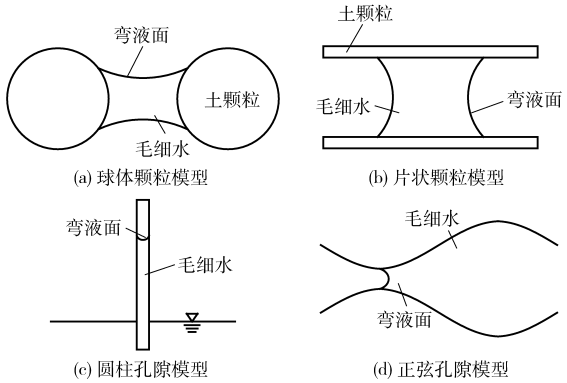

图 6　理想颗粒模型与孔隙模型

Fig. 6　Ideal particle models and pore models

现有文献中并没有严格按照孔隙水-气形态来选择模型，通过理想球体颗粒模型和孔隙模型建立的土水特征曲线都能得到试验的验证。当然，前提是假设土颗粒与孔隙水接触角很小或者直接假设为零。当接触角较大时，通过前面的试验可知：土壤在水封闭状态为斥水，基质吸力为零，而随着含水率的增大，土壤进入双开敞状态，此时基质吸力又会出现。当土颗粒与孔隙水的接触角较大时，需要根据不同的水-气形态选择相适应的模型。

3.4　斥水性土壤的临界含水率

由土水特性曲线可知，含水率越小土壤的基质吸力越大。然而，当土壤斥水性增大时，即使含水率很小，基质吸力也可能很小甚至消失。即：土壤中不存在负的孔隙水压力。因此，可以通过计算基质吸力来反映“吸引”与“排斥”[26]。本文试验用土为比表面积较小的壤质砂土，当其处于水封闭状态时用颗粒模型描述更为恰当，取土颗粒间的液桥作为研究对象，如图 7a 所示，由 Young－Laplace 方程可知，基质吸力 φ 为

$$\varphi = \gamma\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) \tag{1}$$

式中　γ——液体的表面张力

r_1、r_2——任意一对相互垂直的平面在液面上所截取曲线的曲率半径

当曲率中心在液体侧时 r_1、r_2 为“负”，反之为“正”。设 φ 为“正”时表示吸引、亲水，φ 为“负”时表示排斥、斥水。接触角越小，则 r_1 越小，φ 越大，土壤的亲水性就越好。当接触角增大后，r_1 迅速增大，而 r_2 仍然维持在较小值，此时 φ 为负，土壤是斥水的，且接触角越大斥水性越强，但基质吸力由正变负所对应的接触角显然小于 90°。

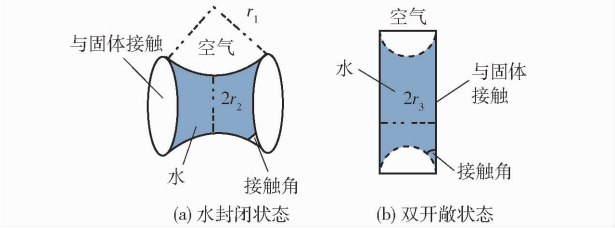

图 7　不同水-气状态下的孔隙水

Fig. 7　Pore water with different pore water－air configurations

土壤中的含水率增大，土中水-气形态将由水封闭变为双开敞，此时应当选用毛细管模型，双开敞中的孔隙水形态如图 7b 所示。基质吸力 φ 为

$$\varphi = \gamma\frac{2}{r_3} \tag{2}$$

式中　r_3——毛细管半径

此时水-气交界面严格遵循表面力学中的定义，接触角小于 90°亲水，接触角大于 90°斥水，因为当接触角小于 90°时，弯液面的任意曲率中心都是在空气一侧，φ 为“正”。当接触角大于 90°，弯液面的任意曲率中心都是在液体一侧，因此 φ 为“负”。

由此可见，当斥水性土壤由水封闭变为双开敞时，土壤随之由斥水变为亲水，这是因为在此过程中水-气交界面在液体侧的曲率中心消失（接触角小于 90°），气-液界面引起的基质吸力恒为“正”。当然，这种解释只适用于固-液接触角不变的情况。

4　结论

（1）非饱和砂土中土颗粒与孔隙水的接触角增大会使包气带中水封闭土层厚度减小，但接触角增大到一定值后，水封闭土层的厚度就基本保持不变。接触角对试样双开敞状态转变为气封闭状态时的饱和度影响不大，但随着接触角的增大，气封闭层的厚度不断减小。

（2）非饱和砂土中接触角小于 90°甚至降低至 36°也会出现明显的斥水现象，但随着砂土中饱和度的增大，砂土的斥水性消失，斥水与亲水转化时对应的饱和度与水封闭向双开敞转化时对应的饱和度基本相同。

（3）采用理想模型对土壤的微观特性进行研究时，如果非饱和砂土中接触角较大，需要根据土壤中不同的水-气形态选择相应的理想模型。

(4)土壤由斥水向亲水转化时对应的饱和度与水封闭向双开敞对应的饱和度基本一致,通过理想模型对两种不同状态下土壤的基质吸力变化分析可以发现,产生这种现象是因为当土壤由水封闭变为双开敞时,水-气交界面在液体侧的曲率中心消失(接触角小于 90°),气-液界面引起的基质吸力恒为“正”。

参 考 文 献

1 俞培基,陈愈炯. 非饱和土的水-气形态及其与力学性质的关系[J]. 水利学报,1965(1):16 - 23.
YU Peiji, CHEN Yujiong. Water-air patterns and mechanics properties of unsaturated soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1965(1):16 - 23.

2 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

3 CZACHOR H, DOERR S H, LICHNER L. Water retention of repellent and subcritical repellent soils: new insights from model and experimental investigations[J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(1):104 - 111.

4 巨娟丽, 李毅, 宋红阳,等. $CaCl_2$溶液灌溉对土壤水盐与斥水性分布的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10):159 - 166. http://www.j-csam.org/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20141025&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298. 2014.10.025.
JU Juanli, LI Yi, SONG Hongyang, et al. Effects of $CaCl_2$ solution irrigation on distributions of soil water, salt and water repellency[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):159 - 166. (in Chinese)

5 WOCHE S K, GOEBEL M O, KIKHAM M B, et al. Contact angle of soils as affected by depty, texture, and land management [J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56(2):239 - 251.

6 REGALADO C M, RITTER A. Characterizing water dependent soil repellency with minimal parameter requirement[J]. Soil Science Society of America, 2005, 69(6):1955 - 1966.

7 VOGELMANN E S, REICHERT J M, PREVEDELL J, et al. Threshold water content beyond which hydrophobic soils become hydrophilic: the role of soil texture and organic matter content[J]. Geoderma, 2013, 209 - 210:177 - 187.

8 BLACKWELL P S. Management of water repellency in Australia, and risks associated with preferential flow, pesticide concentration and leaching[J]. Journal of Hydrology, 2000, 231 - 232(231):384 - 395.

9 陈俊英, 吴普特, 张智韬,等. 土壤斥水性对含水率的响应模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(1):63 - 67. http://www.j-csam.org/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20120113&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298. 2012.01.013.
CHEN Junying, WU Pute, ZHANG Zhitao, et al. Response models for soil water repellency and soil moisture [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1):63 - 67. (in Chinese)

10 TAUMER K, STOFFREGEN H, WESSOLET G. Determination of repellency distribution using soil organic matter and water content[J]. Geoderma, 2005, 125(1 - 2):107 - 115.

11 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.
LUAN Maotian, LI Shunqun, YANG Qing. Matric suction and tension suction of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7):863 - 868. (in Chinese)

12 张昭,刘奉银,张国平,等. 不等径湿颗粒与液桥相互作用的微观水力特性[J]. 水利学报, 2013, 44(7):810 - 817.
ZHANG Zhao, LIU Fengyin, ZHANG Guoping, et al. Microscopic hydraulic behavior from the interactions between uneven-sized wet particles and liquid bridge[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7):810 - 817. (in Chinese)

13 张昭,刘奉银,齐吉琳,等. 粗颗粒间液桥毛细力演化规律的动态计算方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2263 - 2270.
ZHANG Zhao, LIU Fengyin, QI Jilin, et al. A dynamic calculation method for evolution law of capillarity forces of liquid bridge between coarse particles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2263 - 2270. (in Chinese)

14 杨松, 吴珺华, 董红艳,等. 砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2):421 - 426.
YANG Song, WU Junhua, DONG Hongyan, et al. Effects of particle differences between sands and clay on soil water repellency [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(2): 421 - 426. (in Chinese)

15 FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521 - 532.

16 RUSSELL A R, BUZZI O. A fractal basis for soil-water characteristics curves with hydraulic hysteresis[J]. Géotechnique, 2012, 62(3):269 - 274.

17 CZACHOR H. Modelling the effect of pore structure and wetting angles on capillary rise in soils having different wettabilities[J]. Journal of Hydrology, 2006, 328(328):604 - 613.

18 GUARRACINO L, ROTTING T, CARRERA J. A fractal model to describe the evolution of multiphase flow properties during mineral dissolution[J]. Advances in Water Resources, 2013, 67(4):78 - 86.

19 许兆义. 包气带的水分分布特征及给水度的探讨[J]. 长春地质学院学报, 1986(3): 89 - 94.
XU Zhaoyi. Feature of the moisture disturbution in aeration zone and specific yield[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1986(3): 89 - 94. (in Chinese)

20 SHIRTCLIFFE N J, MCHALE G, NEWTON M I, et al. Critical conditions for the wetting of soils[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(9):094101.

21 LIKOS W J, LU N. Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(6):646 - 655.

22 YANG S, LU T H. Study of soil-water characteristic curve using microscopic spherical particle model[J]. Pedosphere, 2012, 22(1):103 - 111.

23 LEELAMANIE D A L, KARUBE J, YOSHIDA A. Clay effects on the contact angle and water drop penetration time of model soils [J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2010, 56(3):371 - 375.

24 MATAIX-SOLERA J, DOERR S H. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in southeastern Spain[J]. Geoderma, 2004, 118(1 - 2):77 - 88.

25 SPACCINI R, PICCOLO A, CONTE P, et al. Increased soil organic carbon sequestration through hydrophobic protection by humic substances. [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 34(12):1839 - 1851.

26 LIKOS W J, LU N. Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2004, 130(6):646 - 655.