

干湿循环对土壤斥水性的影响^①

杨 松 , 王 磊 , 周明凯 , 马泽慧 , 李 铭

(云南农业大学水利学院 , 昆明 650201)

摘要: 处于地表的各类土壤总是处于不断的干湿循环过程, 土壤性质也会因此而发生改变。本文通过试验对干湿循环过程中斥水性土壤的“斥水-亲水”特性展开研究, 试验结果表明: 干湿循环对斥水性土壤的接触角及斥水性有重要影响。在干湿循环过程中, 增湿时的初始状态不同则其初始接触角会发生变化, 土壤斥水性对初始状态的敏感性随着黏粒含量的增加而增大。干湿循环开始时, 土壤越干则初始接触角越大。当黏土和黏壤土试样含水量减小时, 增湿或脱湿过程中滴水穿透时间(water drop penetration time, WDPT)先增加后减小, 在某一时刻达到峰值, 试样含水量相同时, 脱湿过程所对应的WDPT要明显小于增湿过程, 两种类型的土样在干湿循环中均没有临界含水量。随着含水量的降低, 壤质砂土的WDPT是不断增加的, 且干湿循环过程中斥水性砂土并没有出现峰值, 存在明显的临界含水量。

关键词: 斥水性 ; 接触角 ; 干湿循环 ; WDPT ; 躺滴法

中图分类号: S147.2 **文献标识码:** A

处于地表的土层由于各种因素的影响, 其斥水性可能会发生改变。土壤斥水性会导致土壤中水分分布不均匀, 增加地表径流, 斥水性土壤中还可能产生优先流从而增加地下水污染的风险等^[1-5]。当由亲水矿物组成的土壤颗粒被有机物覆盖或有机物颗粒混合到亲水的土壤中都有可能造成土壤斥水, 如: 植物燃烧后, 草木灰和一些有机化合物通过蒸发、冷凝过程的传递机制, 最终凝结到土壤颗粒上并因此造成土壤斥水^[6]。用废水或再生水对农作物进行灌溉时, 水中的残留物由于土壤的过滤作用而停留在土壤表层, 并可能因此造成土壤斥水^[7-8]。影响土壤斥水性的因素很多, 酸性土壤相对于碱性土壤更容易产生斥水性, 通过在酸性土壤中加入石灰可以很好地降低土壤的斥水性^[9]。相同的接触角(contact angle, CA)下, 砂土比黏土的斥水性更大, 因此可以通过在斥水性砂土中加入黏土的方法来改善其斥水性^[10-11]。很多情况下, 随着土壤含水量增大, 土壤的斥水性会降低甚至消失, 然而其机理目前并没有统一论^[12]。

连续固体物质可以通过接触角的大小来反映固体表面的浸润性, 当接触角小于90°时为亲水, 当接触角大于90°时为斥水。然而, 对于土壤颗粒, 即使接触角小于90°也会出现明显的斥水现象, Shirtcliffe等^[13]把土颗粒简化为理想的等直径球体颗粒, 并在球体颗粒

紧密堆积的基础上计算出了土壤湿润时的接触角大概为50°。Yang和Lu^[14]及杨松等^[15]通过计算土颗粒间的毛细力给出了理想状态下亲水与斥水的接触角变化区间。虽然不能以一个确定的接触角大小来衡量土壤的亲水或斥水性, 但接触角越大土壤的斥水性就越强, 因此接触角仍然被广泛用于评价土壤的斥水性^[16-17]。测量土壤接触角的方法主要有3种: 躺滴法、毛细上升法和Wilhelmy平板法。其中, 躺滴法所测出的是液体处于亚稳定状态的表观接触角; 毛细上升法测出的是前进接触角, 且接触角要小于90°; Wilhelmy平板法测出的则是前进接触角或后退接触角^[16]。除用接触角来衡量土壤斥水性外, 滴水穿透时间(water drop penetration time, WDPT)法和酒精溶液入渗(molarity of an ethanol droplet, MED)法由于操作简单且能迅速评价土壤的斥水等级而得到广泛应用^[18-19]。

表层土壤在自然环境中总是处于不断的干湿循环过程, 相同的基质吸力下土壤增湿和脱湿所对应的含水量是不同的, 即, 土水特征曲线(SWCC)存在明显的滞回效应, 接触角是造成滞回效应的主要原因之一。同时, 含水量和接触角都是影响土壤斥水性的关键因素, 那么干湿循环会对土壤的斥水性造成什么影响呢? 本文将就此展开讨论, 采用躺滴法和WDPT法对不同斥水程度的3种土壤在干湿循环过程中的

基金项目: 国家自然科学基金项目(41662021, 41867038)资助。

作者简介: 杨松(1982—), 男, 云南昆明人, 博士, 副教授, 主要从事农业水土工程方面的研究工作。E-mail: yscliff007@126.com

斥水特性展开研究，并对其机理进行分析，以为进一步认识土壤“斥水—亲水”转化本质提供相应的基础。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与试样制备

3种供试土壤分别取自云南昆明市郊不同的天然风化土坡，土壤风干碾碎后过2 mm筛备用。3种土壤的基本物理性质如表1所示。

表1 供试土壤的基本物理性质
Table 1 Basic physical indexes of tested soils

土壤质地	密度 (g/cm ³)	孔隙率 (%)	颗粒组成体积分数(%)		
			<2 μm	2~20 μm	20 μm
黏壤土	1.57	47	18.1	40.2	41.7
黏土	1.62	42	48.6	38.3	13.1
壤质砂土	1.45	51	0.8	7.8	91.4

1.2 土样接触角测量

用躺滴法对土样接触角进行测量。取长度为7.2 cm，宽度为2 cm左右的双面胶带粘贴到载玻片上，将配置好的斥水土壤颗粒均匀覆盖于载玻片上，再在土壤颗粒上加一个载玻片，并用质量为200 g的砝码压住载玻片，持续时间为2 min，移开砝码及土壤颗粒上的载玻片，反复轻轻磕碰下层载玻片以去除多余的土壤颗粒，直到胶带表面覆盖有一层薄薄的土壤颗粒，且土壤颗粒分布均匀无明显凸起。接触角测量在JC2000型接触角测量仪上进行。

为反映干湿循环对接触角测量结果的影响，设计如下试验方案：首先通过JC2000型接触角测量仪的自动加样器在待测试样表面注入体积为5 μl的液滴，测量接触角的大小(图1A)，记为： CA_d ；随后继续通过自动加样器使试样表面的液滴体积增大一倍，即液滴体积变为10 μl，保持周围环境不变，直到液滴完全蒸发(通过光学显微镜看不到液体)，在相同的位置再次注入体积为5 μl的液滴，测量接触角的大小(图1B)，记为 CA_w 。每个载玻片试样在5个不同的部位重复上述步骤，取平均值作为最后接触角的测量结果。 CA_d 对应于第1次干湿循环的初始接触角， CA_w 则反映了第2次干湿循环的初始接触角。

1.3 土样干湿循环过程中的WDPT测量

将混合十八胺后的土样制成环刀样，环刀的直径为61.8 mm，高20 mm，控制每种试样的干密度为1.2 g/cm³。制样前需预先根据土壤的风干质量含水量及击实筒(或环刀)体积计算出用土量(用土量要稍微多于计算值)，并加水搅拌均匀，将土样放入保湿箱

本研究通过在土壤中混合不同含量的十八胺来得到不同斥水程度的试验土样。配制试验土样前先将纯土在105 °C下烘干12 h，之后取出冷却，再在烘干土中加入十八胺并搅拌均匀。每种土样十八胺的加入量按占比土壤的质量分数计，分别为0.1%、0.2%和0.4%。本文用字母H、P、S分别代表黏壤土、黏土和壤质砂土，H0.1表示十八胺加入量为0.1%的黏壤土，其余符号以此类推。

内静置24 h后，黏壤土和黏土在击实筒内击实后用环刀取样，壤质砂土直接用环刀制样，并取剩余土样测其含水量。其中，黏壤土制样含水量为440 g/kg，黏土制样含水量为410 g/kg，壤质砂土的制样含水量为240 g/kg，由于制样含水量较高，3种试样制建成后不用进行饱和，直接进行脱湿试验。为保证相同的脱湿环境，试样脱湿采用低温烘干法，即将制好的试样放入烘箱，保持烘箱温度为50 °C，每隔15 min取出试样并进行称重，确定试样含水量，进行WDPT试验。WDPT试验的操作步骤为：用滴管在土样表面的不同位置滴上7滴去离子水(图2)，每个水滴体积约为30 μl，用秒表记录每个水滴完全渗入土样所用的时间，去掉1个最长时间和1个最短时间，取剩余5个时间的算术平均值即为土样在该状态下的WDPT。当土样烘干后含水量基本不变(连续两次含水量变化小于1 g/kg)时，试样脱湿试验结束。

脱湿试验结束后，将试样置于密封性良好的保鲜盒中，均匀喷洒去离子水于土样表面，每次喷水量约为5 ml，之后将保鲜盒密封静置2 h，后取出土样称重，确定试样含水量，进行WDPT试验，试验步骤和脱湿过程一致。

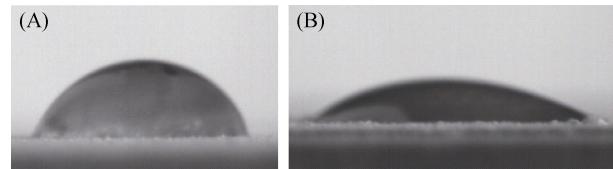


图1 P0.1试样的 CA_d 和 CA_w
Fig. 1 Contact angles of CA_d and CA_w of tested soil samples at P0.1



图 2 P0.4 试样的 WDPT 测量试验
Fig. 2 Test of WDPT at P0.4

2 结果与分析

2.1 土壤的初始接触角

用躺滴法测量土壤颗粒初始接触角的试验结果

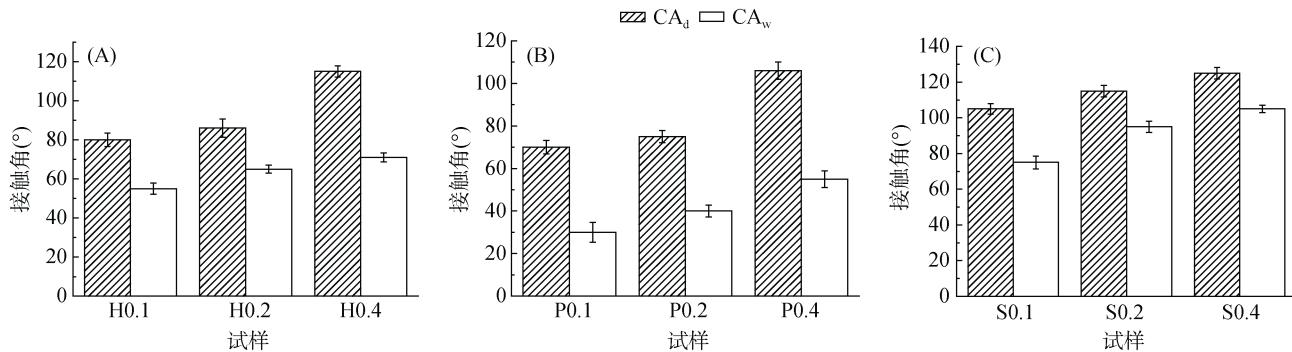


图 3 不同土样的 CA_d 和 CA_w
Fig. 3 CA_d and CA_w of tested soil samples

2.2 土壤斥水性随干湿循环变化

干湿循环过程中不同斥水性土壤的 WDPT 试验结果如图 4 所示。图 4A 和图 4B 分别为黏壤土脱湿和增湿过程中的 WDPT，从图中可以看出，随着含水量的减小，增湿或脱湿过程中 WDPT 先增加后减小，在某一时刻达到峰值，当土样的含水量相同时，脱湿过程所对应的 WDPT 要明显大于增湿过程，以 H0.2 土样为例，H0.2 土样的初始接触角为 86° ，脱湿过程中，含水量为 300 g/kg 时对应的 WDPT 为最大值 72 s ，而增湿过程中含水量为 300 g/kg 对应的 WDPT 达到 1356 s ，远远大于脱湿过程所对应的 WDPT。黏壤土干湿循环中 WDPT 所表现出来的规律与黏壤土相似(图 4C、D)，但值得注意的是，同种土壤具有不同的初始接触角的土样，初始接触角越大并不能表明 WDPT 越长，如 P0.1 试样在脱湿过程中的峰值 WDPT 要长于 P0.2 和 P0.4，而脱湿过程中 P0.1、P0.2 和 P0.4 的 WDPT 都比较接近。

壤质砂土 WDPT 随含水量变化关系曲线与黏壤

如图 3 所示，不同类型的土壤，在不同的干燥状态(增湿的初始状态)其接触角不同。在图 3A 中，H0.1、H0.2 和 H0.4 试样的 CA_d 分别为： 80° 、 86° 、 115° ，而在试样的同一位置测量初始液滴完全蒸发后的土样接触角 CA_w 则分别减小为： 55° 、 65° 、 71° ；随着十八胺含量的增大， CA_d 和 CA_w 增大，相同十八胺含量的土样 CA_w 总是小于 CA_d 。另外两种土样也出现同样的规律(图 3B 和图 3C)。同一试样比较 CA_d 和 CA_w 的差值 ΔCA 可以发现，壤质砂土 3 个试样(S0.1、S0.2 和 S0.4) ΔCA 分别为： 20° 、 20° 、 30° ，而黏土 3 个试样(P0.1、P0.2、P0.4)的 ΔCA 则达到了： 52° 、 35° 、 40° ，黏壤土的 ΔCA 则介于二者之间。较大的 ΔCA 意味着较明显的接触角滞后，3 种土样最大的区别是黏粒含量，由此可见，黏粒含量越大的土壤 ΔCA 越大，对干湿循环的初始状态也越敏感。

土、黏土明显不同，如图 4E、F 所示，随着含水量的降低，壤质砂土 WDPT 不断增加，整个脱湿或增湿过程均没有出现峰值，即壤质砂土的含水量越小则斥水性越强。与黏土和黏壤土不同，当含水量小于某个值时，壤质砂土 WDPT 迅速增加，壤质砂土增湿或脱湿过程中存在明显的临界含水量。

3 讨论

3.1 干湿循环过程中土壤的接触角与斥水性

固体表面倾斜到一定角度时，其上的液滴会滑动，如图 5 所示，处于滑动液滴前端的固液接触角为前进接触角，此时固体被液体湿润，固体增湿。处于滑动液滴后端的固液接触角为后退接触角，此时液体从固体表面退出，固体脱湿。前进接触角对应于增湿，后退接触角对应于脱湿，前进接触角总大于后退接触角^[20]。然而，本研究通过躺滴法测出的土壤颗粒增湿和脱湿所对应的接触角却与此相反：增湿时的接触角小于脱湿时的接触角，由此可见，用前进接触角或

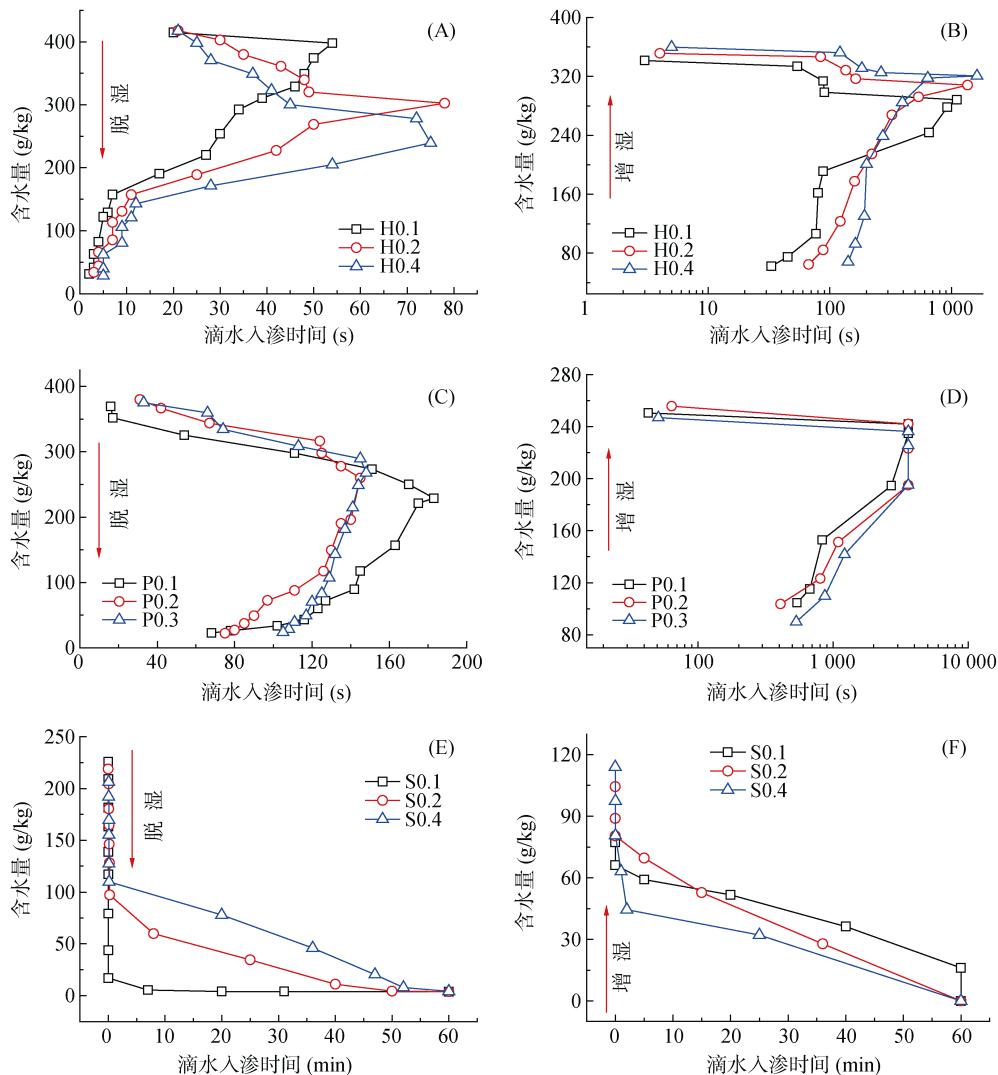


图4 干湿循环中 WDPT 随含水量变化关系曲线
Fig. 4 Change curves of WDPT with volumetric water content

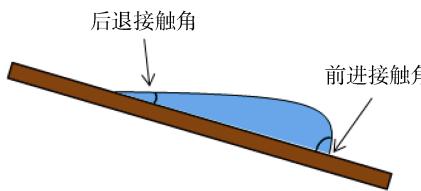


图5 固体表面的前进接触角和后退接触角
Fig. 5 Advancing and receding contact angles on solid surfaces

后退接触角来反映增湿或脱湿只适用于动态情况，即外力式增湿或外力式脱湿^[21]。自然界中的斥水性土壤，降雨后雨水很难入渗，其增湿方式应以凝结式增湿为主，脱湿则主要以蒸发式脱湿为主。斥水性土壤的增湿或脱湿并不能用动态接触角(前进接触角或后退接触角)来反映其斥水程度，其增湿或脱湿过程中所对应的接触角仍然是介于前进接触角和后退接触角间的表观接触角，因此用躺滴法在同一位置、不同的干湿循环状态下测出的接触角是不同的。

在干湿循环 WDPT 试验中，黏土和黏壤土土样均表现出了比较一致的规律：含水率相同时，增湿时 WDPT 要明显长于脱湿。这是因为干湿循环过程中土壤的含水量虽然相同，但其土壤水分分布形态却有很大的区别，通过喷水对斥水性土壤进行增湿，土壤含水量增加到一定值后就不再上升，增湿过程土壤含水量的升高是因为相对湿度上升，孔隙较小的毛细管先发生凝结，直到相对湿度不再升高，毛细凝结也就停止，所以增湿稳定时含水量远远小于土壤的饱和含水量。脱湿过程则与此相反，孔径较大的土壤孔隙先发生蒸发，因此增湿和脱湿过程含水量相同时，气孔隙水的分布情况是明显不同的，这也是造成干湿循环中 WDPT 出现明显区别的主要原因。

3.2 斥水性土壤的临界含水量

随着含水量增加，当含水量到达某一值后，斥水性土壤可能由斥水变为亲水，此时对应的含水量被称

为临界含水量。采用 WDPT 评价土壤斥水性，一般以 5 s 作为斥水和不斥水的分界点^[7]。通常情况下，随着含水量的增加，土壤斥水性是不断减小的，并且当含水量达到临界含水量时，土壤斥水性消失^[22-25]。但并不是所有的土壤都会表现出随含水量减小斥水性不断增加^[26]。本文试验中黏壤土和黏土在干湿循环中，其斥水性都出现了峰值，而壤质砂土则符合随含水量降低斥水性不断增大的一般规律。事实上，在相同的固-液接触角下，土壤颗粒接近于球状的土壤其斥水性要比以片状土壤颗粒为主的土壤斥水性更强。因此，土壤质地是影响土壤斥水性的一个重要因素。

4 结论

1) 土壤干湿循环过程中，不同干燥状态(增湿的初始状态)对应不同的初始接触角，黏粒含量越多的土壤对干燥状态越敏感，土壤初始状态越干则初始接触角越大。

2) 当黏土和黏壤土含水量减小时，增湿或脱湿过程中 WDPT 先增加后减小，在某一时刻达到峰值，试样含水量相同时，脱湿过程所对应的 WDPT 要明显小于增湿过程，两种类型的土样在干湿循环中均没有临界含水量。

3) 随着含水量的降低，壤质砂土的 WDPT 是不断增加的，整个脱湿或增湿过程均没有出现峰值，壤质砂土的含水量越小则斥水性越强。与黏土和黏壤土不同，当含水量小于某个值时，壤质砂土 WDPT 迅速增加，壤质砂土增湿或脱湿过程中存在明显的临界含水量。

参考文献：

- [1] 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: 104–111
- [2] 李贺丽, 李怀恩, 王智, 等. 多孔介质中指流的研究综述及展望[J]. 土壤, 2008, 40(1): 27–33
- [3] Ramirez-Flores J, Woche S K, Bachmann J, et al. Comparing capillary rise contact angles of soil aggregates and homogenized soil[J]. Geoderma, 2008, 146: 336–343
- [4] Woche S K, Goebel M O, Kikham M B, et al. Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management[J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56(2): 239–251
- [5] 徐宗恒, 徐则民, 曹军尉, 等. 土壤优先流研究现状与发展趋势[J]. 土壤, 2012, 44(6): 905–916
- [6] Doerr S H, Shakesby R A, Blake W H, et al. Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response[J]. Journal of Hydrology, 2006, 319(1/2/3/4): 295–311
- [7] 商艳玲, 李毅, 朱德兰. 再生水灌溉对土壤斥水性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 89–97
- [8] 刘春成, 李毅, 郭丽俊, 等. 微咸水灌溉对斥水土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 39–45
- [9] Müller K, Deurer M. Review of the remediation strategies for soil water repellency[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2011, 144(1): 208–221
- [10] 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 and Plant Nutrition, 2010, 56(3): 371–375
- [11] Dlapa P, Doerr S H, Lichner L, et al. Effect of kaolinite and Ca-montmorillonite on the alleviation of soil water repellency[J]. Plant, Soil and Environment, 2004, 50(8): 358–363
- [12] 孙棋棋, 刘前进, 于兴修, 等. 沂蒙山区桃园棕壤斥水性对理化性质的空间响应[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 648–655
- [13] Shirtcliffe N, McHale G, Newton M I, et al. Critical conditions for the wetting of soils[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89: 94–101
- [14] Yang S, Lu T H. Study of soil-water characteristic curve using microscopic spherical particle model[J]. Pedosphere, 2012, 22(1): 103–111
- [15] 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): 145–150
- [16] 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
- [17] Diehl D. ChemInform abstract: Soil water repellency: Dynamics of heterogeneous surfaces[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2013, 432(38): 8–18
- [18] 张培培, 赵允格, 王媛, 等. 黄土高原丘陵区生物结皮土壤的斥水性[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 657–663
- [19] 王亦尘, 李毅, 肖珍珍. 玛纳斯河流域土壤斥水性及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3769–3776
- [20] 沈钟, 赵振国, 康万利. 胶体与表面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012
- [21] 杨松, 吴珺华, 黄剑峰, 等. 接触角对张力计及轴平移技术测量非饱和土吸力的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(s1): 3331–3336
- [22] Doerr S H, Thomas A D. The role of soil moisture in controlling water repellency: New evidence from forest soils in Portugal[J]. Journal of Hydrology, 2000, 231(SI): 134–147
- [23] Gimeno E. Water repellency and moisture content spatial variations under *Rosmarinus officinalis* and *Quercus coccifera* in a Mediterranean burned soil[J]. Catena, 2011, 85(1): 48–57

- [24] Chau H W, Biswas A, Vujanovic V, et al. Relationship between the severity, persistence of soil water repellency and the critical soil water content in water repellent soils[J]. Geoderma, 2014, 221: 113–120
- [25] Vogelmann E S, Reichert J M, Prevedello J, et al. Threshold water content beyond which hydrophobic soils become hydrophilic: The role of soil texture and organic matter content[J]. Geoderma, 2013, 209:177–187
- [26] Goebel M, Bachmann J, Woche S K, et al. Water potential and aggregate size effects on contact angle and surface energy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(2): 383–393

Effect of Drying-Wetting Cycles on Soil Water Repellency

YANG Song, WANG Lei, ZHOU Mingkai, MA Zehui, LI Ming

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

Abstract: On the earth's surface, all kinds of soils are always in continuous drying-wetting cycles, which can result in the changes of soil properties. An experiment was conducted to study the repellent - hydrophilic characteristics of repellent soils in drying-wetting cycles. The results showed that drying-wetting cycles had important impacts on soil-water contact angle and hydrophobicity. When the soil is in drying or wetting, different initial states caused different contact angles. As clay particles increasing, the susceptibility of soil repellency increased to initial states. At the beginning of drying-wetting cycle, the drier sample usually corresponded to the higher contact angle. As water content decreased in loam or clay soil samples in drying-wetting cycle, the WDPT increased and then decreased, and reached the maximum at a certain water content. Under the same water content, the WDPT in drying was significantly lower than that in wetting, there was no threshold water content in the two soil samples. But the WDPT of sand soil samples increased with water content decreasing, no peak appeared in the drying-wetting cycle, and had obvious critical water content.

Key words: Water repellent soil; Contact angle; Drying-wetting cycles; WDPT; Sessile drop method