

doi:10.3799/dqkx.2011.078

# 石油污染多孔介质湿润性变异特征

梁春, 郑西来\*, 张俊杰

中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东青岛 266100

**摘要:** 一定程度的石油污染可使多孔介质的湿润性发生变异, 导致介质持水能力降低、地下水石油污染、粮食产量品质下降等。采用滴水穿透时间与酒精溶液入渗法, 测定了亚粘土和粗砂在不同柴油、机油含量下的斥水水平, 确定了亚粘土、粗砂由亲水表面变为疏水表面的临界含油量。结果表明, 亚粘土、粗砂湿润性变异的临界机油含量分别约为 7%、0.5%, 粗砂湿润性变异的临界柴油含量约为 14%, 而柴油污染对亚粘土湿润性的影响不显著。另外, 当石油污染多孔介质的含水量达到某一临界值时, 湿润性将再次发生反转, 由疏水表面变回亲水表面。测得机油、柴油污染粗砂的临界含水量约在 0.2%~1% 之间, 机油污染亚粘土的临界含水量在数值上与其含油量近似相等。

**关键词:** 石油污染多孔介质; 湿润性; 斥水性; 污染控制; 环境工程。

中图分类号: X53

文章编号: 1000-2383(2011)04-0765-06

收稿日期: 2010-11-09

## Characteristics of Wettability Variation of Oil-Contaminated Porous Medium

LIANG Chun, ZHENG Xi-lai\*, ZHANG Jun-jie

Key Laboratory of Ocean Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

**Abstract:** A certain degree of oil pollution can lead to wettability variation in porous medium, which can bring about low water-holding capacity, oil contamination of groundwater, low food quality and production. In this study, water repellency of sand and clay was measured by WDPT and MED methods under different diesel and engine oil contents. Critical oil content of porous media in oil-contaminated porous media was determined preliminarily, beyond which hydrophilic surface could change into hydrophobic surface. The results show that critical oil contents of clay and sand contaminated by engine oil are about 7% and 0.5% respectively. Critical oil content of sand contaminated by diesel is about 14%, while diesel doesn't have remarkable effect on water repellency. In addition, when water content increases to a critical value, wettability of oil-contaminated porous medium will reverse again. Critical water contents of sand contaminated by engine oil and diesel are both between 0.2%—1%, while critical water content of clay contaminated by engine oil is approximately equal to its oil content in value.

**Key words:** oil-contaminated porous medium; wettability; water repellency; pollution control; environmental engineering.

斥水性是指水分不能或很难湿润多孔介质颗粒表面的物理现象, 可反映出多孔介质表面的润湿程度。天然多孔介质多以硅酸盐、碳酸盐矿物为主, 在表面洁净的情况下, 通常具有亲水性, 但润湿程度不尽相同。近年来, 世界各地发现大量斥水性土壤, 荷兰约有 75% 农业土壤表层显示中等以上斥水性 (Van Dam *et al.*, 1990), 澳大利亚也大约有 1/3 的耕地由于斥水性而减产 (杨邦杰等, 1996)。强烈的土壤斥水性非常不利于农业生产和环境的可持续发展。斥水性的存在会使降雨仅能湿润表层薄层土壤

(0.001~0.01 m), 或是形成不规则入渗的水分“指状分布” (杨邦杰等, 1996), 由此导致土壤持水能力降低, 地表径流和侵蚀加强, 土壤水分分布不均匀, 水中溶质很快渗入地下水等 (Nieber *et al.*, 2000; Jarvis *et al.*, 2008)。

自然界中, 斥水性主要是一些带有长链的、具有斥水性的有机化合物吸附在土壤颗粒表面, 或填充在多孔介质的孔隙中而引起的 (Doerr *et al.*, 2000; McKissoc *et al.*, 2000; Thwaites *et al.*, 2006), 这类有机化合物主要来源于植物的腐败分解、土壤有

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40872150)。

作者简介: 梁春 (1983-), 女, 博士生, 主要从事地下水污染控制、水资源利用与保护方面研究。\* 通讯作者: 郑西来, E-mail: zhxilai@ouc.edu.cn

机质的分解、植物根分泌物、真菌残留物、树脂、土壤微生物等 (McKissoc *et al.*, 2000; Thwaites *et al.*, 2006). 研究表明, 植物枝叶在森林表土层中腐败分解后, 会在土壤颗粒表面形成类似蜡质的斥水层, 但随着温度和湿度的升高, 斥水性会逐渐降低 (Simkovic *et al.*, 2008). 高强度的持续森林火灾也会导致土壤产生相应的斥水性, 引起土壤侵蚀、泥石流等灾害 (Tessler *et al.*, 2008).

除了以上自然原因可使土壤产生斥水性, 还有不容忽视的人为因素会导致土壤产生斥水性, 主要是人类生产、生活行为对环境的污染. 资料显示, 长期进行污水回灌会导致土壤斥水性的提高, 即使是回灌处理后的污水, 多年后灌点周围表层土壤的斥水性也会显著提高, 使得灌溉效率大大降低. 陈俊英等 (2009) 研究了 8 种不同污染程度的灌溉用水对原状土壤斥水性的影响, 发现污水中的有机质含量是影响土壤斥水性的最主要因素. Travis *et al.* (2008) 也发现, 灌溉回用污水中的油类污染物对土壤斥水性具有很大的影响, 应该引起人们的关注. Quayum *et al.* (2002) 发现当原油污染土壤的含水率超过某一临界值时, 污染土壤可再次改变为亲水性. 已有研究表明, 油类有机污染物对土壤斥水性具有极其重要的影响. 当前, 世界各地对石油的需求与日俱增, 抛洒泄露的石油和长期的石油污水灌溉将不可避免地使土壤产生不同程度的斥水性, 导致其持水能力降低、粮食产量和品质下降 (郑西来等, 2000, 2004). 但目前, 国内外研究还大多集中在无污染土壤斥水性的理论机理、测定方法、数值模型等方面, 仅有国外学者在污水灌溉和原油污染对土壤斥水性的影响方面有部分研究, 国内在该方面的相关研究也鲜有报道.

本研究以粗砂、亚粘土作为代表性多孔介质, 以柴油、机油作为代表性石油制品, 采用滴水穿透时间与酒精溶液入渗法, 测定不同柴油、机油含量下亚粘土和粗砂的斥水性水平, 以此研究不同污染程度的石油污染多孔介质的湿润性变异特征, 探讨石油类污染物对多孔介质润湿性的作用机制, 为石油污染场地、石油污水灌区的斥水性土壤控制和修复提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

**1.1.1 多孔介质** 本试验以砂性土和粘性土作为

代表性多孔介质. 其中, 砂性土取自临淄区附近河床, 粘性土取自同一地区附近农田. 按照 SL 237-1999《土工试验规程》的要求, 对 2 种土样进行筛分. 根据地矿部 DT-92 规程中的土粒度分类, 砂土属于粗砂; 粘性土属于粉质亚粘土 (以下简称亚粘土). 供试土样的粒度组成与物理性质的测定结果见表 1.

**1.1.2 石油制品** 本试验以 CD15W-40 机油、0# 柴油作为代表性油品, 由齐鲁石化公司提供. 供试油品密度、粘滞系数、表面张力、界面张力的测定值见表 2.

**1.1.3 含油多孔介质的制备** 含油多孔介质在宏观上可分为均质和非均质. 由于在实际环境中不存在绝对的均质区, 因此可把非均质区视为若干理想均质子区的集合, 同一均质子区内各特性相同, 这样所有理想均值区的特征将反映出整体区域的综合特征, 具有更强的规律性. 因此, 本试验以理想均质含油多孔介质为研究对象. 首先, 称取一定质量的烘干后的多孔介质, 然后按含油率、含水量分别加入石油、水均匀混合而成. 多孔介质的含油率以油的质量在单位质量多孔介质干固体中所占的百分比表示. 多孔介质的含水量以水的质量在单位质量多孔介质干固体中所占的百分比表示. 柴油流动性好, 在制备过程中可直接与土样混合并搅拌均匀; 机油粘滞性较大, 与土样混合搅拌时可加入适量低沸点 (30~60℃) 石油醚.

### 1.2 测定方法

**1.2.1 酒精溶液入渗法 (MED)** 试验采用酒精溶液入渗法测定石油污染的多孔介质的斥水性水平. 该法是通过间接测定土壤表面液体表面张力来确定土壤斥水性, 反映土壤对水滴入渗的抵制程度 (Stefan, 1998; Letey *et al.*, 2000; Quayum *et al.*, 2002; 吴延磊等, 2007). 测定步骤如下: (1) 将供试含油土样按清洁干密度 (亚粘土 1.45 g/L、粗砂 1.60 g/L) 装入干净的玻璃培养皿中, 轻轻地平整土壤表面. (2) 配制体积分数分别为 0, 3%, 5%, 8.5%, 13%, 24% 和 36% 的酒精溶液. 试验过程中, 酒精溶液应在室温下储存且每周更换一次. (3) 用标准胶头滴管将 6 滴已知浓度的酒精水溶液 (约 0.05 mL) 滴到土样表面, 观察能否在 5 s 内渗入土壤. 酒精溶液按浓度由小到大的顺序逐个测试, 能使酒精溶液在 5 s 内渗入土样的最低的酒精浓度被作为该土样的 MED 值, 从而得到油污土样的斥水性描述与水平, 斥水性水平评价所采用标准 (Stefan,

表 1 供试多孔介质的粒径分布与物理性质

Table 1 Grain size distribution and physical properties for porous media samples

多孔介质	比重	比表面积 (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	各粒组含量(%)						工程分类
			2~1 (mm)	1~0.5 (mm)	0.5~0.25 (mm)	0.25~0.1 (mm)	0.1~0.075 (mm)	0.075~0.005 (mm)	
砂性土	2.66	4.69	17.4	45.3	27.9	8.1	0.3	1.0	粗砂
粘性土	2.70	31.57	0.6	0.3	0.2	0.7	75.6	22.6	粉质亚粘土

表 2 供试油品的基本性质

Table 2 Basic properties of diesel and engine oil

油品名称	密度 (g·cm <sup>-3</sup> )	粘滞系数 (mPa·s)	表面张力 (mN·m <sup>-1</sup> )	油-水界面张力 (mN·m <sup>-1</sup> )
0#柴油	0.848	3.56~4.05	27.8	19.0
CD15W-40 机油	0.878	404~444	31.2	24.5

表 3 酒精溶液入渗法的斥水性描述与水平标准

Table 3 Water repellency description and level standard of MED method

水平	斥水性描述	酒精溶液体积分数(%)
7	极端斥水	36
6	异常强烈斥水	24
5	强烈斥水	13
4	中度斥水	8.5
3	轻微斥水	5
2	亲水	3
1	异常亲水	0

1998)见表 3.

**1.2.2 滴水穿透时间法(WDPT)** 试验采用滴水穿透时间法测定使含油多孔介质斥水性消失的临界含水量.测定步骤如下(Letey *et al.*, 2000; McKissock *et al.*, 2000; Quyum *et al.*, 2002; Sonneveld *et al.*, 2003; 吴延磊等,2007):(1)配制不同含水率的含油土样,按清洁干密度(亚粘土 1.45 g/L、粗砂 1.60 g/L)装入干净的玻璃培养皿中.(2)用标准胶头滴管将 8 滴蒸馏水(每滴约 0.05 mL)滴到整平的土样表面,测定水滴渗入土壤所需要的时间,计算 8 滴蒸馏水入渗时间的算术平均值.对于相同含油率下的土样,使水滴穿透时间小于 5 s 的最低含水率,即为该油污土样在已知含油率下的临界含水量.

## 2 结果与讨论

### 2.1 含油量对多孔介质斥水性的影响

#### 2.1.1 含油亚粘土的斥水性变化 通过对不同机

表 4 不同机油含量下亚粘土的 MED 入渗时间

Table 4 Infiltration time in clay by MED method in the condition of different engine oil contents

多孔介质 含油率	不同体积分数的酒精溶液的入渗时间(s)						
	0	3%	5%	8.5%	13%	24%	36%
4%	1.82	1.63	1.31	1.12	0.95	0.66	0.52
6%	2.75	2.52	2.35	2.05	1.82	1.45	1.15
7%	4.51	4.34	4.03	3.65	3.12	2.41	2.14
7.25%	6.32	6.46	6.33	6.16	5.05	4.44	2.33
7.5%	6.54	6.74	7.45	6.82	6.75	4.81	2.43
8%	7.87	8.63	8.12	7.51	7.24	5.73	2.72
10%	34.21	27.61	25.23	17.52	17.53	11.23	3.44

表 5 不同机油含量下粗砂的 MED 入渗时间

Table 5 Infiltration time in sand by MED method in the condition of different engine oil contents

多孔介质 含油率	不同体积分数的酒精溶液的入渗时间(s)						
	0	3%	5%	8.5%	13%	24%	36%
0.5%	4.11	3.92	3.65	3.15	2.51	1.82	1.45
0.8%	13.54	13.13	12.82	12.52	11.11	4.33	4.33
1%	30.55	30.23	28.15	23.13	20.92	4.92	1.62
2%	40.13	37.22	33.92	30.62	24.11	5.12	1.81
4%	50.14	42.65	31.32	30.12	26.34	5.74	2.14

表 6 不同柴油含量下粗砂的 MED 入渗时间

Table 6 Infiltration time in sand by MED method in the condition of different diesel oil contents

多孔介质 含油率	不同体积分数的酒精溶液的入渗时间(s)						
	0	3%	5%	8.5%	13%	24%	36%
14%	4.82	4.64	4.13	3.82	3.15	2.67	2.15
16%	9.15	8.22	7.12	5.26	4.71	3.21	1.92
18%	14.15	13.81	13.34	12.91	5.34	4.33	2.18

油、柴油含量的风干亚粘土进行斥水性测定,发现只有机油污染可使亚粘土的斥水性发生明显改变,而柴油污染对亚粘土湿润性的影响不显著.

不同含油率下机油污染亚粘土的 MED 入渗时间(3 次重复试验均值)见表 4.从表中可以看出,当机油含量大于 7%时,水滴入渗时间超过 5 s,亚粘土逐渐产生斥水性;当机油含量达到 7.5%时,亚粘土的斥水性达到 6 级——异常强烈斥水;当机油含

量达到 8% 以上时,亚粘土的斥水性则达到 7 级——极端斥水。可见,机油污染可使亚粘土的亲水表面变为疏水表面,并产生强烈斥水性。随着机油含量的增加,亚粘土的斥水性显著提高。亚粘土产生斥水性的机油含量阈值约为 7%~8%。

**2.1.2 含油粗砂的斥水性变化** 通过测定不同机油、柴油含量的风干粗砂斥水性,发现机油和柴油污染均可使粗砂的斥水性发生显著改变。

不同机油含量粗砂的 MED 入渗时间(3 次重复试验均值)见表 5。数据显示,当粗砂中机油含量大于 0.5% 时,水滴入渗时间超过 5 s,表明介质的亲水表面开始产生疏水性,且随着机油含量的增大,粗砂斥水性愈发强烈。当机油含量为 1% 时,粗砂斥水性达到 6 级——异常强烈斥水;当机油含量为 2% 时,粗砂斥水性则达到 7 级——极端斥水。可见,随着粗砂中机油污染程度的提高,酒精水溶液入渗时间相应增加,斥水性逐渐提高。但与亚粘土相比,使砂土产生斥水性的含油量阈值大幅降低,仅为 0.5% 左右。也就是说,轻微机油污染即能导致粗砂产生较强烈的斥水性。分析其原因,主要是由于粗砂中大部分固体颗粒为石英,比表面积小,质地粗糙,本身易形成斥水层。当高黏度的机油进入砂土层后,大量高碳有机组分会吸附在砂土颗粒表面,使润性接触角增大,更易产生强烈斥水性。

不同柴油含量粗砂的 MED 入渗时间(3 次重复试验均值)见表 6。数据显示,当柴油含量大于 14% 时,水滴入渗时间超过 5 s,说明粗砂开始产生斥水性。当粗砂中柴油含量为 16% 时,斥水性即达到 6 级——异常强烈斥水;当粗砂中机油含量为 18% 时,斥水性达到 7 级——极端斥水,且随着柴油含量的继续增大,粗砂斥水性相应增强。可见,柴油污染也能导致粗砂产生斥水性,但与机油污染相比,柴油污染砂土产生斥水性的临界含油量大幅提高,约为 14%。分析其原因,可能是当含油量较低时,柴油主要吸附在粗砂颗粒表面,由于柴油密度和粘滞性较小,油水界面张力低,润湿接触角小,因而水相易从固体石英颗粒上驱替油相;而当含油量较大时,柴油主要以毛细态填充在介质孔隙中,对水的入渗具有较大的影响,从而产生一定程度的斥水性。

## 2.2 润湿反转的临界含水量确定

石油污染可使多孔介质产生不同程度的斥水性,但当多孔介质中的含水量达到某一临界值时,固体颗粒界面的润湿性可再次发生反转,由疏水表面变回亲水表面(Quyum *et al.*, 2002; 蒋平等,

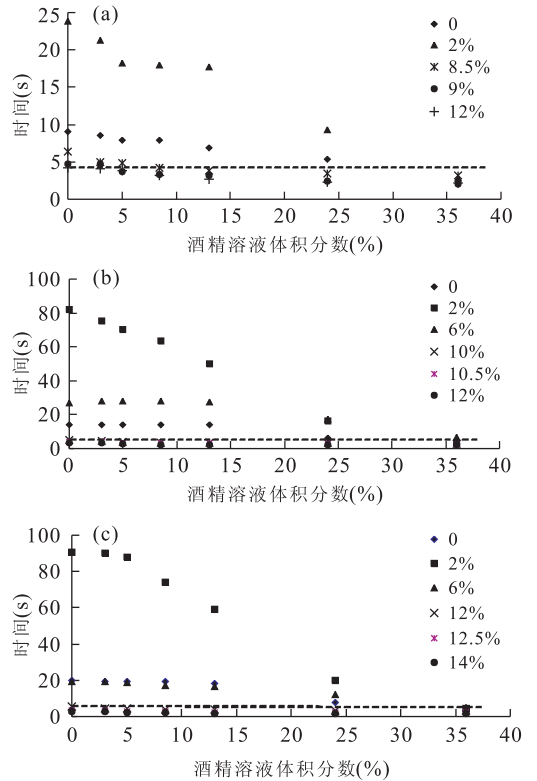


图 1 当亚粘土中机油含量分别为 8% (a)、10% (b)、12% (c) 时,不同含水率下的酒精水溶液入渗时间变化

Fig. 1 Infiltration time in clay by MED method under the condition of different water contents

2007),斥水性消失。

**2.2.1 含油亚粘土的临界含水量** 试验测得,当机油含量超过 7% 时,亚粘土将产生斥水性,因此选取机油含量为 8%、10% 和 12% 的亚粘土进行润湿性反转的临界含水量测定。

机油污染亚粘土在不同含水率下的 MED 入渗时间测定结果见图 1。从图中可以看出,机油含量为 8%、10% 和 12% 的风干亚粘土均具有较强斥水性,但随着污染土中含水率的增加,斥水性显著降低。当含水率极低时,油污亚粘土斥水性反而会比污染风干土时的强;当含水率继续提高到与含油率接近时,亚粘土斥水性则开始明显降低。不同含水率下机油污染亚粘土斥水性水平变化规律见图 2。如图所示,机油含量为 8%、10% 和 12% 的亚粘土,其润湿反转的临界含水量也分别为 8%、10% 和 12% 左右。由此可初步推测,机油污染亚粘土的临界含水量随含油率的升高而增大,且两者在数值上近似相等。

**2.2.2 含油粗砂的临界含水量** 当机油含量超过 0.5% 时,风干粗砂会产生斥水性,因此初步选取机油含量为 1%、2%、4% 的粗砂进行润湿反转的含水

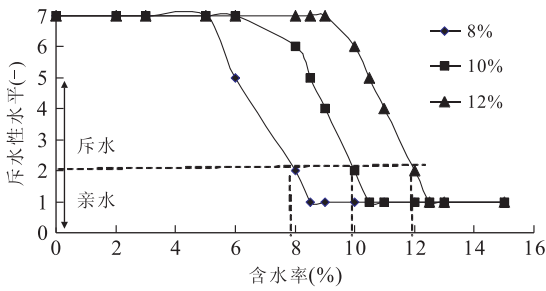


图 2 当亚粘土中机油含量分别为 8%、10%、12%时,不同含水率下机油污染亚粘土的斥水性水平变化曲线  
Fig. 2 Variation curve of water repellency level under the condition of different water contents

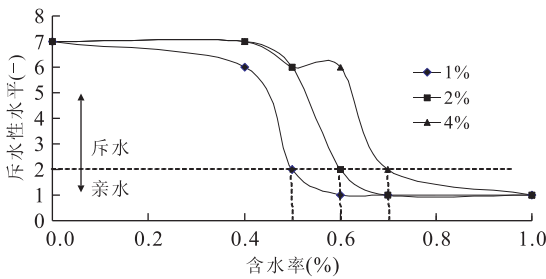


图 3 砂土中机油含量分别为 1%、2%、4%时,在不同含水率下的斥水性水平变化曲线  
Fig. 3 Variation curve of water repellency level under the condition of different water content

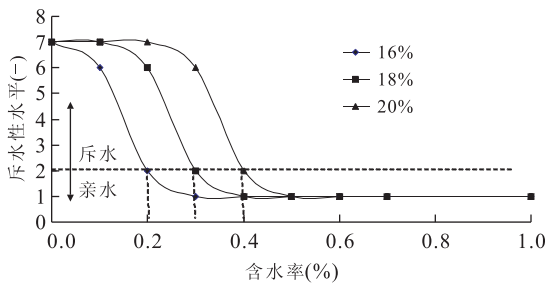


图 4 砂土中机油含量分别为 16%、18%、20%时,在不同含水率下的斥水性水平变化曲线  
Fig. 4 Variation curve of water repellency level under the condition of different water content

量阈值测定. 根据 MED 入渗时间测定结果,得到机油污染砂土在不同含水率下的斥水性评价结果,见图 3. 如图所示,随着含水率的增加,机油污染粗砂的斥水性逐渐降低. 当含水量分别达到 0.5%、0.6%、0.7%时,1%、2%、4%机油含量的粗砂斥水性消失,疏水表面变为亲水表面.

当柴油含量超过 14%时,风干粗砂会产生斥水性,因此初步选取柴油含量为 16%、18%和 20%的粗砂进行润湿反转的含水量阈值测定. 同样,根据

MED 入渗时间测定结果,得到柴油污染砂土在不同含水率下的斥水性等级(图 4). 如图所示,柴油污染粗砂的斥水性也随着含水率的增加而降低,当含水量分别达到 0.2%、0.3%和 0.4%时,16%、18%和 20%柴油含量的粗砂斥水性等级下降为 2—亲水.

可见,随着含水率增加,机油、柴油污染粗砂的斥水性都大幅降低. 虽然由机油、柴油污染导致粗砂产生斥水性的含油量阈值相差较大,但两者的润湿反转含水量阈值却非常接近,约在 0.1%~1%之间,相比机油亚粘土的水分阈值低得多.

### 3 结论

(1)一定程度的石油污染可导致多孔介质湿润性发生变异. 当多孔介质中的含油量达到临界值时,固体颗粒界面由亲水性变为疏水性,且随着含油量和油品黏度的增大,多孔介质的斥水性显著增强. 对于具有斥水性的石油污染的多孔介质,当多孔介质中的含水量达到某一临界值时,固体颗粒界面的润湿性可再次发生反转,由疏水表面变回亲水表面,斥水性消失.

(2)与亚粘土相比,石油污染对砂土湿润性的影响更为显著. 测得砂土湿润性变异的临界机油含量约为 0.5%,临界柴油含量约为 14%;亚粘土湿润性变异的临界机油含量约为 7%,而柴油污染对亚粘土湿润性没有显著影响.

(3)与亚粘土相比,含水量对油污砂土的湿润性影响更为显著,较低的含水量即可使介质固体的疏水表面变回亲水表面. 测得不同机油、柴油含量粗砂的临界含水量均约在 0.2%~1%之间;而机油污染亚粘土的临界含水量随含油率升高而增大,在数值上与该土中含油量近似相等.

### References

Chen, J. Y., Zhang, Z. T., Gillerman, L., et al., 2009. Effect of different contamination domestic waste water on soil water repellency. *Water Saving Irrigation*, 10: 13—16, 19 (in Chinese with English abstract).  
Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Walsh, R. P. D., 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51(1—4): 33—65. doi: 10. 1016/S0012—8252(00)00011—8  
Jarvis, N., Etana, A., Stagnitti, F., 2008. Water repellency, near-saturated infiltration and preferential solute trans-

- port in a macroporous clay soil. *Geoderma*, 143(3-4): 223-230.
- Jiang, P., Zhang, G. C., Ge, J. J., et al., 2007. Progress in the research of wettability reversal mechanism. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 22(6): 78-84 (in Chinese with English abstract).
- Letey, J., Carrillo, M. L. K., Pang, X. P., 2000. Approaches to characterize the degree of water repellency. *Journal of Hydrology*, 231-232: 61-65. doi:10.1016/S0022-1694(00)00183-9
- McKissock, I., Walker, E. L., Gilkes, R. J., et al., 2000. The influence of clay type on reduction of water repellency by applied clays: a review of some West Australian work. *Journal of Hydrology*, 231-232: 323-332. doi:10.1016/S0022-1694(00)00204-3
- Nieber, J. L., Bauters, T. W. J., Steenhuis, T. S., et al., 2000. Numerical simulation of experimental gravity-driven unstable flow in water repellent sand. *Journal of Hydrology*, 231-232: 295-307. doi:10.1016/S0022-1694(00)00202-X
- Quyum, A., Achari, G., Goodman, R. H., 2002. Effect of wetting and drying and dilution on moisture migration through oil contaminated hydrophobic soils. *The Science of the Total Environment*, 296(1-3): 77-87. doi:10.1016/S0048-9697(02)00046-3
- Simkovic, I., Dlapa, P., Doerr, S. H., et al., 2008. Thermal destruction of soil water repellency and associated changes to soil organic matter as observed by FTIR spectroscopy. *Catena*, 74(3): 205-211. doi:10.1016/j.catena.2008.03.003
- Sonneveld, M. P. W., Backx, M. A. H. M., Bouma, J., 2003. Simulation of soil water regimes including pedotransfer functions and land-use related preferential flow. *Geoderma*, 112(1-2): 97-110. doi:10.1016/S0016-7061(02)00298-7
- Stefan, H. D., 1998. On standardizing the 'water drop penetration time' and the 'molarity of an ethanol droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils. *Earth Surf. Process and Landforms*, 23(7): 663-668. doi:10.1002/(SICI)1096-9837(199807)
- Tessler, N., Wittenberg, L., Malkinson, D., et al., 2008. Fire effects and short-term changes in soil water repellency-Mt. Carmel, Israel. *Catena*, 74(3): 185-191. doi:10.1016/j.catena.2008.03.002
- Thwaites, L. A., de Rooij, G. H., Salzman, S., et al., 2006. Near-surface distributions of soil water and water repellency under three effluent irrigation schemes in a blue gum (*Eucalyptus globules*) plantation. *Agricultural Water Management*, 86(1-2): 212-219.
- Travis, M. J., Welsbrod, N., Gross, A., 2008. Accumulation of oil and grease in soils irrigated with grey water and their potential role in soil water repellency. *Sci. Total Environ.*, 394(1): 68-74. doi:10.1016/j.scitotenv.2008.01.004
- van Dam, J. C., Hendrickx, J. M. H., Van Ommen, H. C., et al., 1990. Water and solute movement in a coarse-textured water-repellent field soil. *Journal of Hydrology*, 120(1-4): 359-379. doi:10.1016/0022-1694(90)90159-U
- Wu, Y. L., Li, Z. Z., Gong, Y. S., 2007. Correlation of soil water repellency measurements from two typical methods. *Transactions of the CSAE*, 23(7): 8-13 (in Chinese with English abstract).
- Yang, B. J., Blackwell, P. S., Nicholson, D. F., 1996. Modeling heat and water movement in a water-repellent sandy soil. *Acta Pedologica Sinica*, 33(4): 351-359 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, X. L., Qiu, H. X., Jing, J., et al., 2000. Numerical modeling on elimination of oil-polluted soils in Shenyang-Fushun irrigation area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(5): 462-466 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, X. L., Wang, B. C., She, Z. L., et al., 2004. Theory and application research on oil contaminated soil-groundwater System. Geology Press, Beijing (in Chinese).

### 附中文参考文献

- 陈俊英, 张智韬, Gillerman, L., 等, 2009. 不同污染程度的水对土壤斥水性的影响. 节水灌溉, 10: 13-16, 19.
- 蒋平, 张贵才, 葛际江, 等, 2007. 润湿反转机理的研究进展. 西安石油大学学报(自然科学版), 22(6): 78-84.
- 吴延磊, 李子忠, 龚元石, 2007. 两种常用方法测定土壤斥水性结果的相关性研究. 农业工程学报, 23(7): 8-13.
- 杨邦杰, Blackwell, P. S., Nicholson, D. F., 1996. 斥水性土壤中的水热运动规律与数值模型. 土壤学报, 33(4): 351-359.
- 郑西来, 邱汉学, 荆静, 等, 2000. 沈抚灌区石油污染土壤恢复方案的数值模拟. 地球科学——中国地质大学学报, 25(5): 462-466.
- 郑西来, 王秉忱, 余宗莲, 2004. 土壤—地下水系统石油污染原理与应用研究. 北京: 地质出版社.