

文章编号:1672-3317(2017)09-0050-07

石油污染对土壤毛细水上升特性的影响

魏样^{1,2,3,4}, 王益权², 蔡苗^{1,3,4}, 赵磊¹, 朱坤¹

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 西安 710075; 4. 国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 西安 710075)

摘要:为了研究石油污染对不同土质毛细水上升高度、上升速率及毛细含水率的影响,采用室内土柱试验,研究了3种不同土质土壤(壤土、黄绵土和风沙土)在5个不同污染梯度(0%、0.5%、1%、2%和4%)下的毛细水上升规律。结果表明,3种土壤毛细水上升高度均随时间的延长而增加,且土壤毛细水上升高度与时间均符合良好的幂函数,但增幅均随时间的延长而减小;在相同上升时段内,未被污染的3种土壤毛细水上升高度均明显大于石油污染土壤,并且污染程度越高,毛细水上升高度越小;相同时间段,清洁土壤和0.5%含油率的土壤毛细水上升高度均表现为风沙土上升速率最快、黄绵土次之、壤土最慢,1%、2%和4%含油率的毛细水上升高度和上升速率变化趋势相同,均表现为黄绵土最大、壤土次之、风沙土最小;随着毛细水上升高度的增加,壤土、黄绵土、风沙土毛细水量均呈减小趋势,且毛细水量均随着污染程度的加剧而降低,土壤储水量和毛细水水量有着相同的变化趋势。

关键词:石油污染;毛细水;土壤

中图分类号:X53

文献标志码:A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2017.09.010

魏样,王益权,蔡苗,等. 石油污染对土壤毛细水上升特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(9): 50-56.

0 引言

石油是人类社会发展重要的能源和工业原料,石油和石油制品是发展社会经济和提高人民生活水平的重要物质基础。然而,在石油开采、冶炼、加工和运输的过程中,不可避免会造成石油的倾撒或泄漏,进而造成一定程度的环境污染。石油污染物落入土壤后会在毛细力和重力的作用下发生下渗,在土壤介质中经历物理、化学、生物等一系列过程,污染土壤的同时还可能进入地下水,进一步扩大污染范围^[1]。

毛管水上升高度是土壤孔性、表面浸润性以及液体属性共同作用的结果,常被用作分析污染物在土壤中作用行为的有效手段之一。依据毛管理论,液体在土壤多孔介质中上升高度既受土壤基质毛管孔隙属性影响,也受土壤溶液属性的影响。土壤毛细水上升高度受土壤矿物组成、颗粒级配、有机质量等多种因素的影响。一般来说,土壤颗粒越细,毛细水上升高度越大。近年来,国内外科研工作者在毛细水上升机理方面做了大量研究工作,提出了用以估算年内到达根区毛细水上升量及区域实际蒸散量的HPTF方程^[2];开展了颗粒级配对毛细水上升影响方面的研究^[3];研究了高矿化度对不同土质毛细水上升的影响^[4-5];通过估算土壤转移函数和测量水力参数,利用SIMWASER模型评价潜水毛细水上升高度^[6]。有学者研究了均质土壤毛细水上升高度、上升速率和地下水补给量之间的关系^[7-8],另有科研工作者对不同土壤剖面构型的毛细水上升规律进行了研究^[9-10]。这些研究工作取得了很多具有实用价值的研究成果,但是石油污染对土壤毛细水上升影响方面的研究却仅有个别报道。国内,开展了柴油污染对土壤毛细水上升规律研究^[11]以及石油污染含水介质毛细特性研究^[12]。石油污染物进入土壤后,一方面会引起土壤有效孔隙度和渗透性减小^[13-15],一方面会导致土壤表面润湿性发生变异、引起土壤毛细力大幅度降低^[16-17],从而导致包气带毛细水稳定高度和赋水能

收稿日期:2016-11-23

基金项目:陕西省重点科技创新团队计划项目(2016KCT-23)

作者简介:魏样(1984-),女。硕士研究生,主要从事土地整治工程研究。E-mail: weiyang1120@126.com

通信作者:王益权(1957-),男。教授,博士生导师,博士,主要从事土壤物理及改良方面研究。E-mail: soilphysics@nwsuaf.edu.cn

力的降低^[12]。在农业生产中,毛细水是最有效的土壤水分,土质是控制毛细水上升的重要因素^[18],开展石油污染对不同质地土壤毛细水上升规律研究对于指导农田灌溉具有重要的指导意义。陕北是中国石油工业的发祥地,陕北延安地区已探明石油储量14亿t,榆林地区探明储量3.6亿t,原油开采过程中不可避免会造成一定程度的污染,故以陕北采油区的主要土壤类型黄绵土和风沙土为研究对象,同时以关中地区的壤土作为对照,通过人为设置不同污染梯度,探讨不同污染梯度对不同质地土壤毛细水上升的影响。

1 材料与方法

供试土壤分别取自陕西省渭南市、延安市和榆林市,采集未受污染地块的表层土壤,样品经自然风干、除杂、研碎、过2 mm筛后备用。供试土壤的土壤机械组成采用MS2000型激光粒度仪测定,结果见表1。试验石油取自延安油田,为油井开采的原油。

表1 供试土壤基本性质

土壤类型	取样地	粒级分数/%			土壤质地 (美国制)
		黏粒(0~2 μm)	粉粒(2~50 μm)	砂粒(50~2 000 μm)	
壤土	渭南	9.12	78.66	12.22	粉壤土
黄绵土	延安	8.28	81.44	10.28	粉壤土
风沙土	榆林	1.69	13.14	85.17	壤砂土

试验采用人工配置的理想均质石油污染土壤作为研究对象,称取相同质量的土壤样品,按照含油率加入石油充分拌匀,分别配置0%、0.5%、1%、2%、4%共5个污染梯度。各处理均按体积质量1.4 g/cm³填装于底部开有大小不一孔径的透明土柱中,分层均匀填装,每层填装完后表面用毛刷打毛,以保持层与层之间的连续性。填装完后浸入水位固定的水槽中,试验中由湿润锋位置判断毛细水上升高度,观测时间根据毛细水上升速度先密后疏。试验结束后,沿土柱高度分层取样,测定土样含水率。

采用Excel 2010进行数据处理,采用Origin85进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同污染梯度对毛细水上升的影响

石油污染土壤毛细水上升高度随时间的变化如图1所示。3种土壤毛细水上升高度均随时间的延长而增加,但增幅均随时间的延长而减小。在相同上升时段内,未被污染的3种土壤毛细水上升高度均明显大于石油污染土壤,并且污染越严重,毛细水上升高度越小。毛细水上升10 cm时,0%、0.5%、1%、2%和4%污染梯度的壤土分别耗时117、190、275、446和988 min,4%含油率的壤土毛细水上升10 cm消耗时间分别为0%、0.5%、1%和2%含油率的8.4倍、5.2倍、3.6倍和2.2倍。含油率由小到大,黄绵土毛细水上升10 cm分别耗时55、71、85、169和678 min,4%含油率消耗时间分别为其他4个处理的12.3倍、9.6倍、8.0倍和4.0倍。毛细水上升10 cm时,0%、0.5%和1%含油率的风沙土分别耗时5、10和445 min,2%和4%含油率的风沙土分别在2 000 min和5 500 min时上升停滞,上升高度分别为3.0 cm和1.6 cm,1%含油率的风沙土毛细水上升10 cm消耗时间分别为0%含油率和0.5%含油率的89.0倍和44.5倍。可见,随着含油率的升高,风沙土毛细水上升高度受到的影响越大。

经拟合,毛细水上升高度(h , cm)与时间(t , min)的关系可用幂函数进行拟合,具有较好的拟合度,拟合结果见表2。毛细水上升速度随时间变化趋势可由各拟合模型的时长 t 一阶求导(dh/dt)而得,各处理毛细水上升速度均随时长增加而呈衰减趋势。

表2 各处理毛细水上升高度与时间关系拟合模型

含油率/%	壤土			黄绵土			风沙土		
	方程	R^2	dh/dt	方程	R^2	dh/dt	方程	R^2	dh/dt
0	$h = 0.442 8t^{0.6265}$	0.949 2	$0.2774t^{-0.3735}$	$h = 0.490 2t^{0.7432}$	0.988 3	$0.364 3t^{-0.2568}$	$h = 4.539 4t^{0.4683}$	0.980 9	$2.125 8t^{-0.5317}$
0.5	$h = 0.930 6t^{0.4552}$	0.986 0	$0.4236t^{-0.5448}$	$h = 0.558 3t^{0.6615}$	0.988 0	$0.369 3t^{-0.3385}$	$h = 3.404 1t^{0.4210}$	0.988 3	$1.433 1t^{-0.5790}$
1	$h = 0.602 0t^{0.5015}$	0.998 3	$0.3019t^{-0.4985}$	$h = 0.720 4t^{0.5746}$	0.967 9	$0.413 9t^{-0.4254}$	$h = 1.540 8t^{0.2888}$	0.943 7	$0.445 0t^{-0.7112}$
2	$h = 0.443 5t^{0.5105}$	0.917 7	$0.2264t^{-0.4895}$	$h = 0.774 8t^{0.4894}$	0.951 9	$0.379 2t^{-0.5106}$	$h = 0.073 4t^{0.5792}$	0.989 6	$0.042 5t^{-0.4208}$
4	$h = 0.360 2t^{0.4881}$	0.995 0	$0.1758t^{-0.5119}$	$h = 0.455 6t^{0.4739}$	0.980 8	$0.215 9t^{-0.5261}$	$h = 0.028 9t^{0.6303}$	0.952 2	$0.018 2t^{-0.3697}$

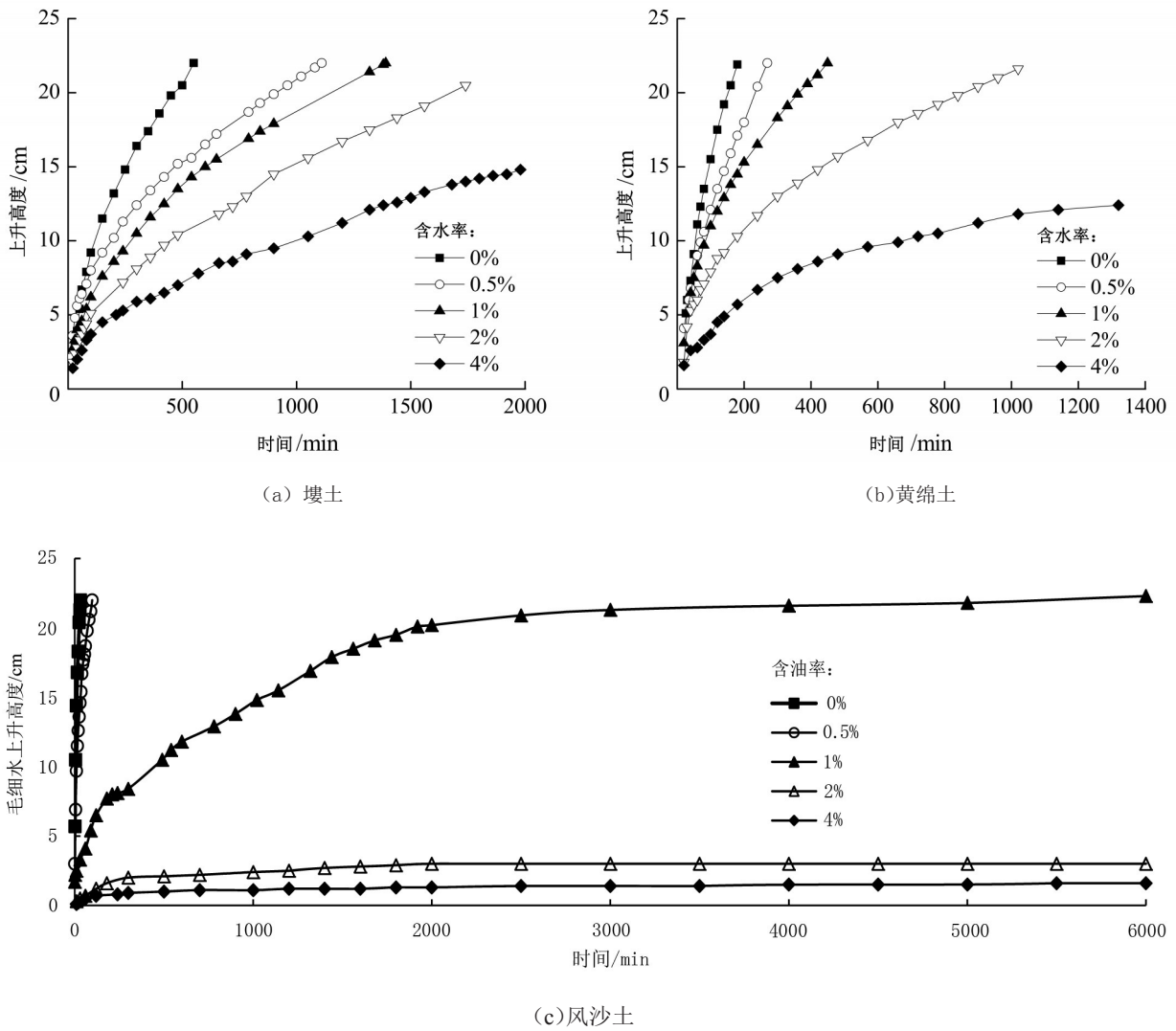


图1 毛细水上升高度随时间的变化

2.2 相同污染梯度时不同土质毛细水上升比较

含油率一定条件下不同土质的毛细水上升趋势如图2所示。从图2可以看出,清洁土壤(含油率0%)和0.5%含油率的土壤毛细水上升高度均表现为风沙土上升速率最快,黄绵土次之,壤土最慢。相同时间段内,上升高度和上升速率变化趋势相同。在初始20 min,0%含油率的壤土、黄绵土和风沙土上升高度分别为1.5、3.7和18.3 cm,风沙土上升高度分别为壤土和黄绵土的12.2倍和4.9倍;0.5%含油率的壤土、黄绵土和风沙土上升高度分别为3.6、4.1和12.6 cm,风沙土上升高度分别为壤土和黄绵土的3.5倍和3.1倍。相同时段,1%、2%和4%含油率的毛细水上升高度和上升速率变化趋势相同,均表现为黄绵土最大,壤土次之、风沙土最小。在初始30 min,1%含油率的壤土、黄绵土和风沙土上升高度分别为3.3、5.2和3.3 cm,黄绵土是壤土和风沙土的1.6倍;2%含油率的壤土、黄绵土和风沙土上升高度分别为2.4、4.2和0.5 cm,黄绵土上升高度分别是壤土和风沙土的1.8倍和8.4倍;4%含油率的壤土、黄绵土和风沙土上升高度分别为1.7、1.9和0.2 cm,黄绵土分别是壤土和风沙土的1.1倍和9.5倍。不同土质土体颗粒级配不同,孔隙各异,土壤水分运移通道也各不相同,这通常也是决定毛细水上升高度和上升速度的关键^[12]。

2.3 石油污染土壤毛细水垂向分布特征

不同含油率条件下3种供试土壤的毛细水垂向分布特征如图3所示。毛细水上升过程中,土柱剖面底端为毛细饱和带,饱和带以上为支持毛细水带,随着土柱高度的增加土体含水率迅速减小^[4]。从图3可以看出,随着毛细水上升高度的增加,壤土、黄绵土、风沙土毛细水量均呈减小趋势,且均随土壤含油率的增加而降低。随着毛细水上升高度的增加,风沙土的毛细水量下降最为剧烈,其次为壤土,黄绵土最小。含油率为

2%和4%时,风沙土的毛细水最大上升高度分别为3.0 cm和1.6 cm,而在毛细水上升高度为1 cm时,2%和4%含油率的毛细含水率分别为22.13%和12.41%,毛细水上升高度为3 cm时2%含油率的风沙土含水率为21.43%。

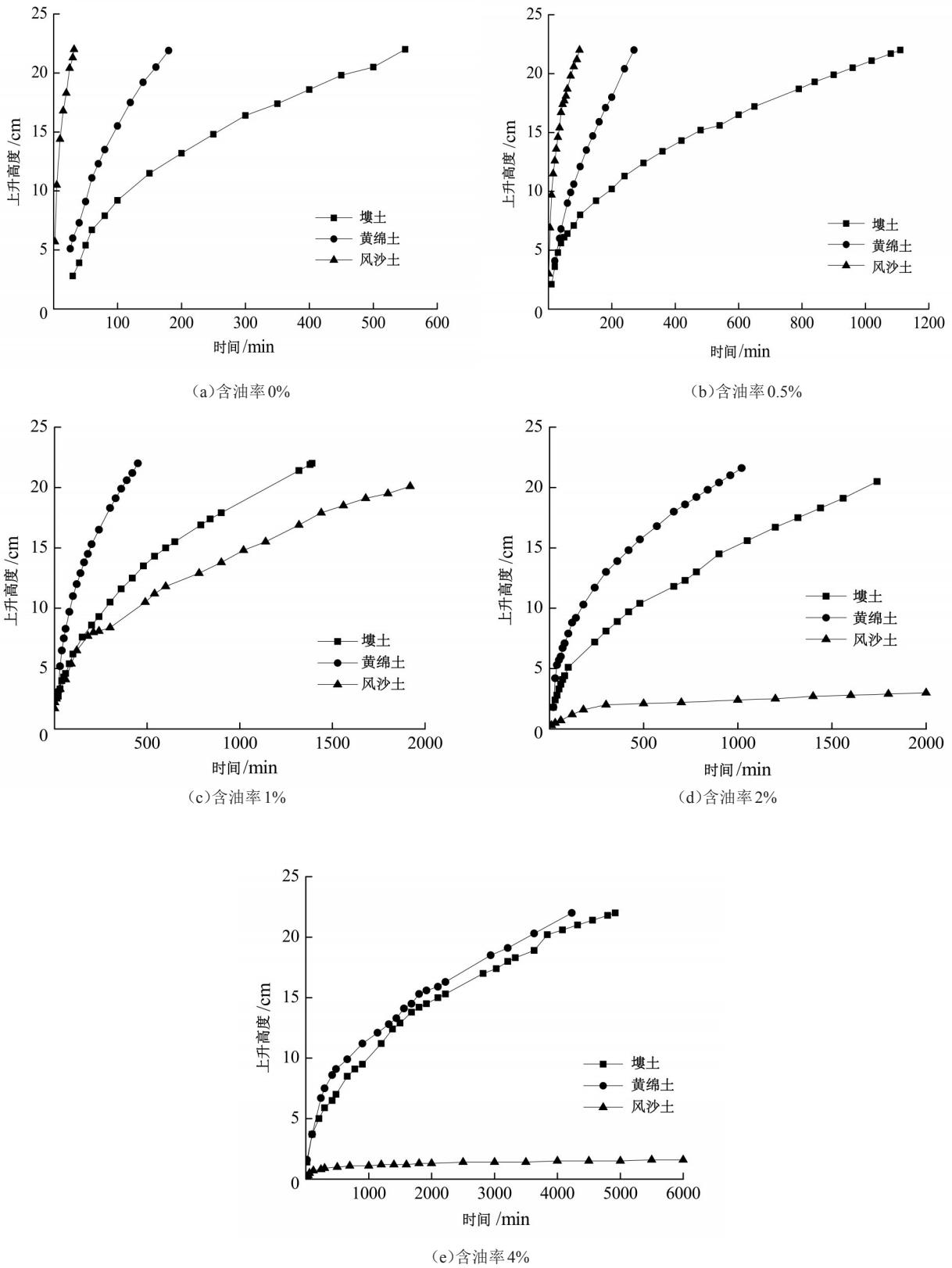


图2 不同土质毛细水上升高度随时间变化

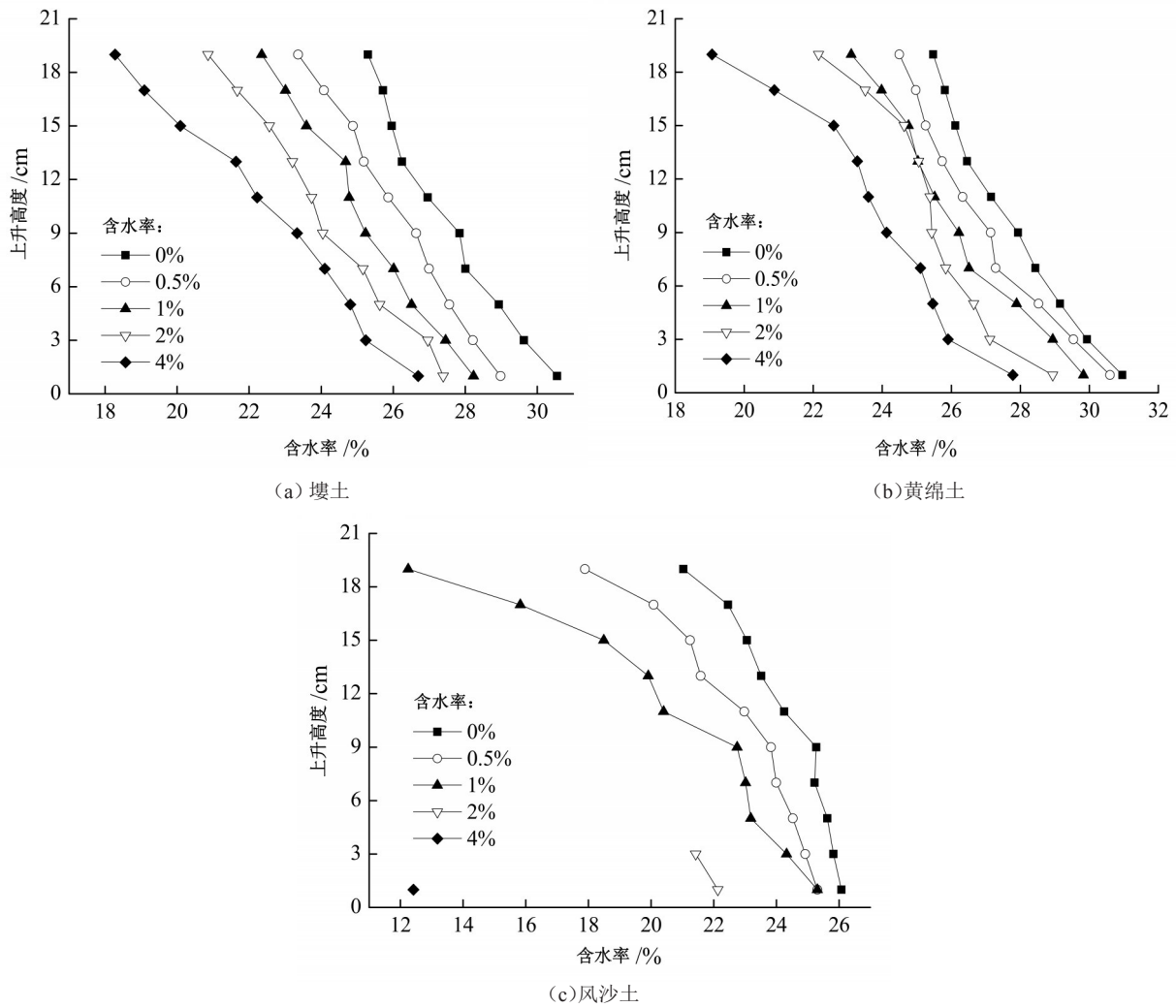


图3 石油污染土壤毛细水分布特征

根据毛细水垂向分布特征,分析石油污染对0~20 cm土壤储水量的影响,结果如图4所示。从图4可以看出,随着污染程度的加剧,3种土壤的储水量均依次减小,其中风沙土由于有机质量低,加之质地较粗,土壤孔隙大,石油对毛管的堵塞作用等影响,土壤储水量变幅最大,从67.86 mm(清洁土壤)减小到3.47 mm(0.4%含油率),壤土变幅次之,黄绵土变幅最小。

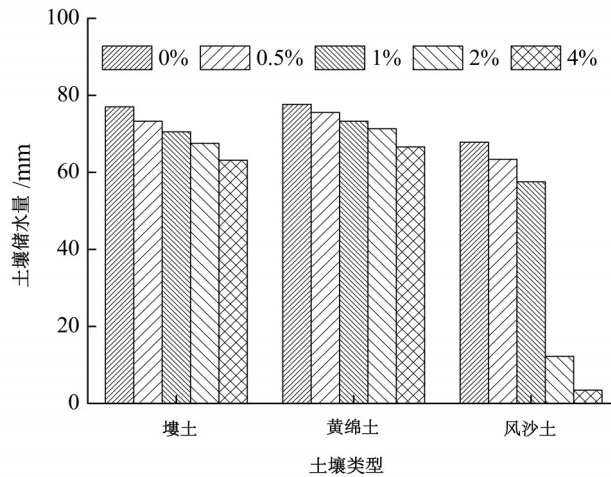


图4 石油污染下0~20 cm土壤储水量

3 讨论

文中研究结果表明,对于相同质地土壤来说,毛细水上升高度均随油品质量分数的增加而减小,毛细水上升速度均随时长增加而呈衰减趋势,这与已有相关研究结果^[1,12,19]相一致。原因可能是原油为疏水性物质,以此提炼的柴油和机油均为疏水性,油品污染土壤后分布于土粒表面,引起油污颗粒与空气间的表面张力降低,故而导致土壤毛细水上升高度减小。在试验初始阶段,土壤毛细吸力远大于重力,故而毛细水上升速度较快,随着毛细水上升高度的增加,毛细吸力和重力二者逐渐趋于平衡,导致毛细水上升速度也随之减小,即毛细水上升高度增幅在试验初始阶段较大,随着时间的延长而不断减小。此外,壤土、黄绵土和风沙土的毛细水上升高度和时间均符合较好的乘幂关系,这与童玲^[1]等开展的柴油污染砂土和壤黏土的研究结果一致,而梁春^[12]研究表明,柴油和机油污染石英砂和粗砂的毛细水上升高度和时间可用二次多项式拟合并且亚黏土毛细水上升高度和时间呈线性关系。污染油品之间的差异,土壤性质的不同是引起毛细水上升高度和时间之间拟合关系存在差异的主要原因。

土壤毛细水受土壤质地、有机质、矿物组成等因素的影响。文中研究结果表明,随着污染物质量浓度的升高,风沙土毛细水上升高度和上升速度受到的影响最大。武晓锋和唐洁等^[20]研究认为,油-水两相流中,残余油饱和度与介质粒径成正比,而残余水饱和度与介质粒径成反比。风沙土质地为壤砂土,黏粒和粉粒的量低(14.83%),砂粒量高(85.17%),毛管孔隙大,随着污染物质量浓度的增大,石油因其黏度较高会吸附在土壤颗粒表面或者侵占土体的孔隙通道,使孔隙变窄或者彻底形成死孔隙,从而堵塞毛细水的上升通道,引起毛细水上升高度和上升速率急剧下降,甚至停滞。与壤土相比较,黄绵土砂粒量低、黏粉粒量略高可能是引起黄绵土在各污染梯度毛细水上升高度均大于壤土的原因之一,但是随着污染的加剧,二者之间差距有逐渐减小的趋势。石油污染一方面引起土壤毛细水上升高度的降低,另一方面引起土壤持水和储水能力的降低,随着毛细水上升高度的增加,风沙土的毛细水量下降最为剧烈,其次为壤土,黄绵土最小。梁春^[12]研究表明柴油和机油污染对粗砂毛细性的影响远大于对亚黏土的影响,这与本文的研究结果相一致,究其原因可能是砂土有机质量低,质地粗糙,相应的其物理化学以及生物吸收能力较低,从而引起土壤持水性的下降。

4 结论

1)壤土、黄绵土和风沙土的毛细水上升高度均随着时间的延长而增加,符合良好的幂函数关系,但增幅均随着时间的延长而减小。在相同上升时段内,未被污染的3种土壤毛细水上升高度均明显大于石油污染土壤,并且污染程度越高,毛细水上升高度越小。

2)清洁土壤和0.5%含油率的土壤毛细水上升高度均表现为风沙土上升速率最快,黄绵土次之,壤土最慢。相同时间段内,上升高度和上升速率变化趋势相同。相同时间段,1%、2%和4%含油率的毛细水上升高度和上升速率变化趋势相同,均表现为黄绵土最大,壤土次之、风沙土最小。

3)随着毛细水上升高度的增加,壤土、黄绵土和风沙土毛细水量均呈减小趋势,且均随土壤含油率的增加而降低。相同污染程度时,随着毛细水上升高度的增加,风沙土的毛细水量下降最为剧烈,其次为壤土,黄绵土最小。0~20 cm土壤储水量和土壤毛细水量有着相同的变化趋势。

参考文献:

- [1] 童玲. 石油污染含水介质的水理和力学特征研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2008.
- [2] WESSOLEK G, BOHNE K, DUIJNISVELD W, et al. Development of hydro-pedotransfer functions to predict capillary rise and actual evapotranspiration for grassland sites [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400 (3/4): 429-437.
- [3] 张平,吴昊,殷洪建,等. 颗粒级配毛细水上升影响的研究[J]. *节水灌溉*,2010(7):24-26.
- [4] 栗现文,周金龙,赵玉杰,等. 高矿化度对砂性土毛细水上升影响[J]. *农业工程学报*,2011,27(8):84-89.
- [5] 栗现文,周金龙,周念清,等. 潜水高矿化度对粉质粘土毛细水上升的影响[J]. *干旱区资源与环境*,2016,30(7):192-196.
- [6] STENITZER E, DIESTEL H, ZENKER T, et al. Assessment of capillary rise from shallow groundwater by the simulation model SIMWASER using either estimated pedotransfer functions or measured hydraulic parameters[J]. *Water Resources Management*, 2007, 21(9):1 567-1 584.
- [7] 尹娟,费良军,程东娟. 均质土壤毛管水上升特性室内试验研究[J]. *农业工程学报*,2007,23(6):91-94.
- [8] 何克瑾,费良军,尹娟. 均质土壤上升毛管水运动特性试验[J]. *沈阳农业大学学报*,2007,38(4):581-585.
- [9] 史文娟,汪志荣,沈冰,等. 夹砂层土体构型毛管水上升的实验研究[J]. *水土保持学报*,2004,18(6):167-170.
- [10] 袁剑舫,周月华. 粘土夹层对地下水上升运行的影响[J]. *土壤学报*,1980,17(1):94-99.

- [11] 童玲,陈伟胜,郑西来,等. 柴油污染土壤中毛细水上升规律研究[J]. 灌溉排水学报,2011,30(6):131-134.
- [12] 梁春. 石油污染含水介质水动力特性研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2011.
- [13] AIBAN S A. The effect of temperature on the engineering properties of oil-contaminated sand [J]. Environment International, 1998, 24(1):153-161.
- [14] ALSANAD H A, EID W K, ISMAEL N F. Geotechnical properties of oil contaminated Kuwaiti sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(5): 407-412.
- [15] KHAMEHCHIYAN M, CHARKHABI A H, TAJIK M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils [J]. Engineering Geology, 2007, 89(3):220-229.
- [16] ANDERSON W G. Wettability literature survey-Part 1: Rock/oil/brine interactions and the effects of core handling on wettability [J]. Journal of Petroleum Technology.1986, 38(10):1 125-1 144.
- [17] QUYUM A, ACHARI G, GOODMAN R H . Effect of wetting and drying and dilution on moisture migration through oil contaminated hydrophobic soils [J]. Science of the Total Environment, 2002, 296(1/3):77-87.
- [18] KOWALIK P J. Drainage and capillary rise components in water balance of alluvial soils[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1/2): 206-211.
- [19] 李梅. 含水介质中石油的残留及其水理性质研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2008.
- [20] 武晓峰,唐杰. 地下水饱和区中油-水两相流饱和度的试验研究 [J]. 水利学报, 2000(10):12-15.

Impact of Soil Contamination with Oil on Capillary Water Rise

WEI Yang^{1,2,3,4}, WANG Yiquan², CAI Miao^{1,3,4}, ZHAO Lei¹, ZHU Kun¹

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Land Engineering & Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Co. Ltd., Xi'an 710075, China; 4. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Land and Resources of China, Xi'an 710075, China)

Abstract: We studied the impact soil contamination with oil on capillary water rise, rising speed as well as moisture contents in soils of different textures. Three soils - Lou soil, loess soil and aeolian sandy soil were examined under pollution gradients 0%, 0.5%, 1%, 2% and 4%. The results showed that the height that the capillary water rose increased with time in a power law, and the rising speed decreased with time. During the same time period, the capillary water rise in the three uncontaminated soils were significantly higher than that in their contaminated counterparts, and the more serious the pollution was, the lower the capillary water could rise. The rising speed of the capillary water in the clean soil and the 0.5% oil-contaminated soil was fastest in the aeolian sandy soil, followed by the loess soil and the Lou soil. The rising height and rising speed of capillary water in the 1%, 2% and 4% contaminated soils changed with time almost in the same way, high in the loess soil and low in the aeolian sandy soil. With the increase in capillary rising height, the capillary water content in Lou soil, loess soil and aeolian sandy soil all decreased, and the capillary water content decreased with the increase in contamination.

Key words: oil pollution; capillary water; soil

责任编辑:刘春成