

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2014.11.003

土壤非饱和带柴油迁移的模拟实验*

李永霞^{1,2} 郑西来^{2**}

(1. 山东省环境保护科学研究设计院生态与土壤修复研究所, 济南, 250013;
2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛, 266100)

摘 要 通过土柱模拟实验研究了 0# 柴油及其饱和水溶液在不同含水率的砂土及壤土中的入渗迁移及残留特征. 结果表明, 柴油在壤土中的入渗速率小于砂土, 且随含水率的增加逐渐减小, 而柴油在砂土中的入渗速率则随含水率的增加先增大后减小. 入渗结束后, 相同深度的土柱中柴油残留量随含水率的增加明显降低, 沿土层深度呈先增后降的弓形趋势. 随着再分布时间的延长, 砂土柱中柴油残留量随土层深度逐渐增大, 壤土柱中柴油含量变化较小. 柴油饱和水溶液在壤土中的入渗速率明显小于砂土, 穿透曲线的峰值滞后于砂土, 入渗过程中, 壤土中渗出液的柴油浓度小于砂土. 入渗结束后, 深度小于 10 cm 的壤土柱中集中了绝大部分柴油, 而砂土中柴油残留量则略低于壤土.

关键词 柴油, 非饱和带, 含水率, 入渗, 再分布, 残留.

Simulated experiment on transport of diesel oil in unsaturated soil zone

LI Yongxia^{1,2} ZHENG Xilai^{2**}

(1. Institute of Ecology and Soil Remediation, Shandong Academy of Environmental Science, Jinan, 250013, China;
2. Key Laboratory of Marine Environmental Science & Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, 266100, China)

Abstract: Soil column simulation tests were carried out to study the infiltration and residues characteristics of 0# diesel (dissolved and light non-aqueous phase liquids, LNAPLs) in loamy and sandy soils with various moisture content. It was found that the wetting front advancing rate of diesel oil in loamy soil decreased with the increase of moisture content, and the rate was slower than in sandy soil. In sandy soil columns, the wetting front advancing rate of diesel oil first increased then decreased with the increase of moisture content. The infiltration experiment also showed that the residue of diesel oil presented an overall decline with the increase of moisture content in unsaturated zone, and the maximum residue was located at the middle of the soil column. The amount of residual diesel oil increased in sandy soil along the depth of columns after redistribution, while the oil content changed little in loamy soil. The velocity of dissolved diesel oil seeping in sandy soil proved much faster than in loamy soil. The peak of break-through curves of loamy soil lagged behind as compared to those of sandy soil. Concentrations of the exudates from soil columns with loamy soil were lower than that with sandy soil. The residue of diesel oil congregated in a range of 0—10 cm depth in loamy soils, which was higher than that in sandy soil.

Keywords: diesel oil, unsaturated zone, moisture content, infiltration, redistribution, residua.

柴油密度比水小, 且难溶于水, 属于轻非水相液体(light non-aqueous phase liquids, LNAPLs), 是目前使用量较大的石油制品, 主要由沸点介于 160—360 °C 间、碳链为 C10—C20 的组分组成^[1]. 从原油中提

2013 年 12 月 31 日收稿.

* 国家自然科学基金项目(40872150)资助.

** 通讯联系人, Tel: 0532-66781759; E-mail: zhxilai@ouc.edu.cn

炼的柴油主要由 C9—C28 的烃类组成,通常含有 15%—30%的芳香烃、70%—85%的饱和烃和烯烃、以及少量硫(0.2%—6%)、氮(<0.1%)等^[1-2].柴油的泄漏事故常有发生,对生态环境和人类健康造成了严重威胁.柴油中芳香烃含量较大且毒性最大,尤其是多环芳烃(PAHs) 毒性更大.排入土壤中的柴油会破坏土壤结构,影响土壤的通透性,从而损害植物的根部,最终导致植物死亡;柴油也会通过呼吸、皮肤接触、饮食摄入等方式进入人体,造成人体损伤^[3].由于其与水不混溶,在进入地下含水介质后,易和空气或地下水形成多相流体系^[4].截留在土壤非饱和带的柴油,在降雨的淋溶作用下,以水溶态继续向下迁移,可成为土壤和地下水的长期污染源.

近年来,众多学者开展了柴油在土壤中迁移特性的实验研究,研究手段也从柱体实验发展到二维渗流槽,并建立了污染预测的多相流数学模型.Wang 等^[5]通过土柱实验研究了柴油在原状黄土性土壤中的入渗特征,结果表明,柴油入渗速率随润湿距离的增加呈指数型下降,孔隙度和容重对柴油的入渗影响较大,入渗呈现各向异性;宁丽等^[1]研究了 0#柴油在不同类型的土壤(壤土、砂土)中分别以连续和间歇方式入渗的一维渗流特征;Abdul^[6]、郑西来^[7-8]、杨宾等^[9]开展了柴油入渗的二维砂箱(砂槽)实验;李珊珊等^[10]将 Visual modflow 模型应用于柴油在含水砂槽中迁移特征的实验研究中,证明该建模方法是合理且有效的.

柴油进入土壤后,会不断地被土壤矿物和有机质所吸附,继而影响其在土壤中的迁移与分布^[11].影响石油类污染物在土壤中迁移的因素很多,对于某一特定多孔介质,含水率是影响油品在土壤非饱和带迁移的重要理化性质之一,已有学者^[12-14]对煤油、汽油等在中孔介质中的残留量与含水率的关系进行了定性(量)研究,但在柴油污染土壤中相关研究仍鲜见报道^[15].

本文选择淄博市石化工业区代表性的砂土、壤土及 0#柴油作为研究对象,通过土柱模拟实验研究了柴油在非饱和带中的入渗及残留特征,考察了土壤含水率对柴油迁移及再分布规律的影响,为该区域土壤非饱和带中石油污染物的预防和治理提供了科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料和装置

实验用土取自淄博市石化工业区大武水源地.砂土采集于无污染的淄河河岸,为河滩天然层积砂,壤土采集于可耕农田表层 40—50 cm 以下未受石油烃污染的土层.土样取得后,自然风干、除杂、碾碎,过 2 mm 筛,其基本性质见表 1.根据建筑地基基础设计规范(GB50007—2002)^[16],砂土和壤土分别属于粉砂和粉质黏土.

实验用油为齐鲁石化公司提供的 0#轻质柴油,其密度为 0.854 kg·m⁻³,黏滞系数为 3.56—4.05 mPa·s,黏度小,仅为水的 3—4 倍,流动性较好.

实验用柴油饱和水溶液的制备:向 3000 mL 蒸馏水中滴加过量 0#柴油,充分搅拌后静置 48 h,待油水分层后用分液漏斗分液,取下清液用紫外分光光度法测定柴油的质量浓度(15 ℃)为 20.90 mg·L⁻¹.

表 1 实验用土基本性质
Table 1 Basic properties of the soils

土壤 类型	干密度/ (g·cm ⁻³)	比重	比表面积 / (m ² ·g ⁻¹)	各粒径含量/%						工程 分类
				1—0.5/ mm	0.5—0.25/ mm	0.25—0.1/ mm	0.1—0.075/ mm	0.075—0.005/ mm	<0.005/ mm	
砂土	1.60	2.66	7.69	9.0	21.1	10.1	37.2	4.7	17.9	粉砂
壤土	1.45	2.70	31.57	0.3	0.3	0.7	4.9	8.1	85.7	粉质黏土

实验装置采用有机玻璃制作,柱长分 30 cm 和 40 cm 两种规格,其中 30 cm 土柱用于柴油饱和水溶液的入渗实验,40 cm 土柱用于柴油 LNAPLs 的入渗实验,柱内径为 4.5 cm,底部衬有起过滤作用的钢丝网.土柱从下到上每隔 5 cm(30 cm 柱)或 6 cm(40 cm 柱)打 1 个采样孔,实验中用橡皮塞塞住.实验装置见图 1.

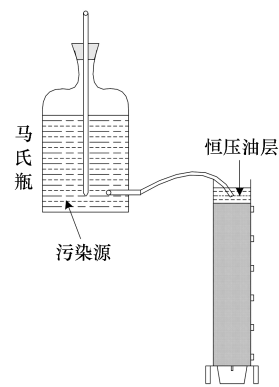


图 1 柴油入渗实验装置

Fig.1 Experimental setup of diesel oil infiltration

1.2 实验方法

为研究土壤含水率对柴油入渗特征的影响,分别设置了 0.6%/1.1% (风干砂/土)、5.0%、10.0%、15.0%等 4 种装填含水率.将配置好的已知含水率的土样分别按其干密度分层装入 40 cm 土柱中,每 3 cm 填装 1 层并夯实,层间需抓毛,以免出现人为的土层分界面,土柱装填高度为 30 cm.30 cm 土柱的装填方法与此相同,仅装填风干砂/土,装填高度为 20 cm,并于表层上覆 2 cm 粒径 0.50 mm 的石英砂,以减弱水溶液入渗初期对土柱表层的冲刷作用.

1.2.1 柴油 LNAPLs 的入渗

以马氏瓶作为连续注入的污染源,保持 3 cm 的油层液面高度.观察各土柱中柴油润湿锋面的位移,记录相应的时间,待锋面到达柱底后停止供油,分别静置 1 h、24 h 后从各取样孔取出该横截面处一定量的土样,测定柴油沿土层深度的再分布情况.

1.2.2 柴油饱和和水溶液的入渗

实验方法同上,作用水头保持 5 cm.定时记录水溶液润湿锋面的位移和时间,同时采集底部取样孔的渗出液,待渗出液累积体积达 2000 mL 时停止实验,测定各阶段渗出液的柴油浓度.实验完毕后,从各取样孔取出该横截面处一定量的土样测定其含油量.

1.3 样品分析

土壤中柴油含量的测定采用超声萃取-紫外分光光度法^[17],萃取剂为石油醚,平均萃取回收率为 92%,测定波长为 225 nm.在土壤烘干过程中水分的挥发会对土体含油量测定造成误差,因此引入油品烘干损失率来校正计算含油率^[18].

2 结果与讨论

2.1 柴油在非饱和带土壤中的入渗迁移

2.1.1 柴油 LNAPLs 的入渗规律

柴油 LNAPLs 的入渗锋面形态是重力、毛细力和黏滞力等共同作用的结果^[9].图 2 为柴油在不同含水率的砂土和壤土中的润湿过程,其中 15.0% 含水率的壤土中柴油入渗 18 d 后入渗深度仅为 6.0 cm,未绘于图中.柴油入渗深度与时间的关系均可用幂函数表示,相关系数在 0.98 以上,具体见表 2.由图 2 可知,随着砂土柱含水率的增加,柴油的锋面下渗速率先增大后减小,5.0%、10.0% 含水率的砂土柱中柴油的穿透时间小于风干砂,此时柴油的入渗以重力渗透过程为主,不确定是否发生油水驱替,而 15.0% 含水率的砂土中柴油的穿透时间却为风干砂的 4 倍,由于砂土的孔隙水压力,渗透变慢,在入渗过程中底部取样孔有水渗出,已发生油水驱替.与砂土中柴油的润湿过程不同,柴油在壤土中润湿锋面的下渗速率随含水率的增加不断减小,风干土中柴油穿透土柱的时间最短.土壤类型对柴油入渗速率的影响较大,实验含水率范围内,柴油在砂土中的穿透时间均小于壤土.由表 2 中的拟合方程可知,砂土和壤土中柴油的锋面下渗速率随时间的延长呈幂律递减,含水率对柴油的入渗有较大影响,10.0% 含水率的砂土

中柴油的起始入渗速率为 $3.50\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, 风干壤土中柴油的起始入渗速率为 $1.05\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$. 入渗过程中柴油运移速率迅速减慢, 在接近土柱穿透时, 柴油在砂土、壤土柱中的入渗速率分别为 $0.01\text{—}0.30\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $0.01\text{—}0.02\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, 比较而言, 砂土中柴油的入渗速率受含水率的影响较大.

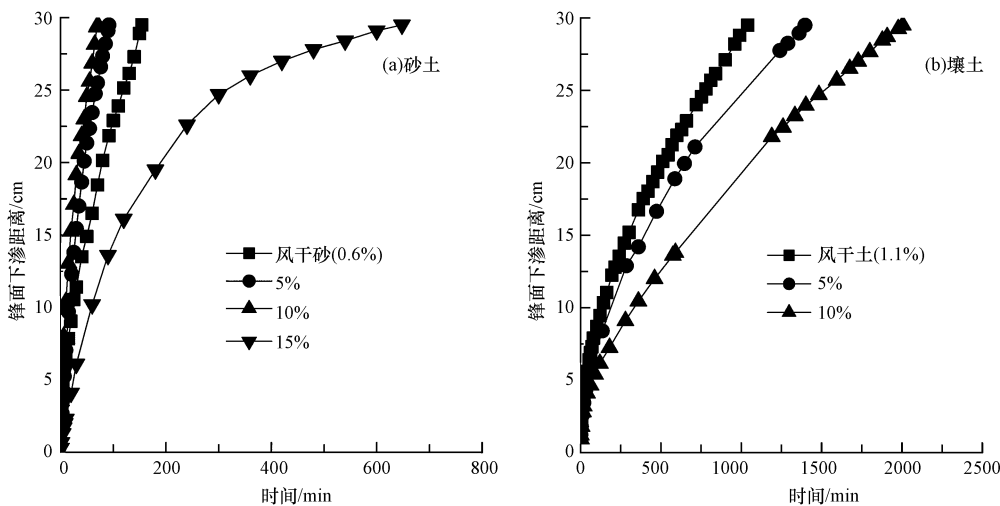


图2 柴油在不同含水率砂土和壤土中的润湿过程

Fig.2 Wetting front depth of diesel oil in sandy and loamy soil with different moisture contents

表2 柴油入渗深度与时间关系的拟合

Table 2 The fitting results for relationships between the infiltration depth of diesel oil and time				
多孔介质	含水率/%	穿透时间/min	入渗深度与时间拟合方程	R ²
砂土	0.6	154	$h = 2.264t^{0.4947}$	0.9918
	5.0	92	$h = 1.536t^{0.6643}$	0.9954
	10.0	71	$h = 3.290t^{0.5122}$	0.9986
	15.0	649	$h = 0.572t^{0.6387}$	0.9805
壤土	1.1	1040	$h = 0.955t^{0.4873}$	0.9988
	5.0	1397	$h = 0.792t^{0.4956}$	0.9983
	10.0	2005	$h = 0.767t^{0.4677}$	0.9899

一般情况下,同种介质的干密度相同时,含水率越大,颗粒表面的结合水膜越厚,介质的有效孔隙体积越小,油品的入渗越慢,柴油在壤土中的润湿过程体现了这一规律,而不同含水率的砂土中柴油的润湿过程与此不同^[12].当砂土含水率小于10.0%时,柴油润湿锋面下渗速率随含水率的升高而增大,这与砂的表面水湿润性有关,在有水存在时,水分子优先占据砂土中的微型和中型孔隙,大孔隙中没有或仅部分充水,柴油主要通过大孔隙下渗流失^[19],柴油的疏水性导致砂土对其吸持量的减少,穿透时间反而缩短.当砂土含水率大于10.0%时,柴油的下渗速率随含水率的升高而减小,这与柴油和水的密度差有关,一方面,含水率增加至一定程度时,砂土孔隙通道几乎全部被水占据,柴油下渗孔隙通道极少,另一方面,柴油密度小于水,油相要下移,必先驱替介质中的水分,随着柴油入渗量的增加,上层砂土完全被油浸润,水湿润性的砂土会由于油的饱和而转变为油湿润性,从而发生油水驱替,驱替出的水从土柱底部取样孔排出,因此,表现为润湿锋面随含水率的增加下移缓慢.

2.1.2 柴油饱和和水溶液的入渗规律

图3为柴油饱和和水溶液入渗砂土和壤土的润湿过程.由图3可以看出,柴油水溶液在砂土中的入渗速率比壤土中快很多,在保持5 cm定水头条件下,锋面下渗距离20 cm,入渗砂土和壤土柱的时间分别为5.6 min和38.0 min,砂土柱的入渗速率介于 $2.9\text{—}4.2\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$,过程曲线几乎呈线性,壤土柱的初始入渗速度为 $2.4\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$,待穿透土柱时的入渗速度仅为 $0.13\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$,过程曲线呈抛物线形状,入渗速率慢慢减小.

将渗出液与注入液柴油浓度之比(C/C_0)随时间变化的穿透曲线绘于图4.初始注入液柴油浓度为 $20.90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在入渗初期,砂土和壤土中渗出液的柴油浓度分别为 $9.55\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可见土壤对溶解油产生吸附作用,砂土柱的初始渗出液柴油浓度高于壤土,这主要与水溶液入渗砂土柱时间较

短及砂土的吸附容量小有关.随着入渗的进行,质量浓度比逐渐升高,当累积体积达到某一值时到达峰值,壤土穿透曲线的峰值滞后于砂土,且峰值略小于砂土,之后又开始慢慢下降,这主要是因为壤土有机质和细粒组分较多,对溶解油的吸附作用更强,吸附容量更大.穿透曲线的形状不因介质类型的不同而改变,这与宁丽等^[1]的结论一致.当累积入渗体积达到 2000 mL 后,壤土的渗出液质量浓度比小于砂土,表明壤土对溶液油的吸附截留能力强于砂土.

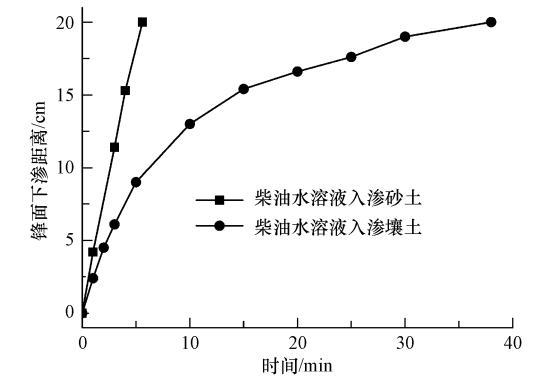


图3 柴油饱和水溶液入渗砂土和壤土的润湿过程
Fig.3 Velocity curves of continuous infiltration in both sandy and loamy soil of diesel oil saturated solution

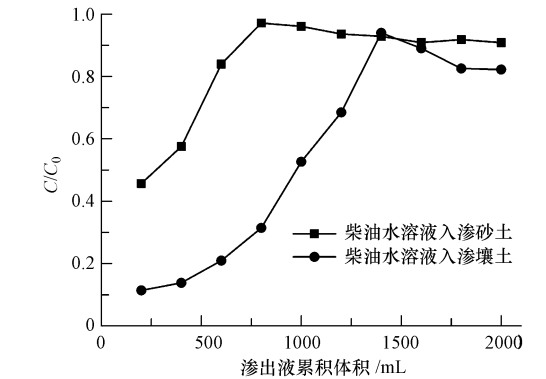


图4 柴油饱和水溶液入渗砂土和壤土的穿透曲线
Fig.4 Breakthrough curves of continuous infiltration in both sandy and loamy soils of diesel oil saturated solution

2.2 非饱和带土壤中柴油的残留分布

2.2.1 柴油 LNAPLs 的再分布

柴油 LNAPLs 进入土体后,为油-水-气三相系统,土体孔隙被非水相油充填,含水介质中柴油含量较高,在重力和毛管力的作用下,继续完成再分布^[20],柱中自由态残留油继续向下迁移,多余油分从底部渗出.图 5 为再分布时间 1 h、24 h 后柴油在不同含水率的砂土和壤土中的残留量,其中 15.0% 含水率的壤土中柴油入渗 18 d 后,将上覆油层倒掉,测定沿土柱深度的柴油残留量.

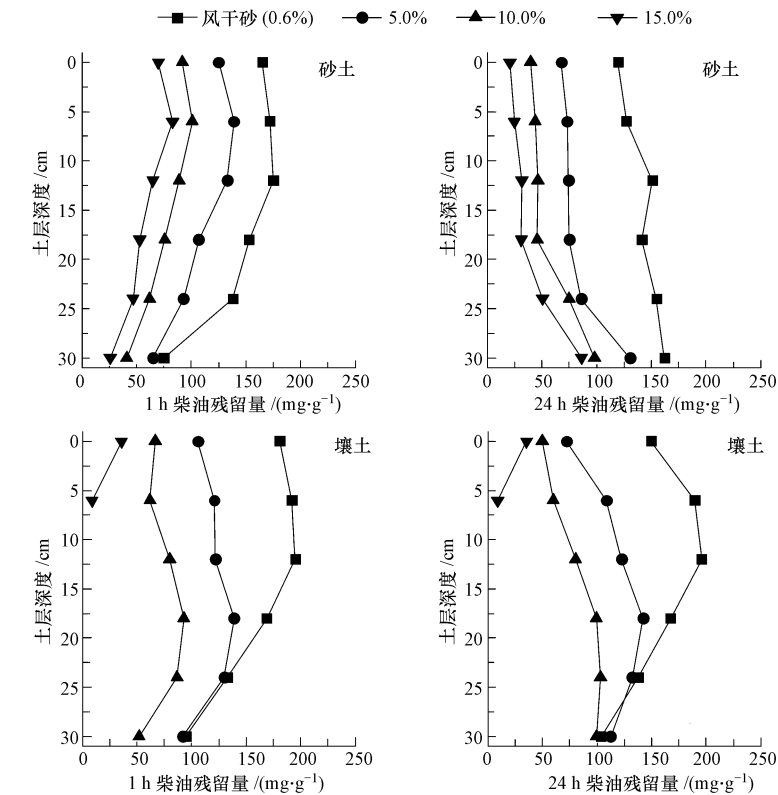


图5 再分布时间 1 h、24 h 后柴油在不同含水率的砂土和壤土中的残留量
Fig.5 Residue of diesel oil after redistribution (1 h and 24 h) in sandy and loamy soil

由图 5 可以看出,随着砂土和壤土含水率的增加,相同深度的土柱中柴油残留量明显下降,这与 Fine 和 Arthurs 等^[12,21]的研究结果一致,即较高的初始含水率往往得到较低的残余油饱和度.随着再分布时间的延长,柴油在砂土和壤土中的残留量逐渐重新分布,表现为表层柴油残留量逐渐降低,底部残留量逐渐增加.砂土中柴油残留量变化较壤土显著,介质含水率越高,再分布时柴油的含量变化越大.当再分布时间较短(1 h)时,沿土柱深度的柴油残留量呈先增后降的弓形趋势,这可能与柴油为非湿润性流体有关.在含水介质内,由于介质颗粒表面对柴油的吸附作用相对于湿润性的水来说较小,重力的影响不可忽略,促使柴油残留量最大值出现在土柱中部,并随着时间的延长逐渐向下推移,经 24 h 后,含水率 5.0% 的砂土柱已出现柴油渗出现象,10.0% 含水率的砂土柱出现油水驱替现象,底部有柴油、水同时渗出,此时,柴油残留量随土层深度逐渐增大,可见在排水良好的地质条件下,油污染深度受泄漏量的影响很大,随着水量的排泄,会将上层的石油污染物带到土体的底层.

不同再分布时间后,壤土柱中柴油残留量变化不明显,仅表现为表层柴油残留量降低和底部残留量增加,残留量随深度的变化仍为弓形趋势.比较相同再分布时间内,同一含水率的砂土柱和壤土柱可以看出,在再分布初期,壤土中柴油残留量随含水率的增加而显著下降,与同一含水率的砂土中柴油残留量相当,但经 24 h 后,由于砂土柱中柴油渗出,壤土中柴油残留量整体高于砂土.

2.2.2 柴油饱和和水溶液的残留特征

柴油以水溶态在土壤中纵深迁移的过程中,受到了土壤颗粒表面的吸附作用而截留在土柱中.图 6 为柴油饱和和水溶液入渗后砂土和壤土柱中的柴油残留量,由图 6 可知,沿土柱深度方向,由于入渗速率随深度的增加逐渐减小,砂土和壤土柱中柴油的残留量呈先增大后减小的趋势,砂土柱中柴油最大残留量出现在距表层 15 cm 深度的土层,而壤土中柴油最大残留量出现在 5 cm 深度的土层.对比土层中柴油含量发现,深度小于 10 cm 的土层中,壤土中柴油残留量高于砂土,但随着深度的增加,砂土和壤土中柴油残留量交替为大.由于柴油水溶液在砂土中的纵深迁移比在壤土中容易,更易造成地下水的污染.

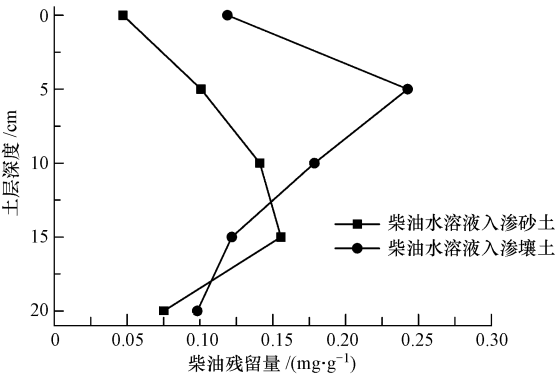


图 6 柴油水溶液入渗后砂土和壤土柱柴油残留量

Fig.6 Distribution of diesel oil content after infiltration of diesel oil solution in sandy and loamy soils

砂土和壤土中柴油残留量分布的差异源于二者的性质不同.首先,柴油水溶液在砂土中入渗比在壤土中容易,作用时间相对较短.其次,柴油水溶态入渗时,吸附过程主要是土壤有机质的分配作用,而壤土的有机质含量比砂土高,且其颗粒较砂土细小,比表面积较大,提供的吸附位多.因此,柴油水溶液入渗过程中,壤土对柴油的吸附作用大于砂土,即壤土中柴油残留量大于砂土.由于壤土上部土层对柴油较强的吸附和截留作用使得迁移到深部土层的柴油减少,随着入渗体积的增大,沿土柱深度从而呈现砂土和壤土中柴油残留量交替为大的现象.

3 结论

(1) 柴油 LNAPLs 在不同含水率的砂土和壤土中的入渗过程均可用幂函数表示,介质类型及其含水率对柴油的入渗速率影响较大.壤土中柴油润湿锋面的下渗速率随含水率的增加不断减小,而在砂土中的下渗速率则随含水率的增加先增大后减小.砂土的表面水湿润性与柴油和水的密度差是某一含水率

范围内柴油下渗速率发生反转的主要原因。

(2) 柴油饱和水溶液在壤土中的入渗速率明显小于砂土, 穿透曲线的峰值滞后于砂土。入渗初期和结束时, 壤土中渗出液的质量浓度比小于砂土, 其对溶解油的吸附作用较砂土强。

(3) 柴油 LNAPLs 入渗实验表明, 随着介质含水率的增加, 相同深度的土柱中柴油残留量明显下降, 沿土层深度呈先增后降的弓形趋势。随着再分布时间的延长, 砂土柱中柴油残留量随土层深度逐渐增大, 壤土柱中柴油残留量变化较小, 但残留量整体高于砂土。

(4) 柴油饱和水溶液入渗实验表明, 沿土层深度方向, 砂土和壤土柱中柴油的残留量呈先增后降的趋势, 入渗结束后, 深度小于 10 cm 的壤土柱中集中了绝大部分柴油, 而砂土中柴油残留量则低于壤土。

参 考 文 献

- [1] 宁丽, 曾溅辉, 陈广. 柴油在土壤中迁移的试验模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(3): 1-6
- [2] 孙燕英, 刘菲, 陈鸿汉, 等. H_2O_2 氧化法修复柴油污染土壤[J]. 应用化学, 2007, 24(6): 680-683
- [3] 张景环, 曾溅辉. 北京地区土壤对柴油的吸附及影响因素研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20(2): 19-23
- [4] 潘玉英, 贾永刚, 郭磊, 等. LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1744-1752
- [5] Wang Y, Shao M. Infiltration characteristics of non-aqueous phase liquids in undisturbed loessal soil cores[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(10): 1424-1431
- [6] Abdul A S. Migration of petroleum products through sandy hydrogeologic systems[J]. Groundwater Monitoring & Remediation, 1988, 8(4): 73-81
- [7] 郑西来, 杨喜成, 荆静. 地下水系统石油污染研究[M]. 西安: 西安地图出版社, 1998
- [8] 郑西来, 刘孝义, 钱会. 土壤中油-水驱替机理研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(2): 218-220
- [9] 杨宾, 李慧颖, 伍斌. 4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1545-1552
- [10] 李珊珊, 李建兵, 张文, 等. Visual modflow 在模拟实验室含水砂槽中柴油运移特征中的应用[J]. 环境工程学报, 2013, 7(8): 3042-3047
- [11] 张景环, 曾溅辉. 表面活性剂对柴油在土壤中吸附的影响[J]. 环境化学, 2007, 26(5): 610-613
- [12] Fine P, Yaron B. Outdoor experiments on enhanced volatilization by venting of kerosene component from soil[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1993, 12: 355-374
- [13] Jaesjo J, Destouni G, Yaron B. Retention and volatilization of kerosene: Laboratory experiments on glacial and post-glacial soils[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1994, 17: 167-185
- [14] Hoag G E, Marly M C. Gasoline residual saturation in unsaturated uniform aquifer materials[J]. Journal of Environmental Engineering, 1986, 112(3): 586-604
- [15] 武晓峰, 唐杰, 藤间幸久. 地下水饱和区中油—水两相流饱和度的试验研究[J]. 水力学报, 2000(10): 12-15
- [16] 中华人民共和国建设部. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [17] 李纪云, 李丽, 冯成武. 超声-紫外法测定土壤中石油类物质含量[J]. 石油大学学报, 1999, 23(6): 82-93
- [18] 梁春, 郑西来, 童玲, 等. 石油污染多孔介质含水量测定方法[P]. 中国专利: 101936860A, 2011-01
- [19] Pignatello J J. The measurement and interpretation of sorption and desorption rates for organic compounds in soil media[J]. Advances in Agronomy, 2000, 69: 1-73
- [20] Oostrom M, Hofstee C, Lenhard R J, et al. Flow behavior and residual saturation formation of liquid carbon tetrachloride in unsaturated heterogeneous porous media[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003, 64(1/2): 93-112
- [21] Arthurs P, Stiver W H, Zytner R G. Passive volatilization of gasoline from soil[J]. Journal of Soil Contamination, 1995, 4(2): 1-13