

石油污染对土壤渗透性的影响研究*

李梅, 郑西来, 童玲, 高增文

(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: 选择砂土和壤土2种土壤及柴油和原油2种油品类型, 通过室内渗透试验研究了不同污染程度的油污土壤的渗透性能。试验结果表明, 柴油污染清洁砂土后, 可使砂土渗透系数降低64%左右; 原油含量大于2%时, 砂土的渗透系数降低了一个数量级; 8%含油率的柴油污染壤土的渗透系数比清洁壤土降低了97%左右; 壤土中原油含量为8%时, 其渗透系数为 5×10^{-7} cm/s左右, 比同一干密度(1.57 g/cm³)清洁壤土的渗透系数降低了两个数量级, 含油量增大, 其渗透性能更差。无论对于砂土还是壤土, 原油引起的渗透系数的降低比柴油显著, 主要是因为原油的粘滞系数大大高于柴油的粘滞系数。

关键词: 石油污染物; 土壤; 渗透性; 含油率

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 02-0119-05

Influence of Oil Pollution on the Permeability of Soils

LI Mei, ZHENG Xilai, TONG Ling, GAO Zengwen

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

Abstract: The permeability can be changed when the soil is contaminated by oil pollutants, which can influence the transport of water or solute in the soil-water system. Sand and loam soil were taken as soil samples, diesel oil and crude oil as oil samples, then the permeability of oil-contaminated soils with different pollution extents was studied. The permeability coefficient of sand reduces by about 64% when the sand is contaminated by diesel oil and that of sand reduces by 1 order magnitude when crude oil content is higher than 2%. The permeability coefficient of loam soil with 8% of diesel oil content reduces by 97% compared with clean loam soil, while that of loam soil with 8% of oil content is 5×10^{-7} cm/s, which is 2 order magnitude smaller than that of clean loam soil with the same dry density of 1.57 g/cm³. When the crude oil content is higher, the permeability of loam soil becomes worse. Regardless of sand or loam soil, the decrease of permeability coefficient induced by crude oil is greater than by diesel oil, which is due to the higher viscosity of crude oil.

Key words: oil pollutants; soil; permeability; oil content

在石油的开采、炼制、运输和使用过程中, 会有大量的原油和石油制品抛洒或泄漏, 这些抛洒和泄漏的石油可以通过包气带直接渗入或由降雨携带进入土壤, 从而导致包气带的污染, 甚至进而污染地下水。石油污染土壤在治理修复以及再利用之前, 都需要先了解污染土壤的性质。作为土壤性质

的一个重要方面, 其渗透性能影响着水分和溶质在土-水系统中的运移, 从而影响到地表水向地下水的补给以及石油污染土壤的化学和生物修复。因此, 研究石油污染对土壤渗透性能的影响有着重要的意义。

目前, 对于石油污染土壤, 国内外学者关注较

* 收稿日期: 2008-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40572142, 40872150)

作者简介: 李梅(1982年生), 女, 硕士研究生; 通讯联系人: 郑西来; E-mail: zhxilai@ouc.edu.cn

多的是石油污染物在土壤中的迁移转化^[1-3]以及石油污染土壤的生物修复^[4,5],对石油污染土壤渗透性能的研究较少。McIachlan 等人^[6]对滨海沙滩石油污染砂土渗透性的研究表明,石油污染后砂土的渗透性明显降低,变化的大小取决于含油量、石油的风化状态及油砂的混合程度。另外,一些学者^[7-9]研究中东地区原油污染砂土及其地球化学作用对岩土工程性质效应时,也专门研究了含油量对渗透性的影响。例如, Mashalah 等^[9]对伊朗原油污染的不同砂土进行了渗透试验,将石油含量分别控制为 4%、8%、12%、16%。研究表明,渗透系数与砂土颗粒大小成正比,与含油量成反比,并认为石油污染后的孔隙度减小是造成渗透性变化的主要原因。

针对以往研究选择油品单一(均为重质原油),对土壤渗透性的影响研究还未深入的现状,本文选取了柴油和原油两种油品类型以及砂土和壤土两种土壤类型,通过室内渗透试验,研究油品及含油率对土壤渗透性能的影响。

1 材料和方法

1.1 试验材料及性质

试验所用柴油和原油均取自齐鲁石化,20℃条件下其性质见表 1。为与水作对比,特把水的性质一并列于表中。

表 1 水及油品性质

Table 1 Properties of water and oil

物质	密度/(g·cm ⁻³)	粘滞系数/(mPa·s)
水	0.998	1.004
原油	0.858	12 100
柴油	0.854	3.56~4.05

试验所用砂土和壤土分别取自淄博淄河河滩和淄博金岭(齐鲁石化附近)田地,其颗粒级配见表 2。

表 2 试验用土壤的颗粒级配

Table 2 Grain distribution for soil samples

砂土		壤土	
粒径/mm	含量/%	粒径/mm	含量/%
1-0.5	31.1	0.25-0.075	3.0
0.5-0.25	55.2	0.075-0.05	2.0
0.25-0.125	10.1	0.05-0.01	43.5
0.125-0.075	1.4	0.01-0.005	9.8
<0.075	2.2	<0.005	41.7

1.2 试样的制备

分别称取一定质量的风干壤土和砂土,配制一系列含油率(表 3)的油污土。考虑到渗透试样制备过程中含油率过大时油的浸出以及柴油和原油的对比,含油率最大设置为 11% 左右。柴油污染土壤配制时将柴油和土壤直接混合均匀,原油污染土壤配制时,先将一定质量的原油溶于低沸点(30~60℃)石油醚,然后再与相应质量的土样混合均匀,不断搅拌至石油醚挥发殆尽。石油污染土壤老化两周后置于塑料袋中备用。

表 3 石油污染土壤试样类型综合表

Table 3 The samples of oil-contaminated soils

油污土类别	含油率/%					
柴油污染砂土	1	2	4	6	8	10.6
原油污染砂土	1	2	4	6	8	11.5
柴油污染壤土	1	2	4	6	8	12.0
原油污染壤土	-	2	4	6	8	11.2

1.3 试验内容与方法

1.3.1 柴油对砂渗透系数的影响 柴油污染砂柱渗透系数采用常水头装置(见图 1)进行测定,常水头装置为长 50 cm,直径 9 cm 的有机玻璃柱。试样用水温度为 20℃。

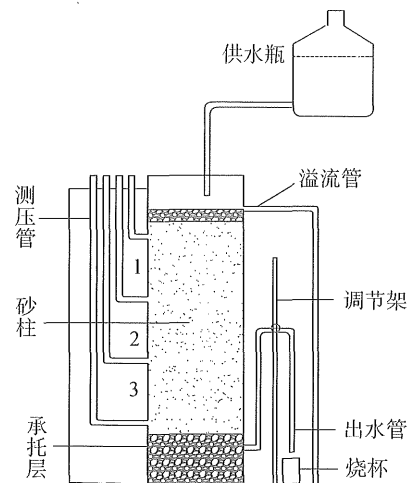


图 1 常水头条件渗透系数测定装置示意图

Fig. 1 Sketch map for the determination of permeability coefficient at constant head

由于装样会对砂柱渗透系数的测定产生较大影响,因此柴油污染砂的渗透系数和清洁砂的渗透系数用同一土柱进行。先在有机玻璃柱中装填清洁砂,分层击实,控制砂柱干密度为 1.70 g/cm³,砂

柱高 33 cm, 每 10 cm 设一个测压管测水头高度。从土柱底部进水, 排气饱和, 洗盐 24 h, 然后从上部进水进行渗透系数的测定。

清洁砂柱渗透试验结束后, 排水 24 h。在土柱上部加入 200 ml 柴油, 柴油在重力作用下向下迁移, 自上而下穿透土柱, 土柱顶部不封闭, 柴油自由挥发, 充分接触直至土柱出水管不再有油沥出为止, 放置一周老化。然后, 从下部进水, 驱除孔隙中非稳定吸附滞留的柴油, 同时排空测压管中的柴油, 当出水中不再有油滴溢出时, 对土柱渗透系数进行测定。此方法消除了装样的影响。由于砂对石油的截留作用, 土柱各段的石油含量是不同的, 因而可以考察石油含量对土柱渗透系数的影响。

1.3.2 原油对砂渗透系数的影响 用常水头测定原油污染砂渗透系数时发现, 水分对砂柱不能充分饱和, 有优势流现象存在, 因此利用环刀法测定原油污染砂渗透系数。本试验用可以拆卸的有机玻璃短柱代替环刀, 每节短柱高 5 cm, 内径 4.9 cm, 在短柱内用相同击实功击实不同含油率的试样, 试样高度为 5 cm, 试样柱上端可接 1~2 节短柱, 加水进行渗透, 并保持水头基本不变, 待下端出水稳定时根据时间和流量计算渗透系数。

1.3.3 柴油和原油对壤土渗透性的影响 壤土的渗透系数较小, 采用变水头装置 (TWS-55 型改进型渗透仪) 对其进行渗透系数测定。在渗透用环刀 (高 40 mm, 内径 61.8 mm, 体积 60 cm³) 中制取相同土粒干密度 (1.57 g/cm³) 的试样。根据环刀体积和试样干密度计算所需油污土样, 按水土质量比为 1:10 将土样调匀、击实。试验前在饱和容器中对试样进行抽气并用水饱和, 排除气泡的影响。

2 结果与讨论

2.1 柴油污染对砂土渗透系数的影响

对清洁砂柱和柴油污染砂柱的渗透系数分别进行了测定, 由于砂柱各部分的渗透系数并不相同, 而且考虑到清洁砂柱被柴油污染之后, 砂柱各部分柴油含量不同, 因此分别测定了砂柱各段的渗透系数。图 2 为清洁砂污染前后砂柱各部分渗透系数的变化, 其中 1、2、3 分别代表图 1 中各部分的渗透系数, 4 代表砂柱的平均渗透系数。

由图 2 可知, 清洁砂土被柴油污染后, 砂柱各部分的渗透系数均有不同程度的下降, 整个砂柱的平均渗透系数下降了 64% 左右, 但渗透系数仍在同一数量级上。渗透试验结束后, 取砂柱表层砂和第 1、2、3 部分中间砂进行含油量分析, 含油率分

别为 3.5%、3.0%、1.25% 和 1.16%, 柴油含量从表层至底部逐渐减低, 可见经水淋滤后柴油在砂柱中的残留量并不大。砂柱各部分渗透系数分别是污染前的 25.6%、22.2% 和 63.2%。由于砂柱上部油含量比下部高, 砂柱上部渗透系数的变化较下部大。

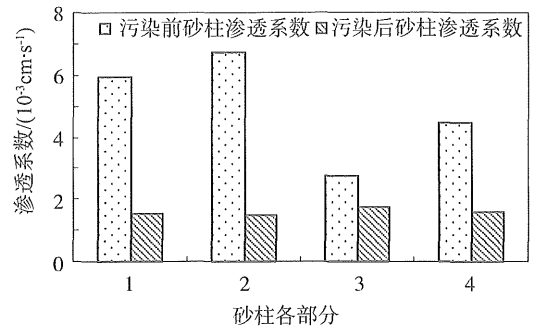


图 2 柴油污染前后清洁砂土渗透系数变化柱状图
Fig. 2 The permeability coefficient of sand before and after contaminated by diesel oil

柴油污染砂柱之前, 前两段渗透系数明显大于第 3 段渗透系数, 但柴油污染之后, 3 段渗透系数相差不多, 主要是前两段含油率较高, 受柴油的影响较第 3 段大。由于砂柱注油之前含水率较大, 因此其吸附的油量较小, 油主要在孔隙中存在, 向砂柱进水时, 大孔隙中的油可随水迁移, 而小孔隙中的油分受颗粒吸附力和毛细力作用仍可持留在砂柱中, 降低了砂柱的孔隙比, 因此砂柱的渗透系数降低。

2.2 柴油污染对壤土渗透系数的影响

将各含油率水平的壤土试样抽气、饱和, 装入变水头测定装置, 出水稳定后, 在不同时刻测定其渗透系数, 结果如图 3 所示。

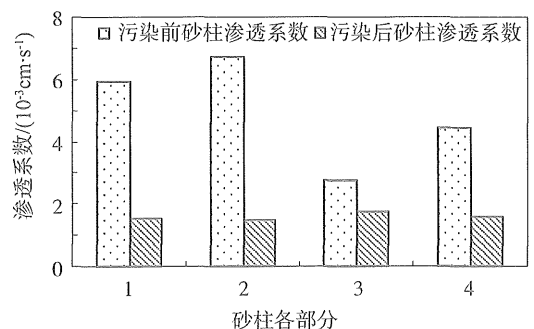


图 3 不同含油率下柴油污染壤土渗透系数的变化图
Fig. 3 The permeability coefficient of loam soils with different diesel oil contents

由图 3 可以看出, 在 0~8% 含油率范围内, 壤土的渗透系数随着含油率的增大而减小。含油率小于 4% 时, 渗透系数虽有减小, 但仍在同一数量级内; 含油率大于 4% 时, 壤土渗透系数的值下降了一至两个数量级; 8% 含油率的试样渗透系数降至 8×10^{-7} cm/s 左右, 比清洁土的渗透系数 (4×10^{-5} cm/s 左右) 下降了 98%; 12% 含油率试样的渗透系数略高于 6% 和 8% 含油率试样的渗透系数。

柴油在壤土中存在, 一部分以吸附态吸附于土壤颗粒表面, 另一部分是在土壤毛细孔隙中以液态存在。壤土由于其颗粒具有较大的比表面积, 对柴油具有一定的吸附能力。但是, 当有水存在时, 由于水的竞争对柴油的吸附力而大大减弱。含油量较低时, 柴油大部分吸附在土壤颗粒表面, 对水在孔隙中的运动影响不大。但当含油量较高时, 在土壤毛细孔隙中存在的油分会阻碍水分的运移, 造成渗透速率的减小。含油量进一步升高时, 油分会赋存在较大孔隙中, 此时毛细管力较小, 油分会被水驱替。试验中发现, 在含油率为 12% 时, 试样渗透装置出水中有大量油随水流出, 即说明含油率高于 12% 时孔隙中的油会被水驱替, 土壤孔隙比增大, 渗透系数不再随着含油率的升高而减小。

2.3 原油污染对砂土渗透系数的影响

不同含油率原油砂制样时采取相同击实功击实, 由于含油率不同, 对击实密度也有影响。图 4 为不同含油率的原油砂击实干密度 (砂粒不包括黏附油) 以及渗透系数。

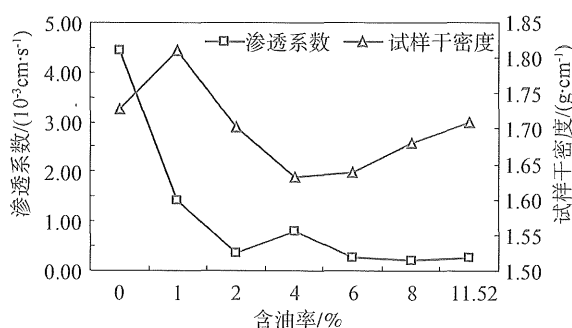


图 4 不同含油率原油污染砂土的干密度及其渗透系数的变化图

Fig. 4 The dry density and permeability coefficient of sands with different crude oil contents

对于同一种土来说, 孔隙比决定其渗透系数的变化。而孔隙比和土的干密度有关, 干密度越大, 其孔隙比越小。图 4 中 1% 含油率的砂样干密度最大, 而 4% 含油率砂样的干密度最小。与不同含水

率下砂土的击实原理^[10]相似, 砂的击实干密度受到含油率的影响。在相同击实功条件下, 清洁砂密度为 1.73 g/cm^3 , 1% 原油砂密度大于清洁砂密度, 主要是由于受颗粒表层附着原油的影响, 颗粒间较清洁砂不易滑动。当含油率小于 4% 时, 随着含油量的增加, 砂粒表面润滑性增加, 击实干密度减小。当原油含量大于 4% 时, 砂粒表面油膜厚度增加, 由于原油具有很大的粘滞性, 砂粒之间较难滑动, 团聚性增加, 因此干密度也随含油量增加而增加。

原油污染砂土的渗透系数并没有呈现随干密度减小 (增大) 而增大 (减小) 的趋势, 说明原油污染砂渗透性变化的原因并不仅在于干密度所控制的孔隙比。2% 和 1% 含油率的原油砂试样相比具有较小的干密度, 即具有较大的孔隙比, 但其渗透系数却比 1% 含油率砂样小, 这是因为黏附在砂粒表面的原油一方面减小了有效孔隙比, 另一方面改变了颗粒表面的性质, 使颗粒由亲水性变为疏水性。两方面的共同作用使得水分较难进入微孔隙, 降低了砂土的渗透性能。而 4% 含油率砂样由于其干密度最小, 含油率的影响小于干密度的影响, 因此其渗透系数较 2% 含油率砂样大。

当含油率大于 6% 时, 虽然砂土干密度变大, 但渗透系数却相差不大, 可能是因为较大的含油率在砂颗粒表面形成了疏水薄膜, 水分不能均匀由孔隙向下渗透, 而由于孔隙的不均匀性, 仍存在可供水分向下迁移的孔隙, 因此渗透系数较小, 但却受含油率影响不大。

2.4 原油污染对壤土渗透系数的影响

将含油率为 2%、4%、6%、8%、11.2% 的原油污染壤土试样抽气、饱和, 装入变水头测定装置, 出水稳定后, 在不同时刻测定其渗透系数, 结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 随着壤土中原油含量的增加, 壤土的渗透系数逐渐降低。含油量为 2% 时, 壤土的渗透系数比清洁壤土的渗透系数降低了 74% 左右, 说明土壤中原油的存在对壤土渗透系数影响很大。含油量为 8% 时, 土壤的渗透系数为 5×10^{-7} cm/s 左右, 比同一干密度清洁壤土的渗透系数降低了两个数量级; 含油量大于 8%, 在试验期间未观测到有水流出, 说明高含原油量土壤透水性很弱, 失去了运输水分的功能。

壤土中主要为微孔隙, 一旦有高粘滞性的原油存在, 即使含量很小, 也能堵塞孔隙, 阻碍水分运移, 含油量越高, 能运输水分的孔隙越少。当含油

量大于8%时,由于原油的粘滞性,颗粒之间孔隙几乎全被原油堵塞,本来相互连接的孔隙由于某个孔隙被原油堵塞,也会失去连通性,因此原油对壤土渗透性影响很大,通常情况下壤土层会失去透水功能,成为相对隔水层。

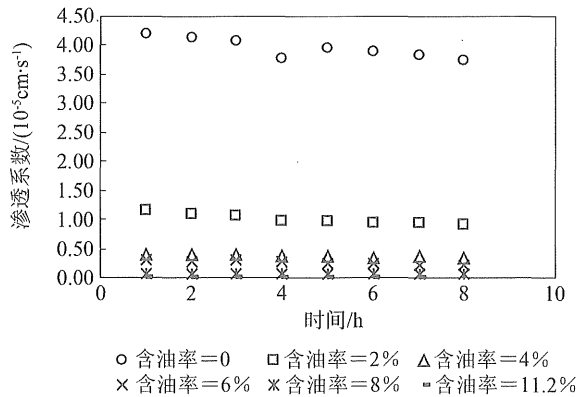


图5 不同含油率下原油污染壤土渗透系数的变化图

Fig. 5 The permeability coefficient of loam soils with different crude oil contents

3 结论

(1) 对于砂土,柴油污染清洁砂土后,可使砂土渗透系数降低64%左右;原油污染砂土后,含油率在6%~11.52%时,砂土的渗透系数降低了一个数量级,但由于孔隙的不均匀性,仍存在可供水分向下迁移的孔隙,渗透系数随含油率增加变化不大。

(2) 对于壤土,柴油污染壤土的渗透系数在8%含油率时比清洁壤土降低了97%左右;壤土中原油含量为8%时,其渗透系数为 5×10^{-7} cm/s左右,比同一干密度(1.57 g/cm³)清洁壤土的渗透系数降低了两个数量级,含油率增大,壤土的渗透性能更低,基本不透水。

(3) 无论是砂土还是壤土,原油引起的渗透系数的降低比柴油显著,主要是因为原油的粘滞系数大大高于柴油的粘滞系数。油品对土污染造成渗透系数降低的主要原因是油品黏附在土颗粒表面,改变了土的孔隙度。原油具有较高的粘滞性,一旦黏附在土颗粒表面不易随水流走,而如果土中柴油含量较高,则柴油容易随水流出,削弱柴油对土的渗透系数造成的影响。因此,对于石油污染土壤来说,原油污染对渗透系数影响较大。

参考文献:

- [1] 王东海,李广贺,贾道昌.石油类污染物在砂砾石层中的迁移与分布[J].环境科学,1998(5):18-21.
WANG Donghai, LI Guanghe, JIA Daochang. Transporting and distributing of petroleum pollutant in Grave[J]. Environmental Science, 1998(5): 18-21.
- [2] 郑西来,荆静,席临萍.包气带中原油的迁移和降解研究[J].水文地质工程地质,1998,(1):35-37.
ZHENG Xilai, JING Jing, XI Linping. The migration and degradation of crude oil in the vadose zone[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1998, (1): 35-37.
- [3] 黄廷林,史红星,任磊.石油类污染物在黄土地区土壤中竖向迁移特性试验研究[J].西安建筑科技大学学报,2001,33(2):108-111.
HUANG Tinglin, SHI Hongxing, REN Lei. An experimental study on transferring process of petroleum polluta[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2001, 33(2): 108-111.
- [4] 戴冬娟,李广贺,张旭,等.酸性土壤环境石油烃生物降解效应[J].环境科学,2005,26(3):146-150
DAI Dongjuan, LI Guanghe, ZHANG Xu, et al. Effects of acid soils on the biodegradation of hydrocarbons[J]. Environmental Science, 2005, 26(3): 146-150
- [5] 乔德波,牛明芬,徐丽,等.生物表面活性剂在石油污染土壤生物修复中的应用[J].安徽农业科学,2007,35(28):8965-8967,8976
QIAO Debo, NIU Mingfen, XU Li, et al. Application of bi-surfactant in the bioremediation of petroleum[J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2007, 35(28): 8965-8967, 8976
- [6] McLACHLAN A, HARTY B. Effects of crude oil on the supralittoral meiofauna of a sandy beach[J]. Marine Environmental Research, 1982, 7(1):71-79.
- [7] AL-SANAD H A, EID W K, ISMAEL N F. Geotechnical properties of oil contaminated Kuwaiti sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, ASCE 121(5): 407-412.
- [8] AIBAN A. The effect of temperature on the engineering properties of oil-contaminated sand[J]. Journal of Environmental International, 1998, 24: 153-161.
- [9] 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: 220-229.
- [10] 侍倩.土工试验与测试技术[M].北京:化学工业出版社,2004:104.