

张景环, 曾溅辉. 2006. 北京地区壤土对柴油的吸附作用研究 [J]. 环境科学学报, 26(2): 287-292

Zhang JH, Zeng JH. 2006. Sorption of diesel oil on loams in Beijing area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(2): 287-292

北京地区壤土对柴油的吸附作用研究

张景环, 曾溅辉*

中国石油大学(北京)盆地与油藏研究中心, 石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102200

收稿日期: 2005-08-03 修回日期: 2005-10-26 录用日期: 2005-11-15

摘要: 通过静态吸附实验, 研究了北京地区壤土对柴油的吸附行为, 考察了温度、溶液 pH 值、土壤有机质含量和粘土的矿物组成对柴油吸附的影响。结果表明, 4 种土样对柴油的吸附等温线均较好地符合 Langmuir 吸附模式, 其吸附能力的大小顺序为: 轻壤土 > 中壤土 > 砂壤土 > 重壤土; 温度和溶液 pH 值的升高, 不利于柴油的吸附, 温度从 10℃ 升高到 30℃, 柴油的饱和吸附量从 833.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ 降低到 263.2 $\mu\text{g g}^{-1}$, pH 值从 4 升高到 10, 柴油在重壤土、轻壤土、中壤土和砂壤土中的吸附量分别从 1012 $\mu\text{g g}^{-1}$ 、1800 $\mu\text{g g}^{-1}$ 、1377 $\mu\text{g g}^{-1}$ 和 1272 $\mu\text{g g}^{-1}$ 降低到 114 $\mu\text{g g}^{-1}$ 、236 $\mu\text{g g}^{-1}$ 、163 $\mu\text{g g}^{-1}$ 和 150 $\mu\text{g g}^{-1}$; 柴油的吸附量随土壤有机质含量的升高而增大, 且两者具有线性关系; 柴油的吸附量与蒙脱石含量具有线性正相关关系, 说明粘土中蒙脱石含量对吸附量的影响较大。

关键词: 吸附实验; 北京壤土; 柴油; 粘土

文章编号: 0253-2468(2006)02-0287-06 中图分类号: X74 文献标识码: A

Sorption of diesel oil on loams in Beijing area

ZHANG Jinghuan, ZENG Jianhui*

Basin & reservoir research center, China University of Petroleum (Beijing); Key Lab for Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education, Beijing 102200

Received 3 August 2005; received in revised form 26 October 2005; accepted 15 November 2005

Abstract Static experiments for sorption behaviour of diesel oil on loams in Beijing area were carried out to investigate the influence of temperature, pH, organic matter content and clay mineral components on sorption. The results indicated that the adsorption isotherms of diesel oil on four soils were well described by the Langmuir type and the adsorption capacity of diesel oil on the four soils from high to low was Light loam, Medium loam, Sand loam and Dense loam. The increase of temperature and pH was not favourable to adsorption. The maximum adsorbed quantity of diesel oil decreased from 833.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ to 263.2 $\mu\text{g g}^{-1}$ with increasing temperature from 10 °C to 30 °C. Increasing the pH from 4 to 10 led to the decrease of the adsorbed quantity on Dense loam, Light loam, Medium loam and Sand loam from 1012, 1800, 1377 $\mu\text{g g}^{-1}$ and 1272 $\mu\text{g g}^{-1}$ to 114, 236, 163 $\mu\text{g g}^{-1}$ and 150 $\mu\text{g g}^{-1}$, respectively. There was a positive linear correlation between the adsorbed quantity and organic matter content. A positive linear correlation was observed between the adsorbed quantity and them on montillonite content, which suggested that them on montillonite content of clay components had a great effect on adsorption.

Keywords adsorption experiment; loam; diesel oil; clay; Beijing

石油制品中应用最广的是汽油和柴油, 其主要成分为饱和烃、芳香烃、非烃和沥青质, 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 (Adam *et al.*, 2001)。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 (任磊等, 2000)。柴油进入土壤后, 会不断地被土

壤矿物和有机质所吸附, 这必然影响柴油在土壤中的迁移与分布。近年来, 加油站渗漏事故在国内外屡有发生, 在北京也曾发生过几起严重的加油站漏油事故, 北京目前有 1000 多家加油站, 地下储油罐和输油管时时刻刻都可能发生或正在发生渗漏, 都会对北京地区的土壤和地下水造成严重污染。

目前, 国内外有关石油类污染物吸附的研究报道较多。已有研究表明, 不同有机污染物在不同类

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 40372109)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40372109)

作者简介: 张景环 (1982—), 女, 硕士研究生, E-mail: vickyhuan@163.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: ZHANG Jinghuan (1982—), female master candidate, E-mail: vickyhuan@163.com; * Corresponding author

型土壤中的吸附行为存在很大差异,沈抚污水灌区土壤对低浓度可溶性柴油的吸附等温线为直线型(郑西来等, 2003);油类在淄河沙滩砂砾石层中的吸附等温线符合 Langmuir 吸附模式,且吸附量较小(王东海等, 1998);含 PAHs 的表层砂质壤土对菲的吸附等温线属直线型(Qu *et al.*, 1995);高岭石对菲的吸附等温线符合 Freundlich 吸附模式,且人为重有机污染物会增大菲的吸附量(Gaboriau *et al.*, 2001).而有关北京土壤对柴油的吸附行为及影响因素的研究尚未见报道.鉴于北京地区表层土主要以壤土为主(张万儒等, 2005; 谢经荣等, 1997; 孙向阳, 2002),本文以北京壤土和柴油为研究对象,通过静态吸附实验确定北京地区壤土对柴油的吸附等温线,并分析影响柴油吸附的因素,为北京地区柴油污染土壤的修复提供理论依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 实验仪器与试剂

仪器: HZQ-C 空气浴恒温振荡器(哈尔滨市东明医疗仪器厂); LD4-2A 型离心机(北京医用离心

机厂); UV-260型紫外可见分光光度计(日本岛津公司); pH S-2CA 型酸度计(上海大中分析仪器厂); DM ax-RC 型粉晶 X 射线衍射仪(日本理学电机公司).

试剂: 0.1 mol L⁻¹的 H₂SO₄溶液、0.1 mol L⁻¹的 NaOH 溶液、0[#]柴油.

1.2 土样的采集与分析

实验所用 5 种土样采自北京昌平区,采样深度为 0~20cm,样品经自然风干、研碎及 2mm 筛筛分,放入烘箱(100℃)烘干后储存于广口瓶中备用.按土壤农业化学常规分析方法(中国土壤学会农业化学专业委员会, 1989)测定了土壤的 pH 值(水土质量比为 2.5:1, 电位法)、有机质含量(重铬酸钾氧化外加法)和土壤机械组成(吸管法),依据前苏联制定的标准分析了土壤质地,结果如表 1 所示(由中国农科院土壤肥料研究所土壤室测定).由表 1 可知,土壤 pH 值的变化范围为 8.05~8.45 说明 5 种土壤均为碱性土壤;土壤有机质质量分数的变化范围较大(0.46%~5.26%).

表 1 土样的机械组成及主要性质

Table 1 Mechanical composition and major characteristics of soil samples

土样编号	土壤质地	pH 值	有机质 质量分数	机械组成			
				> 2mm	2~0.01 mm	0.01~0.001 mm	< 0.001 mm
1	重壤土	8.12	0.46%	0	51.2%	36.1%	12.7%
2	轻壤土	8.05	5.26%	20.7%	53.5%	12.8%	12.9%
3	中壤土	8.33	1.09%	12.0%	50.4%	18.6%	19.0%
4	砂壤土	8.45	1.30%	36.4%	45.8%	9.9%	7.7%
5	轻壤土	8.24	1.07%	5.8%	64.4%	15.8%	14.0%

1.3 粘粒的提取与分析

采用虹吸管法将粘粒从 5 种不同土壤中提取出来,并进行 X-射线衍射定量分析,得到了粘土的矿物组成,结果见表 2(由国家建筑材料工业地质工程勘察研究院测试中心分析).表 2 表明,5 种不同粘土中均含有蒙脱石、伊利石、高岭石、石英、长石和海泡石 6 种粘土矿物,其中伊利石含量最高,蒙脱石次之,高岭石再次之,而石英、长石和海泡石的含量较低,说明粘土中对有机污染物起吸附作用的主要是蒙脱石、伊利石和高岭石.

表 2 粘土的矿物组成

Table 2 Mineral components of five clays

样品编号	蒙脱石	伊利石	高岭石	石英	长石	海泡石
1	23.2%	62.8%	7.1%	3.4%	3.6%	0
2	19.9%	59.0%	11.4%	2.4%	3.8%	3.6%
3	30.9%	51.8%	9.2%	3.8%	4.3%	0
4	25.1%	58.5%	7.2%	3.4%	3.4%	2.4%
5	28.2%	47.4%	15.0%	3.6%	2.7%	3.2%

1.4 柴油饱和溶液的制备

向 1000 mL 蒸馏水中滴加过量 0 柴油,充分搅拌后,静置一段时间,使柴油溶液达到饱和,然后用胶皮管从水桶底部抽取柴油饱和溶液,用紫外分光光度法测定其含油量为 27.01 mg L^{-1} (郑西来等, 2003).

1.5 实验方法

1.5.1 不同土样对柴油吸附等温线的测定 分别称取 1 g 土样 (1~4号) 置于 150 mL 具塞锥形瓶中,加入 100 mL 浓度分别为 27.01、24.31、20.26、16.21、12.96、10.80、6.48、3.24、1.62、0.756 mg L^{-1} 的柴油溶液,恒温 (20°C) 振荡 (频率为 140 r min^{-1}) 24 h 然后静置 2 h,取上层清液离心分离 (4000 r min^{-1}) 45 min,然后取上层清液用紫外分光光度法测定柴油的浓度,最后计算吸附量 (Szymula *et al.*, 2002). 固相吸附量的计算式为 (Panyeszi *et al.*, 1998):

$$S = (\rho_0 - \rho) V/m \quad (1)$$

式中, S 为土壤对柴油的吸附量, $\mu\text{g g}^{-1}$; ρ_0 为液相起始浓度, mg L^{-1} ; ρ 为液相平衡浓度, mg L^{-1} ; V 为溶液体积, L; m 为土样质量, g 对每种土样分别以 $S - \rho$ 作图.

1.5.2 温度对柴油吸附量的影响 分别称取 1 g 土样 (2号) 置于 150 mL 具塞锥形瓶中,加入 100 mL 浓度分别为 27.01、24.31、20.26、16.21、12.96、10.80、6.48、3.24、1.62、0.756 mg L^{-1} 的柴油溶液,分别在 10°C 、 20°C 和 30°C 下恒温振荡 (140 r min^{-1}) 24 h 以下同吸附等温线的测定方法. 在 10°C 、 20°C 和 30°C 下,分别以 $S - \rho$ 作图.

1.5.3 pH 值对柴油吸附量的影响 称取 1 g 土样 (1~4号) 置于 150 mL 具塞锥形瓶中,加入 100 mL 柴油饱和溶液,再加入 0.1 mol L^{-1} 的 H_2SO_4 或 NaOH 溶液调节 pH 值,恒温 (20°C) 振荡 (140 r min^{-1}) 24 h 后,测定溶液的 pH 值,经过多次实验摸索,确定加入的 H_2SO_4 或 NaOH 的量,在振荡前,加好酸或碱的量,使平衡后溶液的 pH 值分别为 4、5、6、7、8、9、10,以下同吸附等温线的测定方法. 对每种土样分别以 $S - \text{pH}$ 作图.

1.5.4 有机质含量对柴油吸附量的影响 采用机械组成相近、而有机质含量相差很大的 5号土样 (有机质含量为 1.07%) 和 2号土样 (有机质含量为 5.26%), 将 5号和 2号土样按 1:0.9:0.1、0.7:0.3、0.5:0.5、0.3:0.7、0.1:0.9、0:1 的质量比,

称取总量 1 g 置于 150 mL 具塞锥形瓶中,加入 100 mL 柴油饱和溶液,以下同吸附等温线的测定方法. 以有机质含量对吸附量 S 作图.

1.5.5 粘土的矿物组成对柴油吸附量的影响 分别称取 1 g 粘粒置于 150 mL 具塞锥形瓶中,加入 100 mL 柴油饱和溶液,以下同吸附等温线的测定方法. 以 5种粘土的蒙脱石含量、伊利石含量和高岭石含量对吸附量 S 作图.

2 结果 (Results)

2.1 不同土样对柴油的吸附等温线

柴油在不同土样中的吸附等温线如图 1 所示. 由图 1 可知, 4种土样对柴油的吸附等温线均为非线性的, 同一液相起始浓度下, 4种土样对柴油的吸附量存在较大差异, 其对柴油的吸附量的大小顺序为: 轻壤土 > 中壤土 > 砂壤土 > 重壤土.

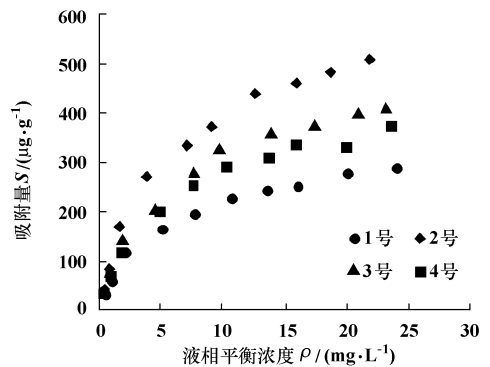


图 1 不同土样对柴油的吸附等温线

Fig. 1 Adsorption isotherms of diesel oil on different soils

2.1 影响柴油在不同土样中吸附量的因素

图 2a 为不同温度下, 柴油在 2号土样中的吸附等温线. 图 2a 表明, 2号土样对柴油的吸附量随温度的升高而降低, 当液相起始浓度为 27.01 mg L^{-1} 时, 温度从 10°C 升高到 30°C , 柴油的吸附量从 $710 \mu\text{g g}^{-1}$ 降低到 $216.04 \mu\text{g g}^{-1}$.

图 2b 为 pH 值对柴油吸附量的影响. 由图 2b 可知, 柴油在 4种土样中的吸附量均随 pH 值的升高而降低. pH 值从 4 升高到 10 柴油在 1号、2号、3号 和 4号土样中的吸附量分别从 1012、1800、1377 和 $1272 \mu\text{g g}^{-1}$ 降低到 114、236、163 和 $150 \mu\text{g g}^{-1}$.

图 2c 为土壤有机质含量对柴油吸附量的影响. 图 2c 表明, 柴油的吸附量随有机质含量的升高而增大, 有机质含量从 1.07% 升高到 5.26%, 吸附量从

233 $\mu\text{g g}^{-1}$ 增大到 515 $\mu\text{g g}^{-1}$. 对实验数据进行线性回归分析, 得到可决系数 R^2 为 0.9869, 采用 r^2 检验法进行检验(吴 翊等, 2003), 样本量 $n=7$, 设显著性水平 $\alpha=0.05$ 则可决系数检验临界值 $r_{1-\alpha}(n-2)=0.7545$, 因为 $|r|>r_{1-\alpha}(n-2)$, 说明回归方程对实验数据的拟合效果较好.

图 2d为蒙脱石、伊利石和高岭石含量对柴油吸

附量的影响. 图 2d表明, 粘粒对柴油的吸附量随蒙脱石含量的升高而增大, 对实验数据进行线性回归分析, 得到可决系数 R^2 为 0.9808, 用 r^2 检验法进行检验(吴 翊等, 2003), 样本量 $n=5$ 设显著性水平 $\alpha=0.05$ 则可决系数检验临界值 $r_{1-\alpha}(n-2)=0.8783$, 因为 $|r|>r_{1-\alpha}(n-2)$, 说明回归方程对实验数据的拟合效果较好.

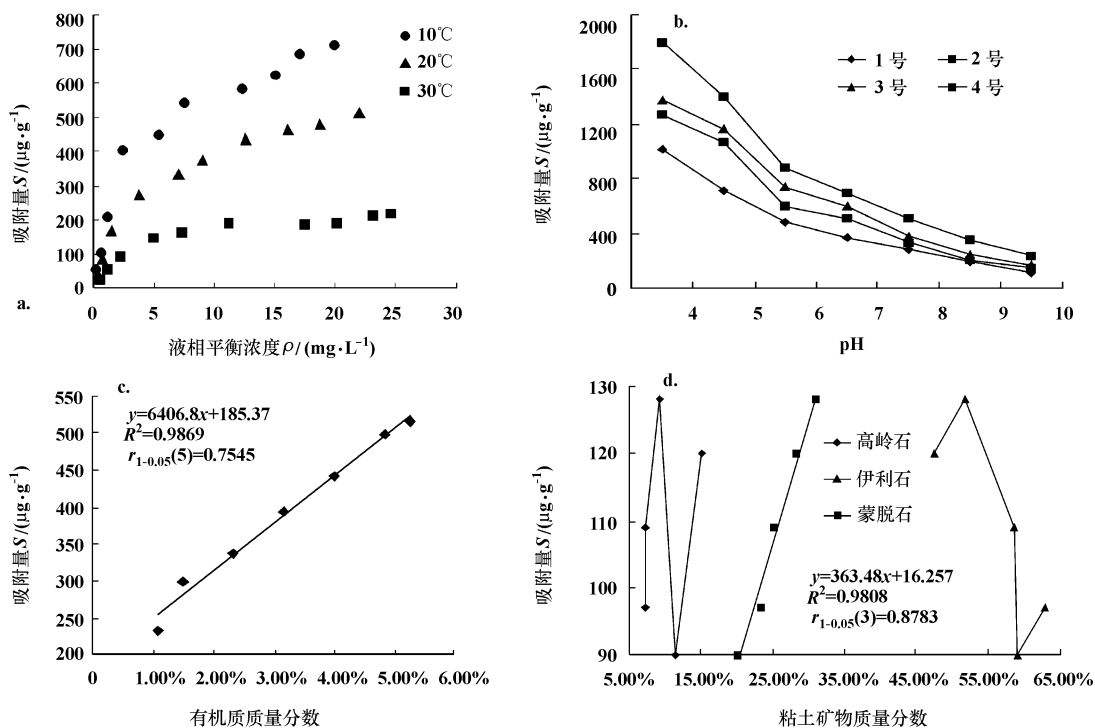


图 2 不同因素对柴油在土壤中吸附量的影响

Fig. 2 Effect of different factors on adsorbed quantity of diesel oil on soil

3 讨论 (Discussion)

3.1 柴油吸附等温线的拟合

用 Langmuir方程对图 1中的吸附等温线进行拟合, 其线性关系式可表示如下(Aksoy 2005):

$$1/S = 1/S_m \cdot K + 1/\rho + 1/S_m \quad (2)$$

式中, S 为土壤对柴油的吸附量, $\mu\text{g g}^{-1}$; S_m 为土壤对柴油的饱和吸附量, $\mu\text{g g}^{-1}$; K 为吸附系数, L mg^{-1} , K 值反映土壤吸附能力的强弱, K 值越大, 土壤对柴油的吸附能力越强; ρ 为液相平衡浓度, mg L^{-1} . 对 $1/S - 1/\rho$ 进行线性回归分析, 并用 r^2 检验法进行检验(吴 翊等, 2003), 其吸附参数、样本量 n 、显著性水平和检验临界值 $r_{1-\alpha}(n-2)$ 如表 3 所示. 表 3 表明, $|r|$ 均大于 $r_{1-0.05}(8)$, 说明 4 种土样对柴油的吸附等温线均较好地符合 Langmuir 吸

附模式. 由于 4 种土样的 pH 值、有机质含量和机械组成存在一定的差异, 其对柴油的吸附系数 K 不同, 1~4 号土样的 K 值分别为 0.193、0.218 和 0.203 和 0.199 L mg^{-1} , 说明其对柴油的吸附能力不同, 其大小顺序为: 2 号土样 > 3 号土样 > 4 号土样 > 1 号土样.

表 3 不同土样对柴油的吸附参数

Table 3 Adsorption parameters of diesel oil on different soils

土样编号	S_m $/(\mu\text{g g}^{-1})$	K $/(\text{L mg}^{-1})$	$ r $	n	α	$r_{1-0.05}(8)$
1	344.8	0.193	0.9981			
2	588.2	0.218	0.9990			
3	499.6	0.203	0.9971	10	0.05	0.6319
4	454.5	0.199	0.9950			

3.2 温度对吸附量的影响

用 Langmuir 方程对图 2a 中的吸附等温线进行拟合,并用 r^2 检验法进行检验(吴翊等, 2003),其吸附参数、样本量 n 、显著性水平 α 和检验临界值 $r_{1-\alpha}(n-2)$ 如表 4 所示。由表 4 可知, $|r|$ 均大于 $r_{1-0.05}(8)$, 说明不同温度下,柴油在 2 号土样中的吸附等温线均较好的符合 Langmuir 吸附模式。表 4 结果表明,温度升高不利于柴油的吸附,柴油的饱和吸附量也随温度的升高而降低,温度从 10℃ 升高到 30℃,饱和吸附量从 833.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ 降低到 263.2 $\mu\text{g g}^{-1}$ 。这主要是因为随着温度的升高,柴油的粘度降低,流动性增大,油水之间的密度差增大,有利于柴油从土壤表面分离出来,从而降低了柴油的吸附量。

表 4 不同温度下,2号土样对柴油的吸附参数

Table 4 Adsorption parameters of diesel oil on Soil 2 at different temperatures

温度 /℃	S_m /($\mu\text{g g}^{-1}$)	K /(L mg^{-1})	$ r $	n	α	$r_{1-0.05}(8)$
10	833.3	0.273	0.9980			
20	588.2	0.218	0.9993	10	0.05	0.6319
30	263.2	0.108	0.9969			

3.3 pH 值对吸附量的影响

pH 值会影响土壤胶体的电荷分布和原油中各组分的形态分布,pH 值的升高会增大沉积硅土表面的电荷密度从而增大硅土对表面活性剂的吸附量(Pradumook *et al.*, 2003)。本研究表明,pH 值升高不利于柴油的吸附,这主要是因为,pH 值增大时,溶液中的无机碱与柴油中的有机酸和酸性组分反应生成表面活性物质,不利于柴油的吸附;另一方面,无机碱同土壤颗粒表面发生相互作用,改变了土壤的表面结构及电性质,从而减小了吸附效果(李静等, 1997)。

表 5 粘土矿物的结构及主要性质(王晓蓉, 1993)

Table 5 Structure and main characteristics of three clays

粘土矿物	晶层结构	比表面积 /($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	CEC /(cmol kg^{-1})	层间距 /nm	粒径 /mm
蒙脱石	2:1 型	700~ 800	80~ 100	1.40~ 1.50	< 1
伊利石	2:1 型	100~ 200	20~ 40	1.00~ 1.05	< 2
高岭石	1:1 型	5~ 20	5~ 15	0.70~ 0.73	> 2

4 结论 (Conclusions)

1) 4 种不同土样对柴油的吸附等温线均较好的

我国土壤具有南酸北碱的特点,南方地区土壤多为酸性土壤,相同条件下,其吸附柴油的能力较强,有机污染物不易向下迁移而污染地下水;而北京地区土壤属碱性土壤,相同条件下,对柴油的吸附能力较弱,油类污染物易穿过包气带进入地下水层,从而造成地下水污染。

3.4 土壤有机质含量对吸附量的影响

有研究表明,PAHs 在不同土壤中的吸附量随土壤有机质含量的升高而增大(Walter *et al.*, 2000),但这只是定性的描述。本研究结果显示,柴油的吸附量与土壤有机质含量具有线性关系,但是简单地将土壤对非离子型有机污染物的吸附归结于有机质含量的高低是不合适的,需要综合考虑多种因素的影响(Garbarini *et al.*, 1986)。

3.5 粘土的矿物组成对吸附量的影响

图 2d 表明,柴油的吸附量随蒙脱石含量的升高而增大,且两者具有线性关系,说明蒙脱石含量对柴油的吸附量的影响较大,这主要是由于 3 种粘土矿物的结构和性质不同的缘故。粘土矿物的比表面积越大,其物理吸附能力就越强;粘土矿物的层间距越大,有机化合物分子越易进入晶层间,有机污染物在矿物表面的吸附量就越大(Pan *et al.*, 2005)。表 5 列出了 3 种粘土矿物结构及性质,由表 5 可知,蒙脱石和伊利石的晶层结构均属于 2:1 型晶格,蒙脱石具有较大的比表面积,且层间距较大,因而其吸附柴油的能力较强;而伊利石的比表面积比蒙脱石的小得多,层间距又较小,因而其吸附柴油的能力较蒙脱石弱。高岭石的晶层结构属于 1:1 型晶格,比表面积和层间都很小,故其对柴油的吸附能力较蒙脱石和伊利石都弱。因此,3 种粘土矿物对柴油吸附能力的大小顺序为:蒙脱石 > 伊利石 > 高岭石。

符合 Langmuir 吸附模式,其吸附系数分别为 0.193、0.218、0.203 和 0.199 $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$,说明 4 种壤土对柴油的吸附能力不同,其大小顺序为:轻壤土 > 中壤

土 > 砂壤土 > 重壤土。这主要是由于 4 种土样的 pH 值、有机质含量和机械组成不同的缘故。

2) 温度和溶液 pH 值的升高, 不利于柴油的吸附。温度从 10 °C 升高到 30 °C, 柴油的饱和吸附量从 833.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ 降低到 263.2 $\mu\text{g g}^{-1}$; pH 值从 4 升高到 10 柴油在 1 号、2 号、3 号和 4 号土样中的吸附量分别从 1012、1800、1377 和 1272 $\mu\text{g g}^{-1}$ 降低到 114、236、163 和 150 $\mu\text{g g}^{-1}$ 。

3) 柴油的吸附量随土壤有机质含量的升高而增大, 且与土壤有机质含量具有线性关系。

4) 柴油在不同矿物组成的粘土中的吸附量随蒙脱石含量的升高而增大, 且两者具有线性关系, 说明蒙脱石含量对柴油吸附量的影响较大。

通讯作者简介: 曾斌辉 (1962—), 男, 博士生导师, 教授。主要研究方向为: 地下水-土壤环境与污染、油气运移和聚集的教学和科研工作。E-mail: zengjh@cup.edu.cn

参考文献 (References):

- Adam G, Gamoh K G, Morris D, *et al.* 2001. Effect of alcohol addition on the movement of petroleum hydrocarbon fuels in soils [J]. *Sci Total Environ*, 286: 15—25
- Agricultural Chemistry Committee Soil Science Society of China. 1989. *Conventional Analysis Methods of Soil Agricultural Chemistry* [M]. Beijing: Science Press, 12—16, 22—29, 272—282 (in Chinese)
- Aksu Z. 2005. Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review [J]. *Process Biochemistry*, 40 (3—4): 831—847
- Gaboriau H, Saada A. 2001. Influence of heavy organic pollutants of anthropic origin on PAH retention by kaolinite [J]. *Chemosphere*, 44: 1633—1639
- Garbarini D R, Lion L W. 1986. Influence of the nature of soil organics on the sorption of toluene and trichloroethylene [J]. *Environ Sci Technol* 20(12): 1263—1269
- Li J, Zhang J Y, Xia S L, *et al.* 1997. Adsorption and desorption of crude oil on soils [J]. *Environ Sci and Technol* 79(4): 5—8
- Pan C C, Feng J H, Tian Y M, *et al.* 2005. Interaction of oil components and clay minerals in reservoir sandstones [J]. *Organic Geochemistry*, 36: 633—654
- Pemyszi T, Patko A, Berkesi O, *et al.* 1998. Asphaltene adsorption on clays and crude oil reservoir rocks [J]. *Colloids and Surfaces* 137: 373—384
- Pradumook T, O'Haver J H, Malakul P, *et al.* 2003. Effect of pH on adsorbilization of toluene and acetophenone in to adsorbed surfactant on precipitated silica [J]. *Colloids and Surfaces* 224: 93—98
- Qu Z Q, Yediker A, Kettner A, *et al.* 1995. Effects of alkylbenzene sulfonate (LAS) on the adsorption behavior of phenanthrene on soils [J]. *Chemosphere*, 30(2): 313—325
- Ren L, Huang T L. 2000. Petroleum contamination of soil [J]. *Agric environmental Protection*, 19(16): 360—363 (in Chinese)
- Sun X Y. 2002. Clay minerals and surface chemical characteristics of soils developed under a paleosol in lower West Mountain area of Beijing [J]. *Journal of Beijing Forestry University* 24(5/6): 35—38 (in Chinese)
- Szymula M, W Marczewski A. 2002. Adsorption of asphaltenes from toluene on typical soils of Lublin region [J]. *Applied Surfaces Sci* 196: 301—311
- Walker T, Ederer H J, Forst C, *et al.* 2000. Sorption of selected polycyclic aromatic hydrocarbons on soils in oil contaminated systems [J]. *Chemosphere*, 41: 387—397
- Wang D H, Li G H, Jia D C. 1998. Transporting and distributing of petroleum pollutant in gravel [J]. *Environ Sci* 19(5): 18—21 (in Chinese)
- Wang X Y. 1993. *Environmental Chemistry* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 207—209 (in Chinese)
- Wu Y, Li Y L, Hu Q J. 2003. Application of mathematical theory Stat [M]. Beijing: National Defence University of Science and Technology Press, 149—155, 430 (in Chinese)
- Xie J Y, Dai X Y, Huang Y F, *et al.* 1997. Annual mutative rules of abiotic nitrogen in different farmland soil section in Shunyi area of Beijing [J]. *Chinese Journal of Soil Sci* 28(2): 76—78 (in Chinese)
- Zhang W R, Yang G Y. 2005. The effects of falling dust of strong dust storms on Beijing soils [J]. *Forest Research*, 18(1): 66—69 (in Chinese)
- Zheng X L, Li Y L, Lin G Q, *et al.* 2003. Adsorption of aqueous oil on soils and its analysis of effective factors [J]. *Earth Sci* 28(5): 563—567 (in Chinese)

中文参考文献:

- 李 静, 张耀耀, 夏盛林, 等. 1997. 原油在土壤中的吸附和解吸作用 [J]. *环境科学与技术*, 79(4): 5—8
- 任 磊, 黄廷林. 2000. 土壤的石油污染 [J]. *农业环境保护*, 19(16): 360—363
- 孙向阳. 2002. 北京西山古土壤母质上发育的土壤之粘粒矿物与表面化学特性 [J]. *北京林业大学学报*, 24(5/6): 35—38
- 王东海, 李广贺, 贾道昌. 1998. 石油类污染物在砂砾石层中的迁移与分布 [J]. *环境科学*, 19(5): 18—21
- 王晓蓉. 1993. *环境化学* [M]. 南京: 南京大学出版社, 207—209
- 吴 翊, 李永乐, 胡庆军, 等. 2003. *应用数理统计* [M]. 北京: 国防科技大学出版社, 149—155, 430
- 谢经荣, 戴祥韵, 黄元仿, 等. 1997. 北京顺义县不同地貌类型粮田土壤剖面无机态氮周年变化规律 [J]. *土壤通报*, 28(2): 76—78
- 张万儒, 杨光滢. 2005. 强沙尘暴降尘对北京土壤的影响 [J]. *林业科学研究*, 18(1): 66—69
- 郑西来, 李永乐, 林国庆, 等. 2003. 土壤对可溶性油的吸附作用及其影响因素分析 [J]. *地球科学*, 28(5): 563—567
- 中国土壤学会农业化学专业委员会. 1989. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京: 科学出版社, 12—16, 22—29, 272—282