

泄漏原油沿河岸滞留行为

汪 澍¹, 徐 胜¹, 杨玉锋^{1,2}, 金龙哲¹, 王 洋¹, 张 晶³

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 中国石油天然气股份有限公司管道分公司管道科技研究中心, 河北廊坊 065000; 3. 清华大学工程物理系, 北京 100084)

摘要:为研究输油管道泄漏事故发生后,河面漂浮原油在河岸的滞留行为与影响因素,通过河流动态模拟试验,设置流速、岸型、植被种类及覆盖量等变量,研究不同工况下河岸砂土吸附量与总滞留量的变化规律。结果表明:河岸砂土的吸附量及滞留量会随水面流速增大而增大;柔性植物河岸相对于刚性植物河岸与无植物河岸更易滞留原油,滞留量约为刚性植物河岸的 2.87~6.19 倍,无植物河岸的 4.37~10.01 倍;植被覆盖量增大会使河岸滞留量增大,但会减小刚性植物河岸吸附量,增加柔性植物河岸吸附量;岸型不同会导致水流状态不同,对原油登陆河岸会有较特殊的作用。

关键词:输油管道;原油扩散;吸附;滞留;岸栖植物

中图分类号:X 524 **文献标志码:**A

引用格式:汪澍,徐胜,杨玉锋,等. 泄漏原油沿河岸滞留行为[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(2): 144-150.

WANG Shu, XU Sheng, YANG Yufeng, et al. Retention behavior of spilled oil along riverbank[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(2): 144-150.

Retention behavior of spilled oil along riverbank

WANG Shu¹, XU Sheng¹, YANG Yufeng^{1,2}, JIN Longzhe¹, WANG Yang¹, ZHANG Jing³

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. PetroChina Pipeline R & D Center, Langfang 065000, China;
3. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To study the retention behavior and influencing factors of crude oil along riverbank after an oil spill, by controlling variables including flow velocity, bank type, vegetation type and coverage in a dynamic circulating channel, the variation of substrate adsorption and riparian oil-holding capacity under different conditions were studied. The results show that, the adsorption and retention amounts of the sand (plant-free) banks rise with the increase of the water flow rate. Flexible plant banks are more likely to retain crude oil than rigid plant banks and plant-free banks. The oil-holding capacity is about 2.87 to 6.19 times of rigid plant banks, and around 4.37 to 10.01 times of plant-free banks. Increasing vegetation coverage would increase the riparian retention, but might reduce the amount of substrate adsorption of rigid plant banks while increase the substrate adsorption of flexible plant banks. The bank morphology would have special effect on the landing behavior of oil due to the change in flow pattern along the river margin areas.

Keywords: oil pipeline; crude oil diffusion; adsorption; retention; riparian vegetation

随着全球工业化发展和人口增长,石油的供求也飞速增长,石油开采规模不断扩大,长输管道逐渐成为跨区域石油运输的主要方式。然而输油管道由

于腐蚀、破裂等原因,可能发生原油泄漏事故,对环境和人类造成危害^[1-4]。进入河流的泄漏原油存在蒸发、溶解、乳化、吸附、解吸等行为^[5]。与开阔水

域不同,河流上的油膜较厚,并且两侧河岸的存在会使得原油大量滞留在岸上。河流流速以及河岸岸型、植被等会对滞留量产生影响。国内外关于泄漏石油及石油类污染物迁移规律的研究已开展多年,土柱试验是研究石油烃在土壤中的运移规律的常用方法^[6-8]; Brönnner 等^[9-12]构建了扩散模型、最大黏附量模型等数学模型用来研究原油运移规律;李志刚等^[13-14]利用 VOF 等不同的方法进行模拟研究了溢油疏散规律。在岸栖植物对河流流动的影响方面,现已通过水槽实验研究了刚性植物、柔性植物等不同布置方式下对水流状态的影响^[15-18]。但是当前国内外对于原油在河岸滞留行为及水流影响因素与溢油相结合的模拟试验研究较为匮乏。此外,现今对溢油的研究主要以海洋环境为主,在河流溢油方面比较缺乏。因此笔者通过水槽试验将河流岸型、流速、岸栖植物等因素与原油泄漏扩散规律相结合,研究跨越式管道持续泄漏事故发生时,原油在河岸的滞留行为及相关规律。

1 试验材料与方法

1.1 试验设备及材料

试验设备:HZQ-C 空气浴振荡器、TG16G 离心机、UV2100 型紫外可见分光光度计、ML104/02 型电子天平和 CJ-060S 超声波清洗机。

试验试剂:正己烷(分析纯)、无水硫酸钠(分析纯)、低浓度俄罗斯原油。

玻璃仪器:10 mL 比色管、50 mL 量筒、50 mL 分液漏斗、50 mL 具塞磨口锥形瓶、500 mL 锥形瓶、800 mL 烧杯等。

试验用砂土:试验模拟河岸为砂质河岸,河岸配土^[19]为粗砂、中砂、细砂、高岭土和粉砂,其质量分数分别为 34%、35%、22%、7%和 2%。

试验水槽:根据相似比例尺、河流层流紊流、弯道曲折系数等^[20]自行设计制作出试验水槽;水槽的宽度为 25 cm,高度为 30 cm,弯道直径为 30 cm,水槽总长度为 230 cm,水槽外部涂成白色,内壁涂有特氟龙疏油材料。水槽模型如图 1 所示。

1.2 试验方法

1.2.1 标准油浓度曲线测定

根据对水或土壤中含油污染物测定方法的调研及相关规定^[21-22],选用紫外法进行标准油浓度曲线的测定。首先,在烧杯中加入 0.5 g 原油和少量正己烷,用正己烷在容量瓶中标定混合液,制得 5 mg/mL 的油标准储备液。其次,取 2 mL 油标准储备液

于 50 mL 容量瓶,用正己烷定容,摇匀,制得 0.2 g/L 的油标准使用液。用针管分别移取 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 油标准使用液于 10 mL 容量瓶中,加正己烷至标线。摇匀后,得到质量浓度 c 分别为 0、4、8、12、16、20 mg/L 的油溶液。取溶液于 1 cm 石英比色皿中。分别用紫外分光光度计测取吸光率。统计测量数据,绘制标准油质量浓度曲线(图 2)。曲线拟合方程为 $y=0.025x-0.048$,拟合度 R^2 为 0.982,拟合程度高。

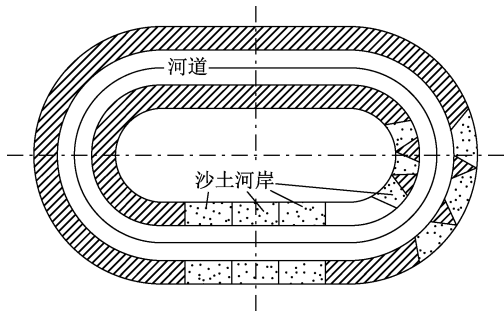


图 1 水槽模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of annular tank

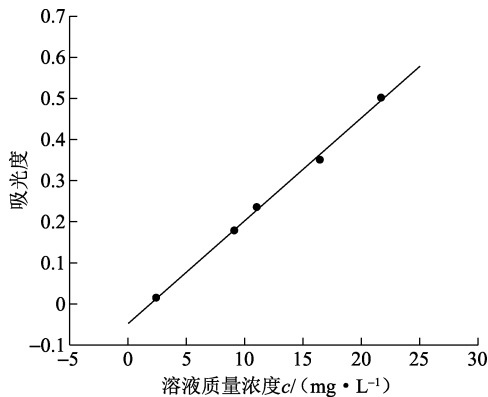


图 2 标准油质量浓度曲线

Fig. 2 Standard oil mass concentration curve

1.2.2 不同工况下河岸滞留量测定

设置泄漏点距离水面 19 cm,溢油量为 250 mL,河岸分为 3 个内外直岸和 3 个内外弯岸(图 1),河岸坡度为 11.3°。在水槽中距监测点较远处放置水泵,通过控制水泵的变频器调节流速。为了提高试验效率,河岸布置设计为直道和弯道上分别为无植物河岸、刚性植物河岸、柔性植物河岸。将流速变频器分别调节至 20、25、30、35 Hz。用摄像机录制原油泄漏扩散过程和结束后的原油扩散黏附状态,录制时长 2 h。

为了更加详细地研究植物覆盖面积对河岸滞留情况的影响,设置了不同植物覆盖面积下原油在河岸滞留规律的试验,试验方法与上述试验类似,选取刚性和柔性两种植物类别进行 3 组试验(图 3),河

岸布置设计分别为直道和弯道上各自为少量、中量、大量植物。对于刚性植物采用单位面积植物株数表示覆盖程度,少量、中量和大量的单位面积植物株数分别为 0.03、0.05 和 0.09 株/cm²。对于柔性植物覆盖量采用植被覆盖度表示,少量、中量和大量分别为 10.4%、15.8% 和 18.3%。

试验结束后,收集并测量河岸前端滞留的原油量,作为水面滞留量,取出河岸中的砂土以及植物,萃取砂土和植物中的原油,根据标准油质量浓度曲线测出砂土的吸附量和植物的黏附量,水面滞留量、黏附量与吸附量总和即为最终河岸的总滞留量。



图 3 试验选用的模拟植物材料
Fig. 3 Simulated plant material selected for experiment

1.2.3 水流流速标定

在水槽直道和弯道分别放置标尺,摆至井字型,摄像机垂直设置在标尺上方,水中放入少量碎塑料片用于标定流过的距离,用摄像机录取 10 min 视频,通过 PS 进行比例修正,通过图像处理及计算标定得到不同频率下对应的内外直道、弯道的流速。表 1 为标定结果。

表 1 不同频率对应的流速
Table 1 Flow rate at different frequency

频率 <i>f</i> /Hz	流速/(cm·s ⁻¹)				断面
	直岸 内侧	直岸 外侧	弯岸 内侧	弯岸 外侧	
20	8.19	16.87	2.90	4.45	9.13
25	8.99	19.83	3.80	6.75	10.57
30	10.61	23.55	5.10	8.80	13.06
35	12.72	34.34	6.60	10.8	17.22

2 流速及岸型对滞留行为影响

2.1 油膜登陆河岸特点

泄漏原油进入河面后立刻形成块状的分散式油膜在河面上漂移,块状的油膜会随河流流动逐渐扩大,最先接触到河岸的油膜会迅速黏附在河岸上,这些处在河岸浸润线附近的油膜,一部分直接登陆上岸,在河水的冲刷推力作用下,逐渐向河岸深处移动;一部分在油膜间分子引力作用下,会与后方水流带来的新油膜融合形成一个面积更大的新油膜,新油膜不断扩大,到达一定程度后,油膜中的一部分会随水流剪切应力继续向前漂移。最终,在岸边黏附

的油膜量会处于一个动态平衡的变化过程(图 4)。
油-岸相互作用子模型中表示,在既定环境下油的累积量随着时间不断增加。累积在岸上的油受到重力作用,要么沿着斜坡流下来,要么被吸吸进入岸边土壤^[23]。

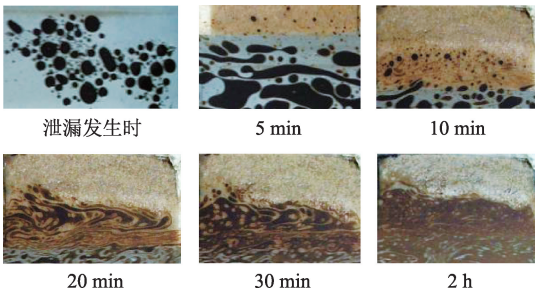


图 4 20 Hz 无植物河岸油膜滞留过程
Fig. 4 Oil retention process on plant-free riverbank (20 Hz)

当发生溢油后,河流里面的原油会随着河流移动。原油扩散接触到岸边之后,会黏附于岸上的砂石、芦苇等水生植物上面,从而脱离油团。随后经过水流的冲刷作用,黏附的原油又被冲刷回河流里,这就形成了原油的黏附和脱附过程。在这个过程中流速对黏附-脱附过程影响巨大。

2.2 流速作用

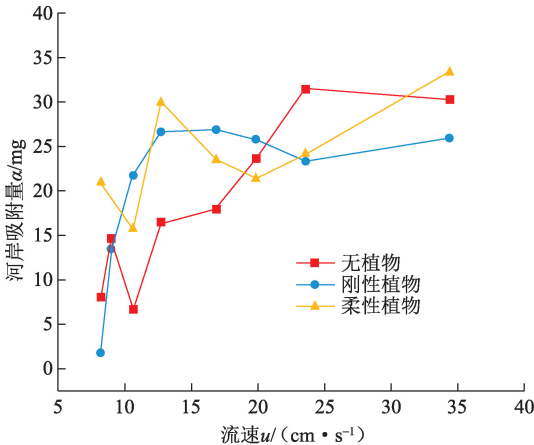
由于弯道除了受流速影响外,不同位置还受不同的牵引力作用,所以只针对内外直道段分析流速对河岸吸附量及滞留量的影响(图 5)。

从图 5(a)中可以发现,直道段河岸的吸附量 α 随着流速增大呈上升趋势,且对于无植物覆盖、刚性植物覆盖和柔性植物覆盖的河岸,河岸吸附量 α 随流速变化的趋势相似。为了排除河岸砂土质量对吸附量的影响,采用单位质量河岸吸附量进行进一步分析。从图 5(b)中可以发现,3 种河岸单位质量吸附量 α' 随流速增大也呈上升趋势。为了研究造成此现象的原因,测定了不同流速下水中原油的含量,发现流速较低时,雷诺数较小,水流较为平缓,溶解和分散到水中的油量少;大流速下水中含油量则大大增加,例如流速为 8.19 cm/s 时,水中含油量为 0.00139 mg/mL;流速为 34.35 cm/s 时,水中含油量达到了 0.006894 mg/mL,是低流速的 4.6 倍。因此,河岸吸附量随流速增大呈增加趋势原因之一是流速增大,水中含油量增加,土壤吸油量增多。

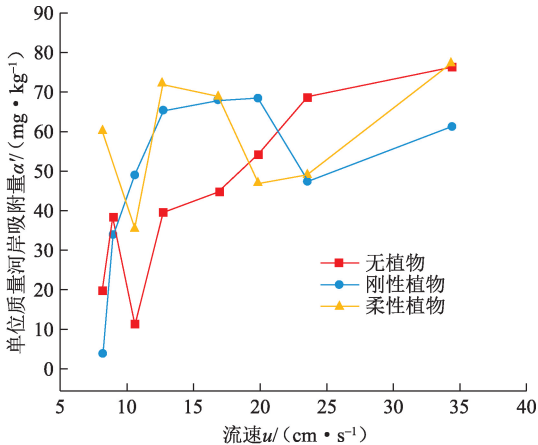
3 种植被覆盖条件下河岸总滞留量 β 均随着流速增大而呈上升趋势(图 6)。水流向前流动会对油膜产生一种拖拽作用力,称之为拖曳力;同时水面波动会冲击河岸,对河岸产生冲刷力,而滞留的原油是冲刷力与拖曳力共同作用的结果。流速增大会相应

地使拖曳力和冲刷力增大。流速为 8.19、8.99、10.61、12.72 cm/s 时,流速较小且流态较为平稳,此区间内滞留量随流速的变化幅度较小;当流速超过 15 cm/s 后,流速较大,滞留量的变化幅度提高。可

以发现,流速较小时,拖曳力占主导地位,使滞留量变化不明显;当流速增大到一定程度,冲刷力的作用超过拖曳力,从而使滞留在河岸的原油量快速增加。



(a) 河岸总吸附量/流速关系



(b) 单位质量河岸吸附量/流速关系

图 5 直道河岸吸附量与流速关系

Fig. 5 Relation between straight river bank adsorption and flow rate

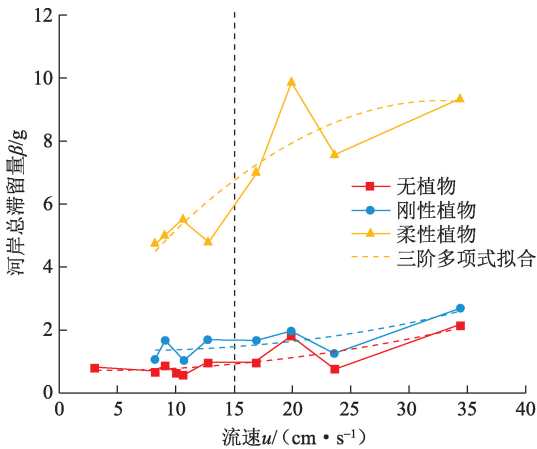


图 6 河岸总滞留量与流速关系

Fig. 6 Relation between river bank total retention and flow rate

2.3 岸型作用

由于只单独考虑岸型对滞留行为的作用,因此选取无植物河岸进行研究。根据实际河流缓流急流与流速的关系^[24],经过重力相似计算,规定断面平均流速小于 12.5 cm/s 时属于缓流,大于 12.5 cm/s 时属于急流。

通过对比在同一变频器频率下,直道内侧、直道外侧、弯道内侧和弯道外侧河岸砂土中的吸附量(图 7(a)),可以发现:在频率较低,即河流处于缓流状态时,弯道内侧的河岸吸附量大于弯道外侧,且弯道吸附量大于直道吸附量;频率较高,即河流处于急流状态时,直道和弯道外侧的河岸吸附量大于内

侧,并且直道段的吸附量大于弯道段。

从图 7(b)中可以发现,变频器频率较低,即河流处于缓流时,弯道内侧滞留量大于外侧;当频率较高,即河流处于急流时,滞留量弯道外侧>直道外侧>弯道内侧>直道内侧。而直道段,外侧的滞留量始终大于内侧。

河流在弯道段,由于惯性作用会产生离心力,离心力的作用会使原油向外侧移动,在河流缓流状态下,离心力较小,离心力对原油的作用效果小于河岸对河流的滞留效果,内侧的吸附量与滞留量均大于外侧;当河流处于急流时,离心力较大,呈主导作用,河岸弯道部分的吸附量与滞留量内侧均小于外侧,呈与流动缓慢状态下相反的规律。对于直道段,无论河流处于何种状态,外侧的吸附量与滞留量均大于内侧。

3 岸栖植物对河岸滞留行为影响

统计同一流速下,直道段少、中、大量刚性植物与柔性植物覆盖河岸的砂土吸附量(表 2)和总滞留量(表 3),发现刚性植物、柔性植物覆盖下的河岸原油吸附量及总滞留量随着植物覆盖量的增大呈现不同的规律。

3.1 刚性植物

通过研究整个试验过程中油膜在植被覆盖河岸附近的滞留行为,可以发现,在泄漏初期,块状油膜沿水流方向流动,由于刚性植物具有增高水位和降

低流速的作用,块状油膜经过此类河岸时会减缓流速且向植被靠近,面积较大的油膜会受到植物的阻拦和黏附作用(图 8(a))。随着油膜不断扩散,块状油膜面积逐渐变小,小块油膜会随着水流登陆到河岸上并由于刚性植物的阻挡使油膜滞留在植物和河岸上(图 8(b))。经过一段时间,块状油膜经扩

散和乳化作用均匀地铺盖在河面上,油膜会随着水流顺着植物间隙登陆至河岸,并滞留在植物枝干及河岸上(图 8(c))。此外还观察到,刚性植物覆盖量少的河岸,植被间隙大,油-水物质更容易登陆河岸,植被覆盖量多的则反之。

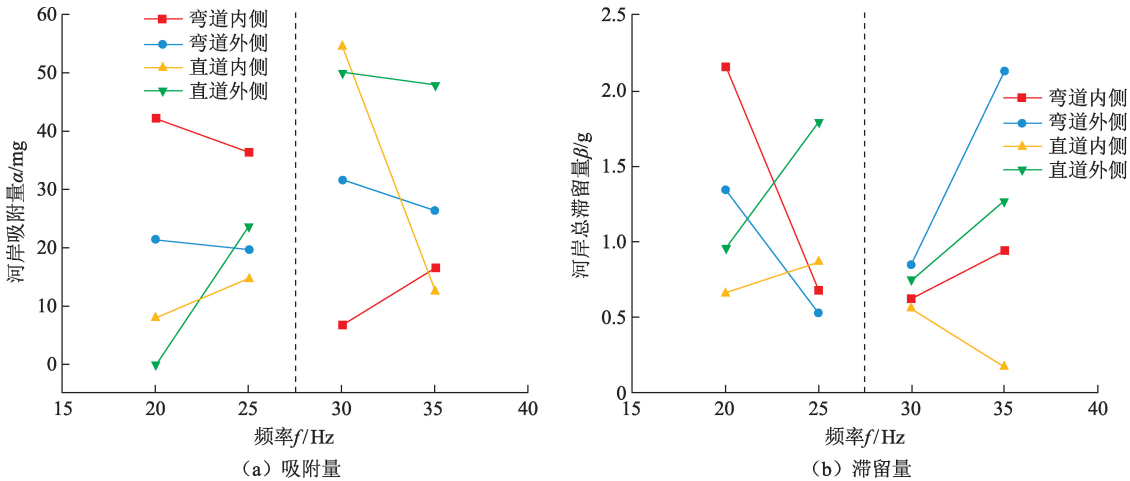


图 7 不同岸型河岸吸附量与滞留量对比

Fig. 7 Comparison of adsorption capacity and retention of different bank types

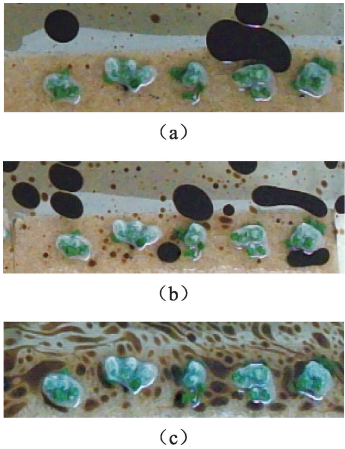


图 8 刚性植物河岸油膜登陆过程

Fig. 8 Oil landing on rigid plant bank

分析表 2 中刚性植物的河岸吸附量 α 可知,植被覆盖量最大时的河岸吸附量是中量的(0.71 ± 0.13)倍,是少量的(0.64 ± 0.13)倍,即随着植被覆盖量增加,河岸砂土的吸附量减少。测量结果与上述油膜登陆刚性植物覆盖河岸的规律相符。分析表 3 中刚性植物河岸总滞留量 β 可知,刚性植物覆盖量最大的河岸总滞留量是中量的(1.54 ± 1.39)倍,是少量的(2.40 ± 0.62)倍,即刚性植物覆盖量越大,河岸总滞留量越大。由于植被覆盖面积的增加使植被阻力系数和植被粗糙系数增大^[25],从而滞留量与吸附量呈现相反的规律。

表 2 不同植物河岸吸附量

Table 2 River bank adsorption capacity with different plant mg

流速 $u/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	刚性植物			柔性植物		
	少量	中量	大量	少量	中量	大量
1. 65	3. 06	2. 96	2. 04	20. 02	28. 20	32. 90
2. 5	4. 87	4. 15	3. 35	39. 23	47. 01	85. 63
3	5. 78	5. 10	2. 54	5. 64	11. 76	59. 15
10	6. 25	5. 80	4. 88	10. 91	25. 28	61. 34

表 3 不同植物河岸总滞留量

Table 3 Total river bank retention with different plant mg

流速 $u/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	刚性植物			柔性植物		
	少量	中量	大量	少量	中量	大量
1. 65	152. 62	101. 70	399. 96	1138. 24	4335. 25	1665. 33
2. 5	150. 01	379. 20	209. 35	1382. 87	1315. 58	1494. 74
3	90. 91	297. 32	227. 66	1604. 68	6581. 33	13789. 68
10	229. 86	771. 54	709. 14	4483. 64	3247. 49	6154. 56

3. 2 柔性植物

通过研究柔性植物覆盖河岸的原油滞留规律可发现,与刚性植物不同,柔性植物在水流冲击下容易弯曲,泄漏初始的块状油膜接触植物后会黏附其上,并改变油膜的扩展过程(图 9(a))。随着油膜进一步扩散,植物上黏附的原油逐渐累积增多,并且会牵引水流向河岸登陆,由于柔性植被对水流流速的减

缓作用和植被阻力导致的水位高低变化^[26],在河岸间无植物的地方会形成水流漩涡,从而加剧了原油的滞留(图9(b))。当油膜均匀散布在河面上后,柔性植物被原油完全黏附,河岸登陆的原油因为植被的阻隔而一部分滞留在岸线交汇处(图9(c))。

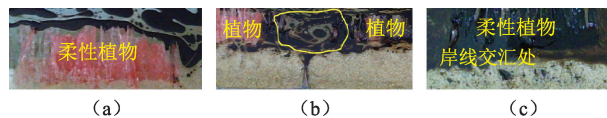


图9 柔性植物河岸油膜登陆过程

Fig.9 Oil landing on flexible plant bank

分析表2中柔性植物的河岸吸附量 α 可知,植被覆盖量最大时河岸吸附量是中量的(2.61 ± 1.46)倍,是少量的(4.98 ± 3.53)倍,即吸附量随着植被覆盖量增大而增大。分析表3中柔性植物河岸总滞留量 β 可知,柔性植物覆盖量最大的总滞留量是中量的(1.38 ± 0.67)倍,是少量的(3.12 ± 3.16)倍,即河岸总滞留量随着植被覆盖量增加而增加。

此外,植物种类的不同对河岸原油滞留的影响也有很大不同。从图6中可以看出,在相同流速下,河岸总滞留量始终为:柔性植物河岸>刚性植物河岸>无植物河岸。同等流速下,柔性植物河岸的总滞留量是刚性植物河岸的($2.87 \sim 6.19$)倍,是无植物河岸的($4.37 \sim 10.01$)倍。因此,泄漏原油更容易滞留在有植被覆盖的河岸,柔性植物(芦苇、杂草等)覆盖较多的河岸最容易黏附原油,造成对河岸的污染。

4 结 论

(1)无植物砂土河岸对原油的吸附量与滞留量均随流速增大而增加,可能原因是流速增大,水中含油量增加。流速增大1.19倍时,水体含油量增至4.6倍。

(2)在同一种流动状态下,河流处于缓流时,吸附量:弯岸内侧>弯岸外侧,且弯岸>直岸;滞留量:弯岸内侧>弯岸外侧,直岸内侧>弯岸外侧;河流处于急流时,吸附量:直岸/弯岸外侧>直岸/弯岸内侧;滞留量:滞留量弯道外侧>直道外侧>弯道内侧>直道内侧。

(3)河岸覆盖不同类型的植物时,同等流速下,柔性植物河岸的总滞留量是刚性植物河岸的($2.87 \sim 6.19$)倍,是无植物河岸的($4.37 \sim 10.01$)倍。

(4)对于刚性植物覆盖的河岸,吸附量随植物覆盖量的增加而减少,滞留量随植物覆盖量增加而增加。植物覆盖量增大一倍时,吸附量降低约29%,滞留量增大一倍约1.54倍。

(5)对于柔性植物覆盖的河岸,吸附量与滞留量均随覆盖量增大而增大。植物覆盖量增大一倍时,吸附量增大一倍约2.61倍,滞留量增大一倍约1.38倍。

参考文献:

- [1] 张其莘,赵静.油气管道运输发展现状及问题分析[J].石化技术,2016,23(10):252-253.
ZHANG Qishen, ZHAO Jing. Analysis of the status quo and problems of oil and gas pipeline transportation development [J]. Petrochemical Technology, 2016,23(10): 252-253.
- [2] 王洋.我国油气管道运输发展趋势分析[J].现代经济信息,2014(12):408.
WANG Yang. Analysis on the development trend of China's oil and gas pipeline transportation. [J] Modern Economic Information,2014(12):408.
- [3] 戚爱华.我国油气管道运输发展现状及问题分析[J].国际石油经济,2009,17(12):57-59,84.
OI Aihua. Chinese oil and gas pipeline transport development status and analysis of associated problems [J]. International Petroleum Economics,2009,17(12):57-59,84.
- [4] 胡文瑞,鲍敬伟.石油行业发展趋势及中国对策研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(4):1-10.
HU Wenrui, BAO Jingwei. Development trends of oil industry and China's countermeasures. [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(4):1-10.
- [5] 朱艳吉,王宝辉,盖翠萍.石油类污染物的环境行为及其对环境的影响[J].化工时刊,2006,20(9):66-69.
ZHU Yanji, WANG Baohui, GAI Cuiping. The environmental action and impact of oil pollutants [J] Chemical Industry Times,2006,20(9):66-69.
- [6] 赵东风,赵朝成,王联社,等.石油类污染物在土壤中的迁移渗透规律[J].石油大学学报(自然科学版),2000,24(3):64-66.
ZHAO Dongfeng, ZHAO Chaocheng, WANG Lianshe, et al. Study on migration and penetrating law of oil pollutant in soil [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science),2000,24(3):64-66.
- [7] 龙雨,杨兵,秦晋丰,等.土壤包气带含水率对氯代烃垂向迁移影响的模拟研究[J].环境科学研究,2017,30(8):1255-1261.
LONG Yu, YANG Bing, QIN Pufeng, et al. Effects of moisture content on vertical migration of chlorinated hydrocarbons in soil unsaturated zone [J]. Research of Environmental Sciences,2017,30(8):1255-1261.
- [8] 纪学雁,刘晓艳,李兴伟,等.分层土柱法研究石油类

- 污染物在土壤中的迁移[J]. 能源环境保护, 2005, 19(1): 43-45.
- JI Xueyan, LIU Xiaoyan, LI Xingwei, et al. Soil columns' experiments by layers of the migration of petroleum hydrocarbons contaminants in soils[J]. Energy Environmental Protection, 2005, 19(1): 43-45.
- [9] ute BRÖNNER A, QISTEIN J, FRODE L, et al. Spreading of waxy oils on calm water[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 129(1): 135-141.
- [10] LU J. Marine oil spill detection, statistics and mapping with ERS SAR imagery in south-east Asia[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(15): 3013-3032.
- [11] YAPA P D, DASANAYAKA L K, BANDARA U C, et al. A model to simulate the transport and fate of gas and hydrates released in deepwater[J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(5): 559-572.
- [12] GUNDIACH E R. Oil-holding capacities and removal coefficients for different shoreline types to computer simulate spills in coastal waters; Proceeding of the 1987 International Oil Spill Conference [C]. Washington DC: API Publication, 1987: 451-457.
- [13] 李志刚, 蒋梅荣, 余建星. 基于 VOF 方法的海底管道溢油扩散数值模拟研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(6): 100-110.
- LI Zhigang, JIANG Meirong, YU Jianxing. Numerical simulation on the oil spill for the submarine pipeline based on VOF method[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(6): 100-110.
- [14] 王冰, 刘晓威, 王灵志, 等. 基于 IWIND-IR 模型的河流突发性溢油事故模拟与应急响应分析[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(4): 148-153.
- WANG Bing, LIU Xiaowei, WANG Lingzhi, et al. Simulation of accidental river oil spill and emergency response analysis based on IWIND-LR model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(4): 148-153.
- [15] WANG C, YU J Y, WANG P F, et al. Flow structure of partial vegetation open-channel flows with eelgrass[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(3): 301-307.
- [16] WU Longhua, YANG Xiaoli. Factors influencing bending rigidity of submerged vegetation[J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(6): 723-729.
- [17] ANDREW M F. Flow regimes in gaps within stands of flexible vegetation: laboratory flume simulations [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2011, 11(3): 289-306.
- [18] LI R M, SHEN H W. Effect of tall vegetation's on flow and sediment [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99: 793-814.
- [19] 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.
- ZHENG Xilai, LIU Xiaoyi, QIAN Hui. Mechanism of oil-water emplacement in soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19(2): 218-220.
- [20] 张春生. 冲积体系及三角洲物理模拟研究[D]. 成都: 成都理工学院, 2001.
- ZHANG Chunsheng. Alluvial system and delta physics simulation study [D]. Chengdu: Chengdu Institute of Technology, 2001.
- [21] 国家质量技术监督局. 中华人民共和国国家标准 海洋监测规范 第 5 部分: 沉淀物分析: GB 17378.5-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [22] 国家质量技术监督局. 中华人民共和国国家标准 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析: GB 17378.4-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [23] 张旭, 李广贺, 黄巍. 包气带土层中石油污染物生物降解的温度效应[J]. 环境科学, 2001, 22(4): 108-110.
- ZHANG Xu, LI Guanghe, HUANG Wei, Effect of temperature on biodegradation of the petrochemicals in contaminated soil [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2001, 22(4): 108-110.
- [24] 李嘉, 王玉蓉, 李克锋, 等. 计算河段最小生态需水的生态水力学法[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1169-1174.
- LI Jia, WANG Yurong, LI Kefeng, et al. Eco-hydraulics method of calculating the lowest ecological water demand in river channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1169-1174.
- [25] 杨琰青, 王雯, 顾中明, 等. 不同布置形态下刚性淹没植被对水流特性的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 164-168.
- YANG Yanqing, WANG Wen, GU Zhongming, et al. Influence of rigid submerged vegetation on flow characteristics under different vegetation layouts[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(5): 164-168.
- [26] 张凯, 景何仿, 宋滢汀, 等. 含柔性植被水槽水流特性试验研究[J]. 人民长江, 2018, 49(17): 97-102.
- ZHANG Kai, JING Hefang, SONG Yingting, et al. Experimental study on flow characteristics in a flume with flexible vegetation[J]. Yangtze River, 2018, 49(17): 97-102.