

用于海上油气田生产水在线监测的水中油近紫外与深紫外传感器比较研究

刘铭辉¹, 李亚辉², 杨鹏², 杨敏³, 王新乐¹, 王妮¹

(1.中海油能源发展股份有限公司安全环保分公司, 天津 300457; 2.青岛海洋科技中心, 山东 青岛 266200; 3.自然资源部北海海洋技术中心, 山东 青岛 266033)

摘要: 海洋石油平台生产水排放对海洋环境造成一定的污染, 目前主要采用人工取样化验的手段来进行监测, 缺少适用于海上油气田生产水中含油浓度的水中油在线监测技术。本文以海洋石油平台生产水为研究对象, 选取近紫外和深紫外两种不同激发波长的水中油传感器测试不同油田区域的含油水样, 建立荧光信号与含油浓度之间的相关关系, 并从紫外荧光法测量原理出发, 研究 4 个海上油田区域的含油水样荧光光谱特性。实验证明, 激发波长为 360 nm 的近紫外水中油传感器可应用于轻质油到重质油等不同密度油品生产水的水中油浓度检测, 但对低浓度检测的敏感度低; 激发波长为 255 nm 的深紫外水中油传感器在除重质油外的其他油田生产水检测中较为理想, 但是在浓度较高区域易过早产生荧光猝灭, 因此, 应综合考虑油品类型及日常检测浓度范围选择海上石油平台生产水在线监测的水中油传感器波长。本文结果可为海上溢油的石油类快速检测提供参考。

关键词: 水中油; 多区域油种; 荧光光谱; 在线监测; 生产水

中图分类号: O439; X85

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)03-0434-09

Comparative study of near and far-ultraviolet sensors for oil-in-water online monitoring of offshore platform produced water

LIU Minghui¹, LI Yahui², YANG Peng², YANG Min³, WANG Xinle¹, WANG Ni¹
(1.CNOOC EnerTech Safety and Environmental Protection Company, Tianjin 300457, China; 2.Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266200, China; 3.North China Sea Marine Technical Center, Ministry of Natural Resource, Qingdao 266033, China)

Abstract: The discharge of produced water from offshore oil platform is one of the important sources of marine environmental pollution. While manual sampling and analysis are still the main methods, it is urgent to study the online monitoring technology of oil in water for production water of offshore oil platform. In this paper, oil-bearing produced water samples from different offshore oilfields were taken as the research object, and were tested by both near-ultraviolet and deep ultraviolet oil sensors with different excitation wavelengths. The fluorescence spectral characteristics of oily water samples were studied and the correlation between fluorescence signal and oil content was established. The near-ultraviolet oil sensor with an excitation wavelength of 360 nm can be applied to detect oil concentration in produced water with density range from light oil to heavy oil, but the sensitivity to low concentration is low; The deep ultraviolet oil sensor with an

收稿日期: 2023-12-13, 修订日期: 2024-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3103900)

作者简介: 刘铭辉(1982-), 男, 天津人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为环境监测与污染防治, E-mail: liumh15@cnooc.com.cn

通信作者: 杨敏(1981-), 女, 山东青岛人, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为海洋生态环境监测技术, E-mail: yangmin@ncs.mnr.gov.cn

excitation wavelength of 255 nm is ideal for produced water from non-heavy oil oilfields except heavy oil, and fluorescence quenching is easy to occur prematurely in higher concentrations. As a result, the oil type and daily detection concentration range should be comprehensively considered to select the wavelength of the oil sensor for online monitoring of produced water in offshore platforms. The outcomes of this paper can provide a reference for the rapid detection of oil spills at sea.

Key words: oil in water; multi-regional oil species; fluorescence spectrum; on-line monitoring; produced water

海洋石油平台生产水来源于油气生产过程中产出的地层伴生水, 含有原油、固体颗粒、腐蚀结垢产物、细菌以及其他杂质^[1]。含油生产水成分复杂、水质多变、温度高, 其物理影响和化学毒性会严重危害海洋生态环境^[2]。

我国海上油气田生产水需要进行外排或回注处理, 由于含油生产水经处理后油珠直径小于 0.1 μm , 去除难度较大^[3], 为保证达标排放, 需要对生产水进行水中油浓度检测。目前生产水中石油类的主要检测方法为近红外散射法、紫外分光光度法和紫外荧光法^[4-9]。近红外散射法基于 Mie 散射原理, 通过线阵 CMOS 接收被测试样前向小角连续点的散射光, 测定油滴散射光的粒度和光强度分布, 从而确定水中油滴浓度(微粒数)^[10], 受检测原理的限制, 该方法测量范围小、测量精度低, 易受检测水体中悬浮颗粒、气泡等影响。紫外分光光度法是通过测定水中油在特定波长处或一定波长范围内的吸光度或发光强度, 来进行定性和定量分析水中油浓度, 该方法灵敏度较低且测量范围小。紫外荧光法是根据石油中芳香烃化合物和含共轭双键化合物吸收紫外光后发射出的荧光强度来计算水中油浓度, 具有量程大、精度高、选择性好、样品用量少、分析快速等优点, 是海水石油类在线监测的首选方法^[11]。

由于油藏的圈闭、储集岩、压力的不同, 海上石油平台所开采出的油品类型也有所不同, 主要分为低粘油、中粘油、高粘油、稠油、凝析油等, 油品种类是影响紫外荧光法测量水中油浓度的首要因素。因此, 本文拟使用不同激发波长传感器针对不同油田区域生产水样品进行浓度梯度荧光强度实验和相关性分析, 并对不同油田区域生产水样品进行荧光特性分析, 综合试验结果进行讨论, 提供覆盖多油种的石油生产水在线监

测传感器波长选择策略。

1 实验系统搭建

1.1 实验原理

根据朗伯比尔定律, 荧光物质在可测浓度下, 荧光强度与发光物质的浓度成正比:

$$Int = I_0 \cdot \phi_r \cdot \varepsilon \cdot L \cdot C \quad (1)$$

式中: Int 为荧光强度; I_0 为激发光强度; ϕ_r 为荧光相对效率; ε 为荧光分子摩尔吸光系数; L 为被检测溶液的通路长度; C 为发光物质的浓度。对于某一特定分子, 由于荧光分析仪所用的 I_0 和 L 是固定的, 因此荧光强度与溶液浓度按一定比例变化。

1.2 实验样品选择及配置

本文采用渤南、蓬勃、渤西、春晓油田的生产水样品为实验对象, 通过加入实验海水逐级稀释配制浓度梯度待测样品, 配制步骤为: 在规格为 V_X (mL) 的量器中加入体积为 V_K (mL)、浓度为 C_K (mg/L) 的生产水样品, 用实验海水稀释至刻度, 利用玻璃棒混合均匀。则量器中新配置的矿物油浓度 C_X (mg/L) 按式(2)计算:

$$C_X = \frac{V_K \cdot C_K}{V_X} \quad (2)$$

根据式(2), 配制不同浓度的平台水样溶液, 分为多组进行平行测定。

1.3 实验方法

将自主研发的近紫外传感器(360 nm/420 nm)和美国 Turner Designs 公司生产的深紫外传感器(255 nm/350 nm)放置于测量池中并连接数据采集端, 以获取梯度样品的油浓度检测值, 测试平台如图 1 所示。

采用定标曲线法, 取各浓度溶液在峰值波长下荧光峰值处的相对荧光强度值。以浓度 C 为横坐标, 相对荧光强度 (F) 为纵坐标, 样品浓度与荧光相对强度的关系如下:

$$F = aC + b \quad (3)$$

式中: F 为样品荧光光谱强度; C 为石油类浓度; a 为拟合直线斜率; b 为拟合直线截距。

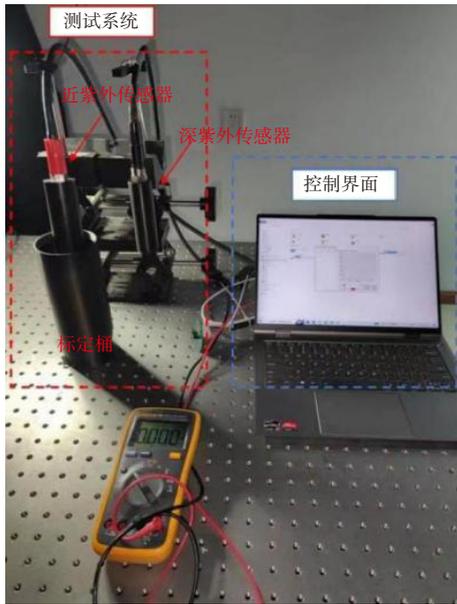


图1 传感器测试平台

Fig. 1 Sensor testing platform

线性拟合系数 r 表示荧光光谱强度与石油类浓度之间的线性相关性, 荧光强度的线性拟合相关性越高, 传感器对水中油浓度检测精度就越高。

$$r_{xy} = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (4)$$

式中: x_i 为不同水样浓度; y_i 为荧光强度实际测量值; N 表示样本容量。

将实验结果线性拟合系数 r 作为石油平台生产水在线监测传感器的选择依据。参照《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91-2002) 相关内容, 用线性回归方程计算出校准曲线的相关系数、截距和斜率, 应符合标准方法中规定的要求, 一般情况下相关系数 $r \geq 0.999$, 该技术规范中相关系数 r 为实验室设备在通过化学等方法去除一切干扰因素后对标准物质测量的结果。本研究为现场检测, 存在干扰因素以及实际生产水样品的不均匀性, 因此拟合系数 $r \geq 0.99$ 可视为满足现场检测要求。

2 结果与讨论

2.1 春晓油田作业区原油生产水的水中油浓度与荧光强度相关性分析

春晓油田作业区所采原油主要为凝析油, 选择春晓油田作业区某平台生产水, 采用逐步稀释法配制不同浓度梯度样品, 在不同激发波长下测定样品荧光强度, 测试数据见表1。近紫外传感器在全浓度范围内荧光强度随浓度增加逐渐增强, 而深紫外传感器仅在 4 mg/L 以下范围内呈现增加趋势, 荧光强度通过转化为电压值体现。

表1 春晓油田生产水水中油检测的荧光强度/电压值

Tab.1 Fluorescence intensity/voltage value for oil concentration detection in production water in Chunxiao Oilfield

浓度/mg·L ⁻¹	近紫外传感器 (360 nm/420 nm)			深紫外传感器 (255 nm/350 nm)		
	荧光强度	r	R^2	电压值/mV	r	R^2
0	220			0.037		
0.5	-			0.178		
1	348	0.9993	0.9986	0.421	0.999	0.998
2	455			0.721		
4	626			1.453		
8	997			1.332		
16	1655			1.148		-
20	1994			1.049		

近紫外传感器(图2)与低浓度阶段的深紫外传感器(图3a)数据趋势一致, 无离群数据, 荧光

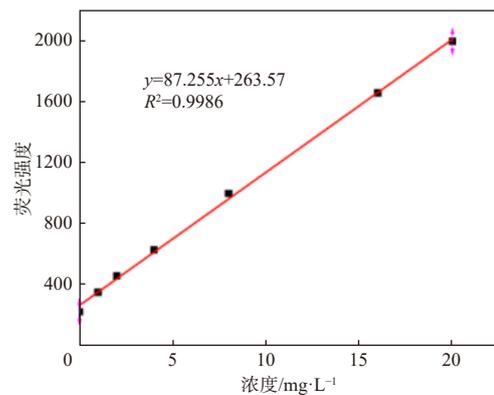


图2 近紫外传感器(360 nm/420 nm)检测春晓油田生产水的水中油浓度相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of oil concentration in the produced water of Chunxiao Oilfield by near-ultraviolet sensor (360 nm/420 nm)

光谱强度与石油类浓度之间的线性相关性较好。在高浓度阶段的深紫外传感器已出现明显的荧光猝灭现象(图 3b), 荧光值出现随浓度升高而下降的趋势。

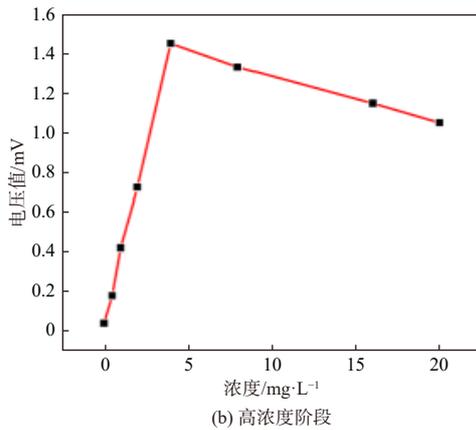
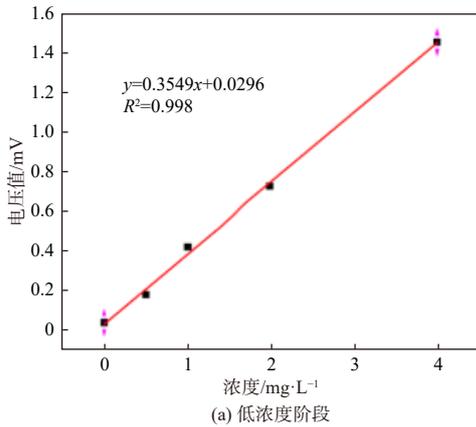


图 3 深紫外传感器 (255 nm/350 nm) 检测春晓油田生产水的水中油浓度相关性分析

Fig. 3 Deep ultraviolet sensor (255 nm/350 nm) to detect the correlation analysis of oil concentration in the produced water of Chunxiao Oilfield

2.2 渤西作业区原油生产水的水中油浓度与荧光强度相关性分析

渤西作业区所开采原油主要为中质油, 选择渤西作业区某平台生产水, 采用逐步稀释法配制不同浓度梯度样品, 在不同激发波长下测定样品荧光强度, 测试数据见表 2。两型传感器在全浓度范围内荧光强度均随浓度的增加逐渐增强。

荧光光谱强度与石油类浓度之间的线性相关性如图 4 和图 5 所示。近紫外传感器(图 4)与低浓度阶段的深紫外传感器(图 5a)数据趋势一致, 无离群数据。深紫外传感器在高浓度阶段测

表 2 渤西油田生产水水中油检测的荧光强度/电压值
Tab.2 Fluorescence intensity/voltage value of oil detection in produced water in Boxi Oilfield

浓度/ mg·L ⁻¹	近紫外传感器 (360 nm/420 nm)			深紫外传感器 (255 nm/350 nm)		
	荧光强度	r	R ²	电压值/mV	r	R ²
0	146			0.020		
0.143	221			0.148		
0.286	265			0.266		
0.429	330			0.388		
0.714	446			0.604		
1.428	720			1.079		
2.142	987			1.495	0.9815	0.9633
2.875	1232	0.9990	0.9998	1.793		
3.571	1452			2.063		
4.286	1685			2.267		
5	1895			2.455		
5.714	2116			2.581		
7.143	2523			2.758		
8.571	2991			2.847		-
10	3554			2.901		

定荧光强度值随浓度增加而增强, 但增长趋势趋于平缓。

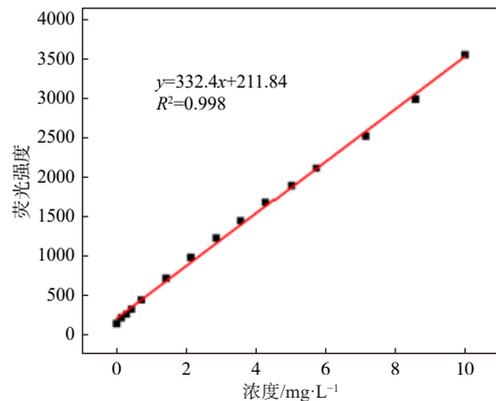


图 4 近紫外传感器(360 nm/420 nm)检测渤西油田生产水的水中油浓度相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of oil concentration in produced water of Boxi Oilfield by near-ultraviolet sensor (360 nm/420 nm)

2.3 蓬勃作业区原油生产水的水中油浓度与荧光强度相关性分析

蓬勃作业区所开采原油主要为中质油, 选择蓬勃作业区某平台生产水, 采用逐步稀释法配制

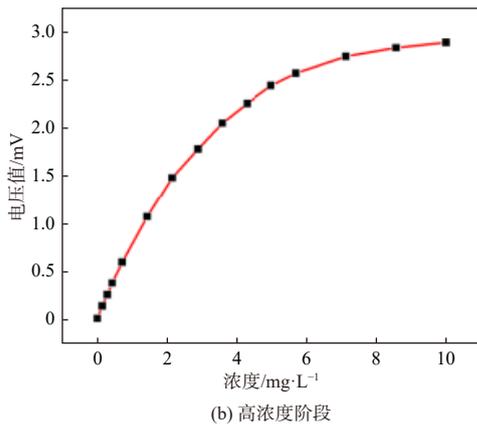
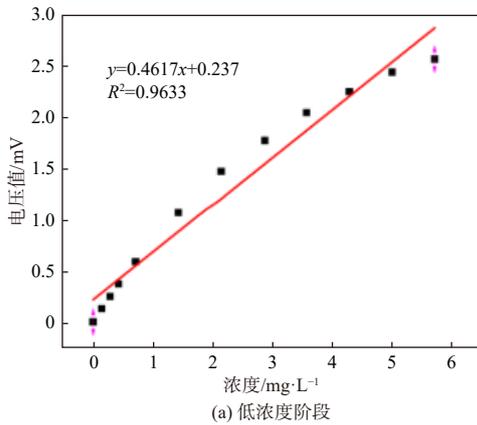


图5 深紫外传感器(255 nm/350 nm)检测渤西油田生产水的水中油浓度相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of oil concentration in produced water of Boxi Oilfield by deep ultraviolet sensor (255 nm/350 nm)

不同浓度梯度样品,在不同激发波长下测定其荧光强度,测试数据见表3。近紫外传感器在全浓度范围内荧光强度随浓度增加逐渐增强,而深紫外传感器仅在15 mg/L以下范围内呈现增加趋势。

荧光光谱强度与石油类浓度之间的线性相关性如图6和图7所示。近紫外传感器(图6)与低浓度阶段的深紫外传感器(图7a)数据趋势一致,无离群数据。深紫外传感器在样品浓度高于15 mg/L后,随样品浓度增加,荧光强度呈现下降趋势。

2.4 渤南作业区原油生产水的水中油浓度与荧光强度相关性分析

渤南作业区所采原油主要为重质油,选择渤南作业区某平台生产水,采用逐步稀释法配制不同浓度梯度样品,在不同激发波长下测定其荧光

表3 蓬勃作业区生产水水中油检测的荧光强度/电压值

Tab.3 The fluorescence intensity/voltage value of oil detection in water is produced water of Pengbo Oilfield

浓度/mg·L ⁻¹	近紫外传感器 (360 nm/420 nm)			深紫外传感器 (255 nm/350 nm)		
	荧光强度	r	R ²	电压值/mV	r	R ²
0	148			0.037		
0.235	-			0.147		
0.47	-			0.319		
0.94	-			0.658		
1.875	733	0.9993	0.9986	1.343		
3.75	1206			2.471	0.9881	0.9763
7.5	2070			3.797		
15	3506			4.41		
30	6202			4.113		-
60	12036			1.469		

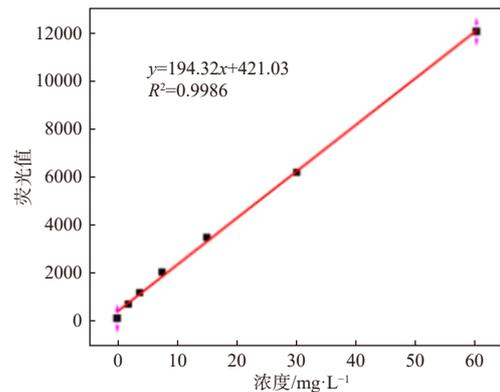


图6 近紫外传感器(360 nm/420 nm)检测蓬勃油田生产水的水中油浓度相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of oil concentration in the produced water of Pengbo Oilfield by near-ultraviolet sensor (360 nm/420 nm)

强度,测试数据见表4。两型传感器在全浓度范围内荧光强度均随浓度增加逐渐增强。

荧光光谱强度与石油类浓度之间的线性相关性如图8和图9所示。近紫外传感器(图8)与低浓度阶段的深紫外传感器(图9a)测试数据趋势一致,无离群数据。

2.5 实验样品光谱特性测定结果分析

为分析和验证上述近紫外传感器(360 nm/420 nm)和深紫外传感器(255 nm/350 nm)的实验结果,采用荧光分光光度计对4个实验样品的光谱特性进行定量检测。

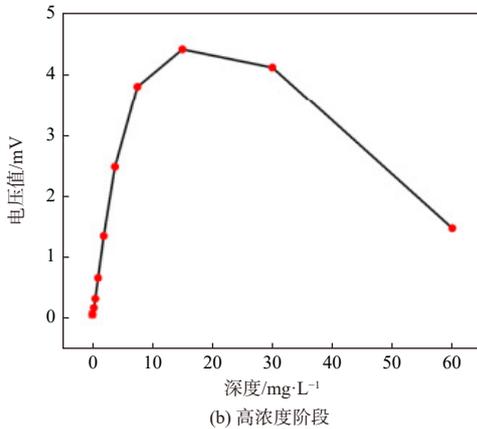
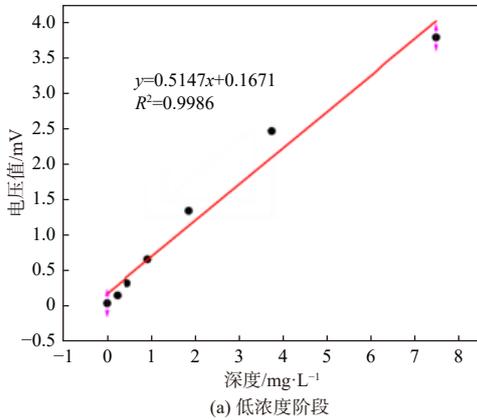


图7 深紫外传感器(255 nm/350 nm)检测蓬勃油田生产水的水中油浓度相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of oil concentration in the produced water of Pengbo Oilfield by deep ultraviolet sensor (255 nm/350 nm)

表4 渤南作业区生产水水中油检测的荧光强度/电压值

Tab.4 Fluorescence intensity/voltage value of oil detection in produced water of Bonan's operation area

浓度/mg·L ⁻¹	近紫外传感器 (360 nm/420 nm)			深紫外传感器 (255 nm/350 nm)		
	荧光强度	r	R ²	电压值/mV	r	R ²
0	122			0.039		
2.5	-			0.053		
5	280			0.129		
10	416	0.9972	0.9944	0.247		
20	636			0.378	0.9873	0.9747
40	1107			0.479		
80	1754			0.472		-
100	2219			0.528		

(1) 仪器装置

实验采用荧光分光光度计(F320)作为检测

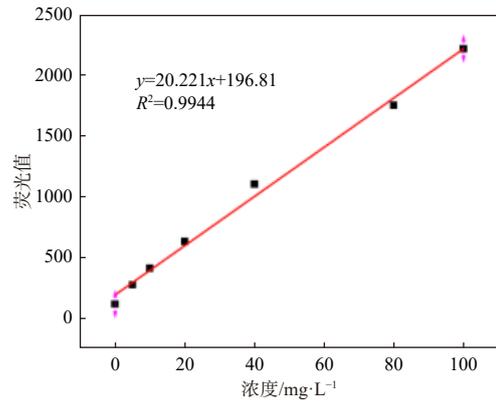


图8 近紫外传感器(360 nm/420 nm)检测渤南油田生产水的水中油浓度相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of oil concentration in the produced water of Bonan Oilfield by near-ultraviolet sensor (360 nm/420 nm)

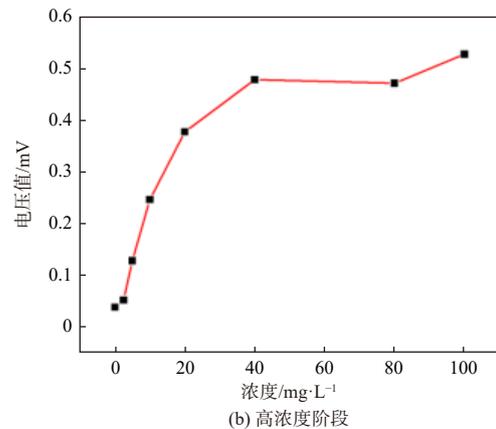
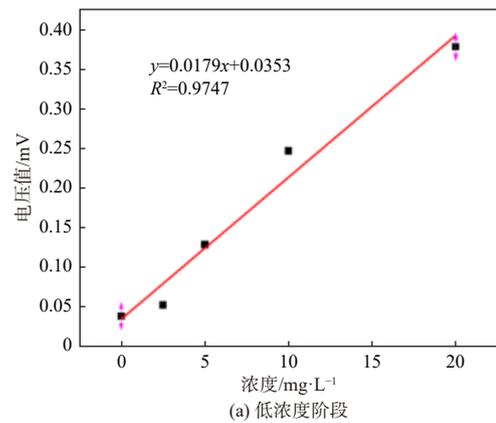


图9 深紫外传感器(255 nm/350 nm)检测渤南油田生产水的水中油浓度相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis of oil concentration in the produced water of Bonan Oilfield by deep ultraviolet sensor (255 nm/350 nm)

器,激发波长为 200~400 nm,波长间隔为 10 nm,扫描波段为 250~500 nm,增益为 3, PMT 电压为 400,扫描光谱进行仪器自动校正。

(2) 荧光光谱测定

使用移液枪将各石油平台的含油水样从试剂瓶转移至石英比色皿进行荧光光谱测量,当一个荧光发射峰被检测到,发射单色器就固定于该峰值波长上,然后对激发波长进行扫描,得到被测油品的激发光谱,即荧光相对强度与激发波长相对荧光强度的关系。

分别扫描各油田生产水样品,获得荧光光谱(图 10)。经过分析,得到 4 种样品的荧光特性(表 5)。在此基础上得到各油种的最佳激发/发射波长以及油品性质。由表 5 可知,由于矿物油多种化学成分的分子组分不同,油田生产水都具有较宽形状的激发光谱,因此可根据需要选择该波段范围内适宜水中油的统一的荧光激发波长。同时,荧光发射峰的位置与芳香环的数目相关,随着多环芳烃类化合物复杂度的增加,波长会向更大的方向转移^[12]。

2.6 各作业区生产水不同激发波长传感器检测结果分析

将不同油田区域生产水的不同激发波长传感器检测结果相关性列于表 6。近紫外传感器(360 nm/420 nm)与实际浓度结果的线性相关系数 $r \geq 0.99$,说明可使用该类型传感器进行海上石油平台生产水水中石油类浓度在线检测。

春晓油田油品为轻质油,C链较短,其中一个荧光峰激发波长为 280 nm,发射波长为 320 nm,因此实验中使用的深紫外传感器(255 nm/350 nm)检测结果的线性相关系数 $r=0.999$,可直接用于标定曲线;但对于中质油、重质油,深紫外传感器检测结果均低于 0.99。因此,随着油品比重增大,需增加传感器现场标定频次,以此提高检测精度。

根据上述实验结果,样品荧光峰位置理论上应确定为最优激发波长 330~340 nm,发射中心波长 320~390 nm。图 11 为 360 nm 光源激发时不同水样各波段的荧光强度,4 种实验样品荧光光谱形状一致,其中红色虚线内为荧光光谱位置,考虑现场检测干扰因素较多,荧光峰峰值位

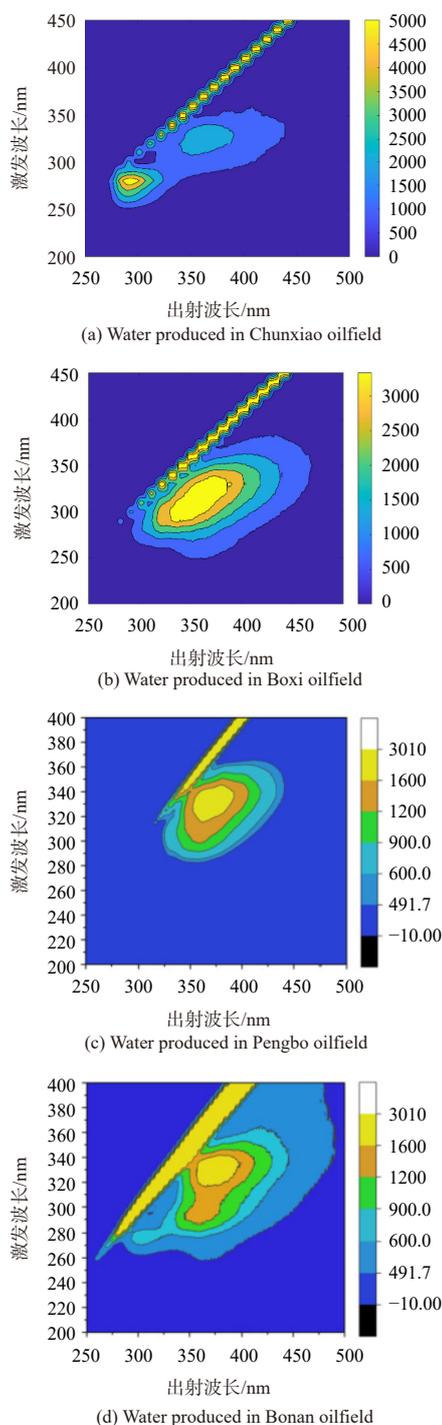


图 10 多地区生产水的荧光特性

Fig. 10 Fluorescence characteristics of water produced in multiple regions

置检测精度极易受到影响,因此近紫外传感器(360 nm/420 nm)的激发波长选择 360 nm,发射波长选择 420 nm,可适用于多种油品生产水中油的检测。图 12 为 255 nm 光源激发时不同水

表 5 不同油田区域生产水荧光特性

Tab.5 Fluorescence characteristics of produced water in different oilfield areas

油田生产水	最佳激发 波长/nm	发射中心 波长/nm	油品种类
春晓油田	280	320	轻质油 C5—C10,
	330	360	相对密度 <0.87
渤西油田	330	360	中质油 C11—C18
			相对密度 0.87 ~ 0.92
蓬勃油田	330	360	中质油 C11—C18
			相对密度 0.87 ~ 0.92
渤南油田	340	390	重质油 >C19
			相对密度 >0.92

表 6 不同油田区域生产水不同激发波长传感器检测相关性

Tab.6 Correlation of produced water detected by sensors with different excitation wavelengths in different oilfield areas

相关系数	春晓油田 (轻质油)	渤西油田 (中质油)	蓬勃油田 (中质油)	渤南油田 (重质油)
$r_{\text{近紫外}}$	0.9993	0.9990	0.9993	0.9972
$r_{\text{深紫外}}$	0.9990	0.9815	0.9881	0.9873

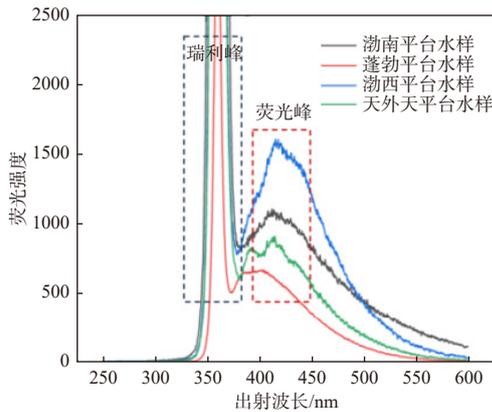


图 11 360 nm 光源激发时不同水样各波段的荧光强度

Fig. 11 The fluorescence intensity of each band of a water sample in different regions when excited by a 360 nm light source

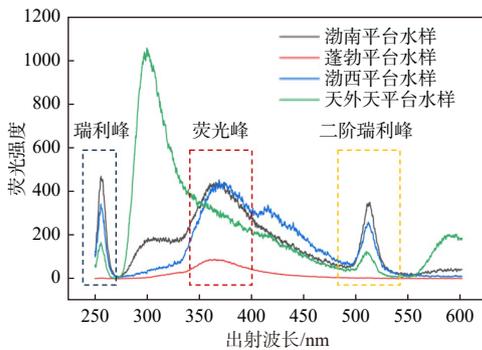


图 12 255 nm 光源激发时不同水样各波段的荧光强度

Fig. 12 The fluorescence intensity of each band of a water sample in different regions when excited by a 255 nm light source

样各波段的荧光强度, 该区域各样品光谱形状除春晓油田区以外趋势均一致, 由光谱图可知深紫外传感器采用激发波长 255 nm、发射波长 360 nm 也适用于多种水中油的荧光特性测量, 但根据水样实际测试结果, 该波段在对高浓度检测时会发生荧光猝灭现象, 适用范围受限。

3 结论

(1) 针对不同油田区域生产水样品进行的浓度梯度荧光强度实验和不同油田区域生产水样品荧光特性分析结果表明, 在传感器测量范围内, 随着实验样品油浓度的增加, 其荧光相对强度呈线性增加, 两者具有明显的正向关系。其中, 近紫外传感器与实际浓度结果的线性相关系数 $r \geq 0.99$, 深紫外传感器检测结果线性相关系数 $r \geq 0.98$ 。

(2) 近紫外传感器 (360 nm/420 nm) 对极低浓度检测不敏感, 而深紫外传感器 (255 nm/350 nm) 在 4 种样品的高浓度区域极易过早发生荧光猝灭, 导致检测失败。如面临生产水油种不详、检测范围不固定的在线监测需求时, 建议同时集成近紫外传感器和深紫外传感器共同进行水中油浓度测定, 保证检测范围及检测精度。

(3) 各地区油品的化学成分不同, 荧光峰的位置与芳香环的数目相关, 随着化合物复杂度的增加, 波长会向更大的方向转移。在进行海上石油生产水在线监测系统集成时, 近紫外传感器 (360 nm) 激发光可以捕获较长 C 链、较大比重的多环芳烃化合物, 可覆盖本文实验中全部油田区域水中油浓度的检测, 现场水样检测趋势线的相关系数、截距和斜率可直接用作传感器校准曲线。

(4) 除了本文海上石油平台生产水监测的应用场景, 水中油传感器通常还会被用于海洋环境监测, 此时传感器会受到海洋中类腐殖质 CDOM 的干扰, 造成光谱重叠, 影响测量准确性。在该应用场景下, 建议同时集成水中油和 CDOM 传感器, 或者采用多通道水中油传感器 (其中一个通道选取非重叠部分的特征波长用于 CDOM 定量检测) 进行检测。同时, 还需基于不同 CDOM 浓度下水中油浓度的变化值, 建立

CDOM的补偿校正模型,提高检测精度。

参考文献:

- [1] 卢敏时,钟理,朱金雄. 改性纤维过滤技术在海洋石油平台含油污水处理中的应用[J]. *广东化工*, 2015, 42(19): 116-118.
- [2] 盛朝辉. 浅谈海洋石油平台污水的处理技术[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2013(16): 66-67.
- [3] 马军花,朱文发,朱文会. 小议含油污水处理[J]. *科技创新导报*, 2008(27): 125.
- [4] 王书涛,崔彦彦. 光纤荧光式测水中矿物油浓度[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 780-783.
- [5] 黄妙芬,宋庆君,唐军武,等. 石油类污染水体后向散射特性分析——以辽宁省盘锦市双台子河和绕阳河为例[J]. *海洋学报*, 2009, 31(3): 12-20.
- [6] 冯新泸,史永刚. 近红外光谱及其在石油产品分析中的应用[M]. 北京:中国石化出版社, 2002: 22-28.
- [7] LAMBERT P, GOLDTHORP M, FIELDHOUSE B, et al. Field fluorimeters as dispersed oil-in-water monitors[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 102(1): 57-79.
- [8] LI J F, FULLER S, CATTLE J, et al. Matching fluorescence spectra of oil spills with spectra from suspect sources[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 514(1): 51-56.
- [9] LAMBERT P. A literature review of portable fluorescence-based oil-in-water monitors[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 102(1): 39-55.
- [10] 赵友全,邹瑞杰,陈玉榜,等. 近红外散射法测定水中矿物油含量研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(5): 1213-1216.
- [11] 许金钩,王尊本. 荧光分析法[M]. 3版. 北京:科学出版社, 2006: 6-16.
- [12] WAKEHAM S G. Synchronous fluorescence spectroscopy and its application to indigenous and petroleum-derived hydrocarbons in Lacustrine sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 1977, 11(3): 272-276.
- (本文编辑: 胡莹莹)
-
- (上接第 394 页)
- [14] HAYWARD M J, PARK F D S, MANZELLA L M, et al. Sputtered protons during surface-induced dissociation (SID) tandem mass spectrometry (MS/MS)[J]. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 1995, 148(1/2): 25-30.
- [15] 董华强,梁焱琼,郭五珍,等. 北江佛山段水体 HCHs 和 DDTs 污染特征和来源解析[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(6): 2531-2533.
- [16] 阚可聪,谷孝鸿,李红敏,等. 固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估[J]. *环境科学*, 2020, 41(3): 1346-1356.
- [17] 韦皓元,林贵英,姚晓龙,等. 江苏河网区地表水沉积物中 OCPs 的赋存特征及风险[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(2): 923-931.
- [18] 谢新末,胡立嵩,张彩香,等. 官厅水库流域水体中硫丹的分布特征及风险评价[J]. *武汉工程大学学报*, 2019, 41(3): 219-225,231.
- [19] SCHUSTER J K, HARNER T, RAUERT C. Impacts of proximity to primary source areas on concentrations of POPs at global sampling stations estimated from land cover information[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(39): 36016-36024.
- [20] 陆光华,覃冬茹,宗永臣. 硫丹对鱼类的毒性效应研究进展[J]. *水资源保护*, 2018, 34(3): 9-16.
- [21] AMIRBEKOV A, VRCHOVECKA S, RIHA J, et al. Assessing HCH isomer uptake in *Alnus glutinosa*: implications for phytoremediation and microbial response[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 4187.
- [22] 房倩,王艳,李玉华,等. 衡山大气中 PCBs 的浓度水平及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(9): 1559-1564.
- [23] 张安. 海产品中 POPs 的暴露水平及其风险分析[D]. 大连:大连海事大学, 2013.
- [24] 钱卓真. 闽南地区水生生物中典型化学污染物研究及人体健康风险评估[D]. 厦门:厦门大学, 2017.
- [25] 罗孝俊,何明靖,曾艳红,等. 溶解有机质对生物富集因子计算的影响:以东江鱼体中多溴联苯醚的生物富集为例[J]. *生态毒理学报*, 2016, 11(2): 188-193.
- [26] 孙闰霞. 珠江三角洲水生生物中卤代有机污染物的时空分布、生物积累及人体暴露评估[D]. 广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2016.
- [27] 丁洋. 涠洲岛珊瑚礁鱼类中 OCPs、PCBs 和 OPEs 生物积累的研究[D]. 南宁:广西大学, 2019.
- [28] 国家卫生健康委员会,农业农村部,国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量: GB 2763—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.
- [29] 李蓉,黄雪.《食品安全国家标准 食品中污染物限量》新标准解读[J]. *食品安全导刊*, 2023(5): 10-15.
- (本文编辑: 胡莹莹)