

基于切比雪夫函数的正交多项式拟合模拟渤海石油浓度空间分布

郭书苇

大连交通大学理学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2025年12月9日; 录用日期: 2026年1月2日; 发布日期: 2026年1月14日

摘要

本研究以中国浅海内海渤海为研究区域, 针对石油污染物排入海洋生态系统造成的环境风险, 开展污染物空间分布建模与影响评估研究。基于2018年石油浓度综合监测数据集, 系统比较了空间插值方法的误差相关指标, 成功重建了研究区全年各季节石油浓度的空间变化规律。研究发现, 切比雪夫拟合法(CPF)在十折交叉验证中表现出优异的统计性能, 其均方根误差(RMSE = 0.0160 mg/L)和平均绝对误差(MAE = 0.0094 mg/L)较传统方法降低约4%~37%。

关键词

切比雪夫拟合法(CPF), 交叉验证, 石油污染物

Simulation of Hydrocarbon Concentration Spatial Distribution in the Bohai Sea Using Chebyshev-Based Orthogonal Polynomial Fitting

Shuwei Guo

School of Science, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

Received: December 9, 2025; accepted: January 2, 2026; published: January 14, 2026

Abstract

This study utilizes the Bohai Sea, a shallow inland sea in China, as the study area to conduct pollutant spatial distribution modeling and impact assessment studies for the environmental risks posed

文章引用: 郭书苇. 基于切比雪夫函数的正交多项式拟合模拟渤海石油浓度空间分布[J]. 应用数学进展, 2026, 15(1): 198-209. DOI: 10.12677/aam.2026.151021

by petroleum hydrocarbon pollutants discharged into the marine ecosystem. Based on the 2018 comprehensive monitoring dataset of petroleum hydrocarbon concentrations, the study systematically compared error-related metrics of spatial interpolation methods and successfully reconstructed the spatial variation patterns of petroleum hydrocarbon concentrations throughout the year in the study area. The method reconstructed the spatial variation of petroleum hydrocarbon concentrations in the study area in all seasons. The findings of the study indicated that the Chebyshev fitting method (CPF) exhibited superior statistical performance in ten-fold cross-validation, with a mean absolute error (MAE = 0.0094 mg/L) and root mean square error (RMSE = 0.0160 mg/L) that were reduced by about 4%~37% compared with the traditional method.

Keywords

Chebyshev Fitting Method (CPF), Cross-Validation, Petroleum Contaminants

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

渤海作为中国重要的半封闭内海，因陆源污染物排放、近海开发强化及区域经济快速扩张，正面临日益加剧的生态压力。其中，石油污染物因其显著的生态毒性效应和生物累积特性，已成为威胁海洋生态系统的关键环境风险因子。近年监测数据显示，尽管渤海表层水体石油浓度总体符合《海水环境质量标准》(GB3097-1997) I-II 类限值(0.05 mg/L)，但辽东湾、莱州湾等敏感区域持续超出 II 类水质标准阈值，形成典型的环境质量梯度分布特征[1]。更值得关注的是，作为石油重要环境归宿介质的沉积物，其污染状况更为严峻。Wang、Yebao 等通过十年数据整合发现，渤海沉积物中石油含量呈现显著的时间递增趋势，该结论与 Zhou 等(2014)的研究结果相吻合——其在渤海湾表层沉积物中测得的石油浓度已超过《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)规定的限值[2] [3]。这种污染模式的形成机制与环渤海地区密集的石油开采(现有海底油井超过 2000 口)、繁忙的海上航运(年船舶通航量超过 10 万艘)以及频繁的溢油事故密切相关[4]。在此背景下，开展渤海石油空间分布模拟研究，不仅能为规划实施提供科学依据，更是提升海洋环境治理现代化水平的重要技术实践[5]。

尽管插值技术已在复杂数值建模领域广泛应用，但仍存在某些局限性，尚有进一步发展和改进的空间[6] [7]。但其局限性包括：影响半径选择困难、对稀疏数据适应性不足、插值结果过度平滑、未考虑背景值、计算效率较低，且相较其他方法精度不足导致插值误差较大[8]。因此，我们需要在确保拟合精度的同时，使方法更适应数据分布特性，且无需复杂的参数假设与调整过程。迄今，基于切比雪夫基函数的正交多项式拟合(CPF)技术已涉及人工智能、图像处理、海洋科学等多学科领域，该方法在海洋大气研究中也已成功应用。王等学者提出将伴随同化模型与切比雪夫基函数 CPF 技术相结合的新方法，旨在确定渤海和黄海浅水区的潮汐谐波成分。研究表明 CPF 在浅水区具有极高分辨率，有助于生成更精确的潮汐谐波图[9]。李等利用 CPF 成功揭示了中国中南部 PM_{2.5} 的时空分布特征[10]。该方法以高精度、数据适应性、细节捕捉能力和鲁棒性为特征，在海洋领域的空间插值中具有广阔应用前景。

石油分布通常呈现高度非线性特征，导致空间自相关结构具有显著各向异性，单一研究方法可能导致模型偏差[11]。因此，有必要基于不同算法的理论假设和权重机制，通过交叉验证和验证指标的统计分析，定量评估模型的稳健性，最终建立适用于渤海石油污染特征的优化插值体系[12] [13]。因此，本研究

选取多种拟合方法，从算法原理、数据适应性、精度等多维度进行分析。通过比较可清晰呈现不同方法处理石油数据的优劣势，进而验证石油数据处理的优化方向，为精准把握石油空间分布提供有力支撑。

本研究基于切比雪夫函数的 CPF 方法，对我国渤海区域石油浓度进行估算。论文结构如下：第一部分阐述研究背景与区域特征；第二部分详细描述研究区域和数据分析；第三部分对研究方法进行深入解析；第四部分第五部分为讨论总结。

2. 研究区域与数据分析

研究区域共分布 265 个监测站点。本次研究采用国家海洋科学数据中心(<https://mds.nmdis.org.cn/>) 2018 年石油浓度数据集，该数据经年度平均处理后为本研究提供支持。图 1 展示了 2018 年研究区 265 个监测站的石油年均浓度分布，各监测站的颜色深度直观地反映了该位置的石油浓度程度。采用四种方法分析了渤海区域石油浓度的空间分布。

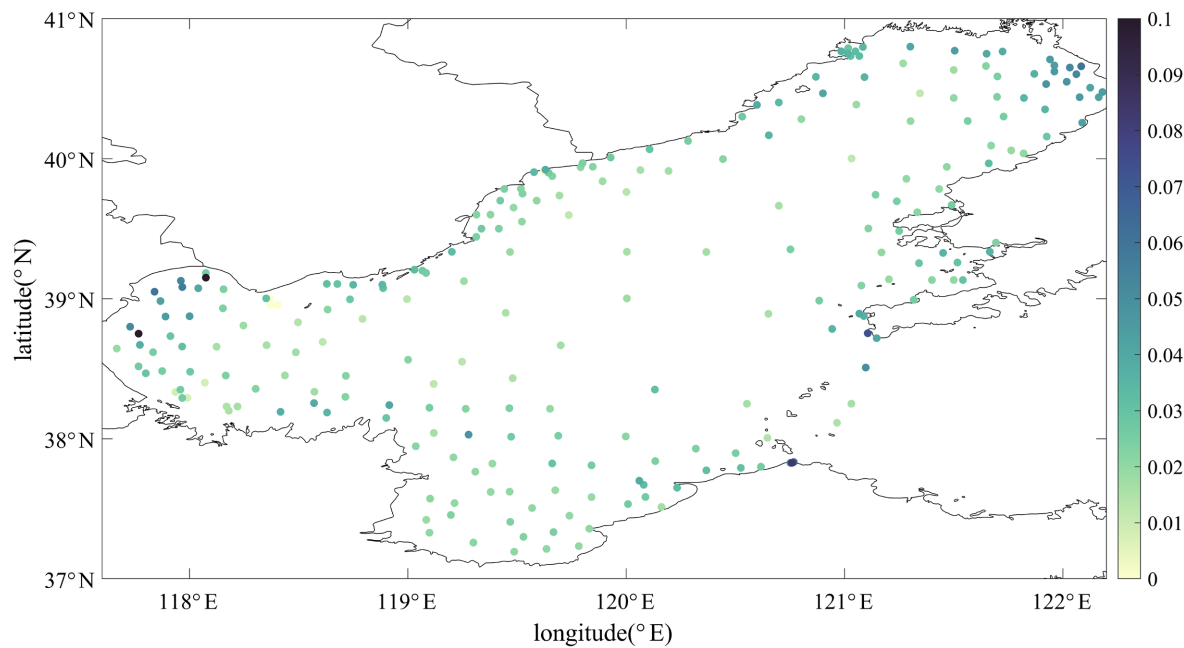


Figure 1. Annual average concentrations of petroleum hydrocarbons at 265 monitoring stations in the Bohai Sea, 2018
图 1. 2018 年渤海 265 个监测站石油年均浓度分布图

3. 研究方法与实验

3.1. 研究方法

(1) 切比雪夫多项式拟合法(CPF)能在拟合精度与复杂度之间取得平衡，从而在各类应用场景中实现最优拟合效果。基于切比雪夫基函数描述正交多项式拟合(CPF)方法[14]:

$$\begin{aligned} T_0(x_i) &= 1 \\ T_1(x_i) &= x_i - a_{1,0}T_0(T_0(x_i)) \\ T_2(x_i) &= x_i^2 - a_{1,0}T_0(T_0(x_i)) - a_{2,0}T_0(x_i) \\ &\dots \\ T_k(x_i) &= x_i^k - a_{k,k-1}T_{n-1}(x_i) - a_{k,k-2}T_0(x_i) - \dots - a_{k,0}T_0(x_i) \end{aligned}$$

在此表达式中, x_i (其中 $i=1,2,\dots,n$ 代表一系列 x 坐标点, k 表示 x 方向上多项式的最高次数)。 $T_k(x_i)$ 是 k 阶的切比雪夫多项式, 其系数记为 $a_{k,l}$ (其中 l 是 k 阶多项式的第 l 个系数), 计算方式如下:

$$a_{k,l} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i T_l(x_i)}{\sum_{i=1}^n T_l^2(x_i)}$$

$\tilde{z}(x_i, y_i)$ 表示石油浓度分布, 可拟合:

$$\tilde{z}(x_i, y_i) = \sum_{k=0}^{k_0} \sum_{s=0}^{s_0} A_{k,s} T_k(x_i) S_s(y_i)$$

(2) 三角多项式拟合法(TPF)需根据现有数据量确定合适的多项式阶数。将 TPF 的次数限定在 0 至 8 之间。TPF 方法如下[14]:

$$\begin{cases} \tilde{z}_i = \sum_{k=0}^{K_{\max}} \sum_{s=0}^{S_{\max}} (CC_{k,s}, CS_{k,s}, SC_{k,s}, SS_{k,s}) \cdot F_{k,s}(x_i, y_i) \\ F_{k,s}(x_i, y_i) = \begin{bmatrix} \cos(2\pi kx_i/T) \cdot \cos(2\pi sy_i/T) \\ \cos(2\pi kx_i/T) \cdot \sin(2\pi sy_i/T) \\ \sin(2\pi kx_i/T) \cdot \cos(2\pi sy_i/T) \\ \sin(2\pi kx_i/T) \cdot \sin(2\pi sy_i/T) \end{bmatrix} \end{cases}$$

$CC_{k,s}, CS_{k,s}, SC_{k,s}, SS_{k,s}$ 是常数系数, 也可通过最小二乘法确定。

3.2. 验证方法

(1) 为提高数据利用率并全面评估本研究中各种插值或拟合方法的性能, 我们将采用交叉验证方法。具体而言, 交叉验证方法将插值数据集分为 n 部分, 其中 $n-1$ 部分用于构建空间插值的训练集, 其余部分作为循环验证的验证集[15]。本研究采用了十折交叉验证法。

(2) 将 MAE 与 RMSE 结合作为评估指标, 可对预测结果的准确性进行更全面的评估[16] [17]:

MAE 计算公式:

$$\text{MAE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y_i - f(x_i)|$$

其中 m 为测试数据总数 ($i=1,2,\dots,m$), y_i 为石油观测值, $f(x_i)$ 为石油模型预测值。

RMSE 计算公式为:

$$\text{RMAE} = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - f(x_i))^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

其中 m 为测试数据总数 ($i=1,2,\dots,m$), y_i 为石油观测值, $f(x_i)$ 为石油预测值。

3.3. 实验过程

首先采用 10 倍随机交叉验证法确定 CPF 法和 TPF 法最优适配的顺序组合 ($K_{\max}=1,2,\dots,8$ 及 $S_{\max}=1,2,\dots,8$)。使用 CPF 和 TPF 方法拟合石油碳氢化合物浓度值, 对每组随机组合进行验证 ($K_{\max}=1,2,\dots,8$ 、 $S_{\max}=1,2,\dots,8$), 进行 10 个循环, 并通过计算所有交叉验证中拟合结果的平均误差来评估拟合结果。对两种拟合方法的结果进行了 10 次随机交叉验证评估, 通过比较交叉验证中拟合结果的

平均误差来评估两种方法的准确性，并选择准确性较高的拟合方法来重建渤海地区的石油浓度空间发布。

4. 敏感性分析

通过比较所有交叉验证中插值拟合结果的平均误差来评估两种拟合方法的准确性，并选择准确性较高的拟合方法来重建渤海地区的石油污染物浓度空间场。

本研究对 CPF 方法各阶数组合进行分析，计算出对应组合的平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)，具体数据见表 1 和表 2。数据表明，在充足数据支撑下，CPF 方法的多项式阶数组合对交叉验证平均误差结果影响甚微，仅呈现轻微波动，未因阶数变化导致显著误差增大。即使面对数据分布不均的情况，充足的数据量仍至关重要，能有效提升高阶 CPF 模型的拟合精度。在所有 CPF 阶数组合中，误差指标的比较分析表明 CPF 52 产生最低误差值，因此被确定为后续实验的最佳阶数组合。

Table 1. MAEs of CPF method (unit: mg/L)

表 1. CPF 方法的 MAE 值(单位: mg/L)

$K_{\max}$	$S_{\max}$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0111	0.0106	0.0105	0.0105	0.0106	0.0107	0.0108	0.0108
2	0.0102	0.0100	0.0095	0.0100	0.0103	0.0101	0.0101	0.0100
3	0.0104	0.0098	0.0098	0.0095	0.0098	0.0100	0.0100	0.0100
4	0.0101	0.0097	0.0096	0.0096	0.0100	0.0100	0.0101	0.0101
5	0.0100	0.0094	0.0095	0.0096	0.0099	0.0100	0.0100	0.0099
6	0.0100	0.0096	0.0097	0.0099	0.0102	0.0102	0.0103	0.0104
7	0.0100	0.0097	0.0098	0.0100	0.0103	0.0103	0.0106	0.0106
8	0.0098	0.0100	0.0098	0.0101	0.0104	0.0102	0.0106	0.0106

表中加粗数据为最优值。

Table 2. RMSEs of CPF method (unit: mg/L)

表 2. CPF 方法的 RMSE 值(单位: mg/L)

$K_{\max}$	$S_{\max}$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0176	0.0167	0.0168	0.0169	0.0171	0.0172	0.0173	0.0173
2	0.0169	0.0163	0.0161	0.0163	0.0166	0.0164	0.0164	0.0164
3	0.0167	0.0163	0.0163	0.0163	0.0163	0.0164	0.0164	0.0164
4	0.0164	0.0162	0.0161	0.0162	0.0166	0.0166	0.0165	0.0166
5	0.0164	0.0160	0.0162	0.0164	0.0167	0.0168	0.0167	0.0166
6	0.0164	0.0161	0.0163	0.0167	0.0171	0.0170	0.0171	0.0171
7	0.0165	0.0163	0.0166	0.0169	0.0173	0.0172	0.0176	0.0176
8	0.0164	0.0165	0.0166	0.0171	0.0172	0.0173	0.0176	0.0175

表中加粗数据为最低误差值。

对于 TPF 方法, 采用 10 折随机交叉验证法确定最佳拟合阶数组合相关统计结果见表 3 和表 4。从统计结果看, MAE 和 RMSE 两个指标均随阶数增加呈现上升趋势。尤其当 $K_{\max}, S_{\max} \geq 7$ 时, MAE 与 RMSE 值显著增大。该局限性源于多项式函数本身的特性[14]。在 TPF 的有理交叉实验中, 当阶数设定为特定值时, TPF51 的 MAE 达到最低值。此外, 表 4 分析表明: 在 10 折随机交叉验证中, 所有阶数组合的 RMSE 变化规律与 MAE 基本一致, 这进一步证实了 TPF51 在误差控制方面的稳定性和优越性, 故后续实验可统一采用 TPF51 模型。

Table 3. MAEs of TPF method (unit: mg/L)

表 3. TPF 方法的 MAE 值(单位: mg/L)

$K_{\max}$	$S_{\max}$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0105	0.0103	0.0100	0.0100	0.0102	0.0106	0.0109	0.0111
2	0.0100	0.0101	0.0099	0.0101	0.0106	0.0109	0.0114	0.0123
3	0.0100	0.0099	0.0103	0.0107	0.0112	0.0127	0.0152	0.0202
4	0.0100	0.0101	0.0110	0.0117	0.0136	0.0172	0.0281	0.0647
5	0.0098	0.0113	0.0124	0.0146	0.0184	0.0386	0.0836	0.2891
6	0.0101	0.0114	0.0123	0.0164	0.0285	0.0801	0.3860	100.2814
7	0.0103	0.0126	0.0153	0.0273	0.0512	0.4106	421.0813	51.5078
8	0.0109	0.0130	0.0177	0.0361	0.2288	167.3617	131.6728	36.3915

表中加粗数据为最低误差值。

Table 4. RMSEs of TPF method (unit: mg/L)

表 4. TPF 方法的 RMSEs 值(单位: mg/L)

$K_{\max}$	$S_{\max}$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0168	0.0167	0.0162	0.0164	0.0165	0.0168	0.0171	0.0173
2	0.0164	0.0165	0.0162	0.0167	0.0174	0.0182	0.0190	0.0210
3	0.0163	0.0165	0.0171	0.0181	0.0192	0.0227	0.0285	0.0380
4	0.0163	0.0169	0.0181	0.0203	0.0240	0.0307	0.0595	0.1500
5	0.0166	0.0182	0.0208	0.0256	0.0331	0.0839	0.2650	0.8804
6	0.0168	0.0192	0.0212	0.0310	0.0596	0.1903	1.1319	252.4707
7	0.0171	0.0218	0.0283	0.0596	0.1073	1.1965	1502.0080	142.1318
8	0.0179	0.0229	0.0335	0.0731	0.6624	502.7002	356.8144	74.6917

表中加粗数据为最低误差值。

表 5 展示了两种方法所有交叉验证的均方误差结果。两种拟合方法 CPF52 与 TPF51 的结果相对接近, 各交叉验证实验中均方误差(MAE)与均方根误差(RMSE)的差异均不超过 0.0023 mg/L。交叉验证实验

结果表 1~4 所示。在部分交叉验证实验组(CV3、CV4、CV8、CV9)中, CPF52 表现优于 TPF51; 其余实验组中两种方法差异较小。在所有交叉验证实验中, CPF52 与 TPF52 获得的 RMSE 值趋势最接近, 但 CPF52 的平均 RMSE 值高于 TPF51。其 RMSE 值比 TPF51 低 0.0006 mg/L, 最小 RMSE 值约为 0.0085 mg/L。

Table 5. The mean values of MAE and RMSE of each method in the ten-fold cross-validation
表 5. 十折交叉验证中各方法 MAE 与 RMSE 的均值

	CPF52	TPF51
MAE	0.0094	0.0098
RMSE	0.0160	0.0166

此外, 图 2 显示了在 10 倍交叉验证条件下, 估计值与观测石油浓度呈对比关系。中红色虚线划定偏差小于 0.03 mg/L 的边界范围。CPF52 方法结果表明, 其估算的石油浓度与观测值高度吻合, 96.54% 的值处于偏差小于 0.03 mg/L 的范围内, 充分证明该方法在石油浓度估算中具有高精度与可靠性。相比之下, TPF51 结果为 95.00%, 反映出在石油估算方面与 CPF52 法存在一定差距, 这进一步凸显了 CPF52 法在本研究中的优势与应用价值, 为后续相关研究与实践中的方法选择提供了依据。

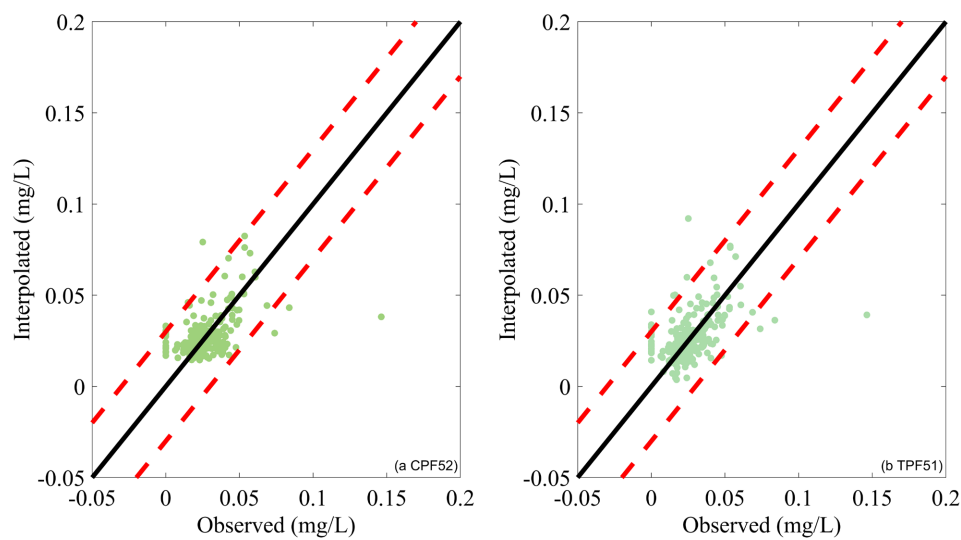


Figure 2. Scatterplot of the match between estimated and observed oil concentrations. The black line is the 1:1 line and the red dashed line is the cut-off line for deviations less than 0.03 mg/L. ((a) CPF52, and (b) Tri51) (Percentage of deviation: CPF52: 96.54%; TPF51: 95.00%)
图 2. 石油浓度估计值与观测值的散点图。黑线为 1:1 基准线, 红虚线为偏差小于 0.03 mg/L 的截断线。((a) CPF52, (b) Tri51) (偏差百分比: CPF52: 96.54%; TPF51: 95.00%)

而通过对空间分布结果的深入研究, TPF51 虽具有良好的误差表现, 但在反映现象真实性的平滑度上不及 CPF52 (图 3(a)), 尤其在渤海区域, TPF51 在石油浓度空间分布中呈现明显的“靶心”现象(图 3(b)), 无法清晰描绘石油烃的空间分布特征。进一步验证了 CPF52 在渤海油浓度空间分布模拟任务中具备显著的性能优势, 如图 3 所示。基于上述分析, CPT52 是本研究中建模石油浓度的最优插值方法, 交叉验证结果支持该结论。

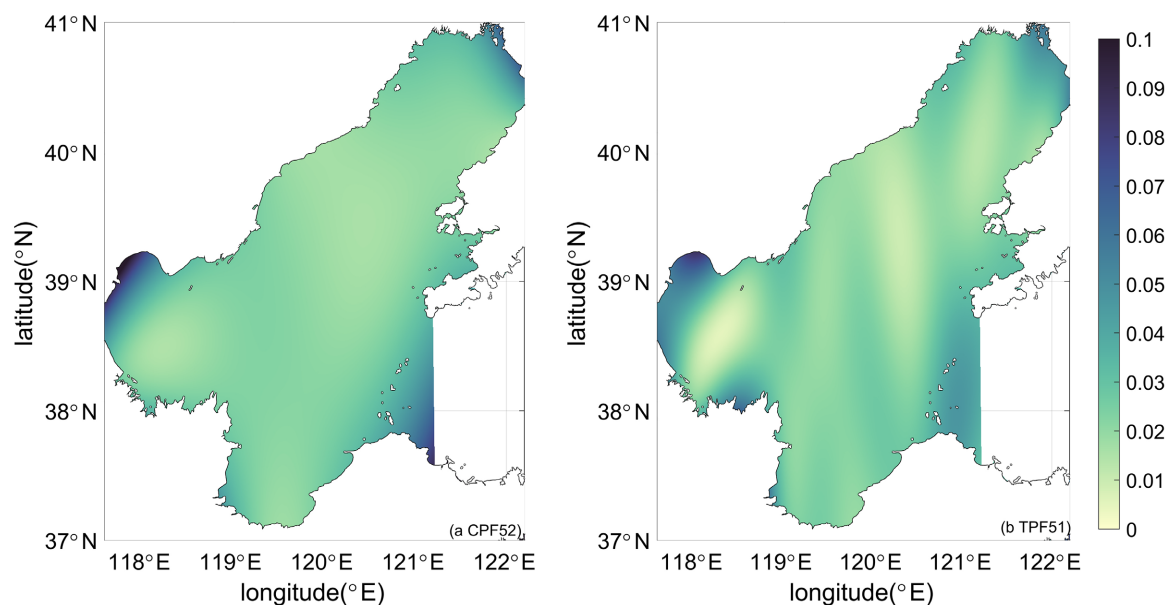


Figure 3. Petroleum hydrocarbon concentrations in the experiment calculated using (a) CPF52 and (b) TPF51

图 3. 采用(a) CPF52 和(b) TPF51 模拟石油浓度分布

5. 讨论

基于交叉验证实验与空间分布模拟结果, CPF52 方法在捕捉渤海石油浓度空间变异性方面具有显著优势。为进一步验证该方法在有效捕捉时变性方面的复杂行为[18], 本研究选取 2018 年 3 月 1 日至 5 月 29 日(春季)、2018 年 6 月 9 日至 8 月 31 日(夏季)、10 月 2 日至 11 月 22 日(秋季)及 2018 年 1 月(冬季)观测数据, 采用 CPF52 方法模拟 2018 年渤海石油浓度季节动态。本研究采用 CPF52 方法模拟了 2018 年渤海石油浓度季节变化规律, 旨在分析区域环境因素对渤海石油浓度空间分布的影响, 为渤海油污染精准治理提供更有针对性的科学理论支撑和实践指导。

5.1. 评价方法

本研究采用《国家环境保护部水环境质量标准(GB3097-1997)》中 I 类(II 类)海水质量标准作为海水污染评价基准, 并运用单因素污染指数评价法对渤海海域石油浓度进行评估, 计算公式如下[19]:

$$P_i = C_i / C_s$$

P_i 其中, 为测得石油浓度值, C_i 代表国家海水水质标准(GB3097-1997)规定的 I/II 类石油限值(0.05 mg/L)。若 $P > 1.0$, 表明该海域石油含量不符合对应功能分区的环境目标, 即超过《GB3097-1997 海水环境质量标准》I 类(II 类)标准。

5.2. 评价结果

本研究依据《海水环境质量标准》(GB3097-1997)规定的污染指数法, 对渤海海域表层海水油浓度进行了科学评估。表 6 列出了 2018 年渤海海域及三大重要海湾表层海水油浓度的纬度和经度范围、季度平均值、超标比例及污染指数。2018 年渤海海域整体表层海水油类浓度四季平均值为 0.0256 mg/L~0.1458 mg/L, 冬季油类浓度最高, 平均浓度 0.1458 mg/L, 超标率 36.87%; 其次为秋季, 平均浓度 0.1377 mg/L, 超标率 25.12%; 春季次之, 平均浓度 0.0435 mg/L, 超标率 16.46%; 夏季浓度最低, 平均浓度 0.0256 mg/L, 超标率 9.59%。就平均污染指数而言, 秋冬季污染指数分别为 2.754 和 2.916, 超过国家海水一级(二级)水

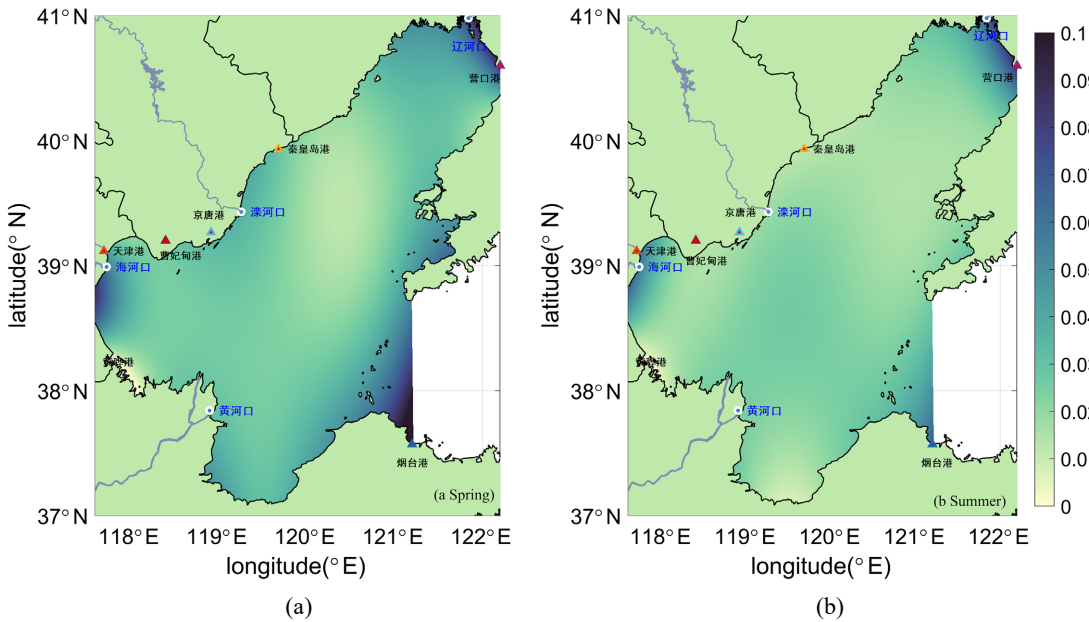
质标准；春夏两季污染指数分别为 0.870 和 0.512，符合国家海水一级(二级)水质标准。总体而言，渤海海域与 Reddy 等(2005)的研究结果一致，表明 CPF52 模型在模拟渤海石油浓度季节变化方面具有较高合理性和可靠性，能够更真实地反映渤海石油浓度的季节特征[20]。

Table 6. Seasonal changes in mean petroleum hydrocarbon values in surface seawater
表 6. 渤海表层海水平均石油值的季节变化

区域	经度纬度	季节	平均值(mg/L)	超标百分比 (>0.05 mg/L)	平均值 P_i
渤海	117.6°E~122.2°E 37°N~41°N	春	0.0435	18.46%	0.870
		夏	0.0256	9.59%	0.512
		秋	0.1377	25.12%	2.754
		冬	0.1458	36.87%	2.916

图 4 为渤海海域四季表层水体石油浓度分布情况。相较于其他三季，冬季石油浓度较高，尤其在近海区域更为显著。具体到渤海管辖的三个海湾，春夏两季海湾水域石油浓度均符合国家 I 类(II 类)海水水质标准。秋季时，渤海湾石油浓度超过国家 I 类(II 类)海水水质标准，其中渤海湾近岸区域石油浓度显著高于其他区域。冬季时，渤海湾与莱州湾的石油浓度显著高于辽东湾，均超过国家一类(二类)海水水质标准。尽管辽东湾海域整体符合国家一类(二类)海水水质标准，但辽东海域东岸存在小范围高浓度石油污染区域。

从图中可见，高浓度石油污染主要集中于近岸区域。陆源排放可能是导致渤海油污染的关键因素之一。Yu 等发现，渤海正面临由石油平台作业、船舶航行及港口活动引发的多重油污染威胁。近几十年来，每年约有 84 万吨石油类污染物通过主要河流排入渤海，导致渤海水质持续恶化[4]。与此同时，Wang 等运用地理信息系统评估了渤海石油污风险，结果显示辽东湾与渤海湾为高风险区域，陆源输入是渤海石油污染的重要来源[2]。



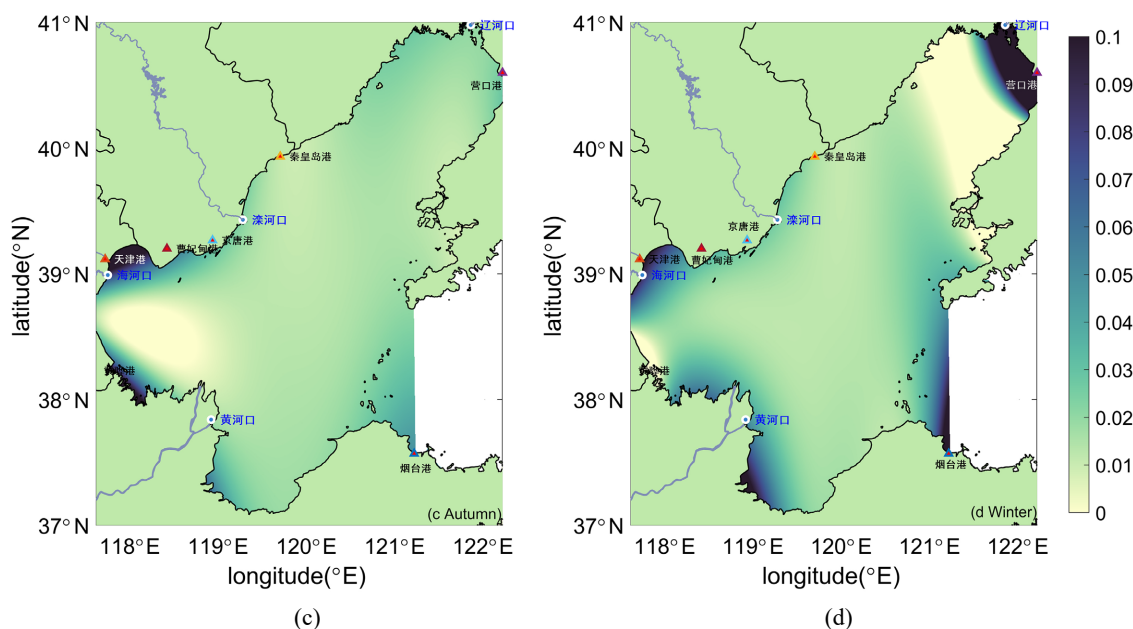


Figure 4. Characteristics of the planar distribution of oil in surface seawater by season. CPF51 four-season concentration map: (a) Spring, (b) Summer, (c) Autumn, (d) Winter

图 4. 不同季节表层海水中石油平面分布特征。CPF52 四季浓度分布图：(a) 春季，(B) 夏季，(c) 秋季，(d) 冬季

渤海海域石油污染物浓度及水质状况呈现显著的季节性差异。春季河流处于枯水期，陆源石油输入通量减少，但由于渤海半封闭的水体特性，污染物扩散能力较弱，使得沿岸区域石油污染物浓度仍维持较高水平，整体水质大致符合国家 I~II 类海水水质标准[21]。夏季径流量增加，在水动力稀释、微生物降解、东南风驱动的扩散作用以及高温促进降解等多重因素共同影响下，加之悬浮固体浓度较低，抑制了颗粒态石油的二次释放，石油浓度降至全年最低，水质基本符合国家 I~II 类标准[22]。秋季陆源输入持续，同时受半封闭地形、水动力扩散减弱、西北风作用及水温下降导致的微生物活性抑制等因素叠加，形成正反馈机制[2]，石油污染物逐渐富集，水质明显超过国家 I~II 类标准，其中渤海湾近岸区域尤为显著。冬季受干旱期径流减少、水体交换能力弱、低温抑制微生物好氧降解、光照不足导致石油蒸发与光解减缓，以及北向季风输送等多重因素耦合影响[23]，石油浓度显著超标，污染主要集中于三大海湾的入海口及沿岸区域，以辽东湾右岸最为突出。

6. 讨论

研究探讨了两种不同拟合方法在模拟渤海石油浓度空间分布中的有效性。通过分析 2018 年渤海 265 个监测站点的年均石油浓度数据，发现 CPF52 法在交叉验证中表现出最小的均方根误差(MAE)和均方根误差(RMSE)，分别为 0.0094 mg/L 和 0.0160 mg/L。这表明 CPF52 法在处理非均匀分布的石油浓度数据时具有高精度与高准确度。交叉验证结果显示，该方法在大多数交叉实验中的平均误差均低于其他三种方法，尤其在 CV3、CV4、CV8 和 CV9 交叉实验中表现尤为突出。此外，CPF52 方法的误差主要集中在 0~0.03 mg/L 区间，该区间误差占比达 98.08%。而 TPF51 方法虽在低阶时表现接近 CPF52，但因多项式特性，高阶($K_{\max}, S_{\max} \geq 7$)时误差显著增大，存在过拟合风险。这表明 CPF52 方法在抑制大误差发生概率方面表现卓越，能更有效避免因大偏差导致的数据扭曲和结果偏倚，其中 96.54% 的数值偏差小于 0.03 mg/L，显著优于其他方法。此外，在空间分布模拟方面，CPF52 方法呈现出更平滑的浓度空间分布模式，与观测结果一致。季节性模拟进一步揭示了渤海石油浓度的动态机制：冬季高浓度(高达 0.4988 mg/L)可

能与北风驱动的海流聚集效应及海冰阻碍水体交换有关,而夏季低浓度则与船舶排放减少及禁渔期水体混合增强相关。此外,陆源输入和海洋活动对油浓度分布具有显著影响,验证了人类活动与自然过程相互作用对污染物分布的驱动作用[21]。

本研究在模拟渤海石油浓度空间时,因设备限制或环境干扰导致冬季数据较为稀疏,致使拟合精度降低,未能真实反映辽东湾的石油浓度分布特征[22]。后续研究需整合渤海石油多源数据,拓展拟合数据来源以降低误差。同时应借鉴生态系统建模方法,运用敏感性分析驱动参数优化以提升拟合精度[10]。未来需建立针对渤海石油动态特征的区域定制化参数体系,并探索多算法融合方案。

参考文献

- [1] Guo, W., Wu, G., Xu, T., Li, X., Ren, X. and Hao, Y. (2018) Numerical Modelling of Temporal and Spatial Patterns of Petroleum Hydrocarbons Concentration in the Bohai Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **127**, 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.017>
- [2] Wang, Y., Du, P., Liu, B. and Wu, X. (2023) Geographic Information System-Based Comprehensive Oil Spill Risk Assessment in China's Bohai Sea. *Frontiers in Marine Science*, **10**, Article ID: 1141962. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1141962>
- [3] Zhou, R., Qin, X., Peng, S. and Deng, S. (2014) Total Petroleum Hydrocarbons and Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay, China: Long-Term Variations in Pollution Status and Adverse Biological Risk. *Marine Pollution Bulletin*, **83**, 290-297. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.003>
- [4] Yu, J., Zhou, D., Yu, M., Yang, J., Li, Y., Guan, B., et al. (2021) Environmental Threats Induced Heavy Ecological Burdens on the Coastal Zone of the Bohai Sea, China. *Science of the Total Environment*, **765**, Article ID: 142694. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142694>
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 生态环境部等五部委联合发布《海洋生态环境保护“十四五”规划》[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202201/t20220117_967330.shtml, 2022-01-17.
- [6] Oliver, M.A. and Webster, R. (1990) Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, **4**, 313-332. <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>
- [7] Gao, Y., Guo, J., Wang, J. and Lv, X. (2022) Assessment of Three-Dimensional Interpolation Method in Hydrologic Analysis in the East China Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, **10**, Article No. 877. <https://doi.org/10.3390/jmse10070877>
- [8] Liu, Y., Yu, J., Shen, Y. and Lv, X. (2016) A Modified Interpolation Method for Surface Total Nitrogen in the Bohai Sea. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **33**, 1509-1517. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-15-0250.1>
- [9] Wang, Q., Zhang, Y., Wang, Y., Xu, M. and Lv, X. (2022) Fitting Cotidal Charts of Eight Major Tidal Components in the Bohai Sea, Yellow Sea Based on Chebyshev Polynomial Method. *Journal of Marine Science and Engineering*, **10**, Article No. 1219. <https://doi.org/10.3390/jmse10091219>
- [10] Li, B., Liu, Y., Wang, X., Fu, Q. and Lv, X. (2019) Application of the Orthogonal Polynomial Fitting Method in Estimating PM_{2.5} Concentrations in Central and Southern Regions of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**, Article No. 1418. <https://doi.org/10.3390/ijerph16081418>
- [11] Xie, Y., Chen, T., Lei, M., Yang, J., Guo, Q., Song, B., et al. (2011) Spatial Distribution of Soil Heavy Metal Pollution Estimated by Different Interpolation Methods: Accuracy and Uncertainty Analysis. *Chemosphere*, **82**, 468-476. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.053>
- [12] Zimmerman, D., Pavlik, C., Ruggles, A. and Armstrong, M.P. (1999) An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting. *Mathematical Geology*, **31**, 375-390. <https://doi.org/10.1023/a:1007586507433>
- [13] Li, J. and Heap, A.D. (2014) Spatial Interpolation Methods Applied in the Environmental Sciences: A Review. *Environmental Modelling & Software*, **53**, 173-189. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- [14] Nie, Y., Wang, Y. and Lv, X. (2019) Acquiring the Arctic-Scale Spatial Distribution of Snow Depth Based on AMSR-E Snow Depth Product. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **36**, 1957-1965. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-18-0217.1>
- [15] Hansrajh, A. (2017) An Advanced Ensemble Approach for Detecting Fake News. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:250105318>
- [16] Willmott, C.J., Matsuura, K. and Robeson, S.M. (2009) Ambiguities Inherent in Sums-of-Squares-Based Error Statistics. *Atmospheric Environment*, **43**, 749-752. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.005>

-
- [17] Chai, T. and Draxler, R.R. (2014) Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)? Arguments against Avoiding RMSE in the Literature. *Geoscientific Model Development*, **7**, 1247-1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
 - [18] Collins, F.C. (1999) A Comparison of Spatial Interpolation Techniques in Temperature Estimation. <http://hdl.handle.net/10919/38139>
 - [19] Min, Y., Qian, C., Chaozhong, X., Lijuan, H. and Linhao, N. (2022) Analysis of the Environmental Quality of Seawater in the Bohai Sea, China. *International Journal of Agricultural Science and Food Technology*, **8**, 253-259. <https://doi.org/10.17352/2455-815x.000174>
 - [20] Reddy, M.S., Basha, S., Joshi, H.V. and Ramachandraiah, G. (2005) Seasonal Distribution and Contamination Levels of Total Petroleum Hydrocarbons and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Marine Environment at Alang[-]sosiya Ship Scrapping Yard, Gulf of Cambay, India. *International Oil Spill Conference Proceedings*, **2005**, 149-160. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-149>
 - [21] He, D., Zhang, K., Cui, X., Tang, J. and Sun, Y. (2018) Spatiotemporal Variability of Hydrocarbons in Surface Sediments from an Intensively Human-Impacted Xiaoqing River-Laizhou Bay System in the Eastern China: Occurrence, Compositional Profile and Source Apportionment. *Science of the Total Environment*, **645**, 1172-1182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.193>
 - [22] Tian, S., Gaye, B., Tang, J., Luo, Y., Li, W., Lahajnar, N., *et al.* (2022) A Nitrate Budget of the Bohai Sea Based on an Isotope Mass Balance Model. *Biogeosciences*, **19**, 2397-2415. <https://doi.org/10.5194/bg-19-2397-2022>
 - [23] Chen, J., Li, F., Fan, Z. and Wang, Y. (2016) Integrated Application of Multivariate Statistical Methods to Source Apportionment of Watercourses in the Liao River Basin, Northeast China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **13**, Article No. 1035. <https://doi.org/10.3390/ijerph13101035>