J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(3):000-000
DOI 10.18307/2026.0323

内蒙古岱海表层沉积物氟化物赋存特征及基于吸附解吸动力学影响因素分析*

王熙正 [1],卢俊平 [1,2,3,4,5*],刘莹慧 [1],吕纯剑 [1,2,3,4,5],孙嘉乐 [1],米家辉 [1],李卓 [1],张昊 [1]
（1：内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，呼和浩特 010018）
（2：内蒙古农业大学旱区水工程生态环境全国重点实验室，呼和浩特，010018）
（3：内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室，呼和浩特 010018）
（4：黄河流域内蒙段水资源与水环境综合治理自治区协同创新中心，呼和浩特，010018）
（5：岱海湿地水文与生态环境内蒙古自治区野外科学观测研究站，凉城, 015000）

摘　要：内蒙古分布的众多湖泊受到环境变化影响出现氟化物浓度超标问题，对人体和湖泊产生致癌性健康风险和潜在生态环境风险。为了深入探讨湖泊沉积物中氟化物的赋存形态特征，揭示氟化物的吸附-解吸行为与影响因素之间的响应关系。以岱海为研究对象，采集表层沉积物样品，通过多级提取检测不同形态氟化物含量，应用 ArcGIS 软件进行氟化物时空差异性分析，进一步设计了 4 因素、3 水平沉积物氟化物吸附-解吸正交模拟和吸附-解吸动力学模型模拟实验，揭示环境因子对寒旱区湖泊氟化物吸附和解吸行为的影响。结果表明：岱海沉积物中总氟含量均值为 860.44±53.64 mg·kg^{-1}，变化范围为 600.03~1388.67 mg·kg^{-1}。其中，水溶态、可交换态、铁锰结合态、有机束缚态氟化物含量变化范围分别为 29.51~42.87 mg·kg^{-1}，8.37~21.81 mg·kg^{-1}，2.46~7.21 mg·kg^{-1}，9.79~17.59 mg·kg^{-1}之间。对沉积物氟化物吸附-解吸过程拟合分析得出，不同初始浓度条件下，准二级动力学模型拟合度更高，能够更好地表征该吸附体系的动力学过程；选用 Langmuir、Freundlich 两种热力学模型拟合分析氟化物吸附行为，证实吸附过程中单层吸附起关键作用，而非均相表面的多分子层吸附也是影响吸附行为的重要因素；进一步通过正交实验数据极差分析和方差分析，确定了各环境因素对吸附效果的影响程度和显著性。其中，温度是氟化物吸附-解吸的核心驱动因子（ANOVA 显著性：温度>初始浓度>扰动强度>pH）。根据 k 值筛选出最优条件：初始浓度 10 mg·L^{-1}，温度 20 ℃，pH=7，震荡频率 200 r·min^{-1} 本研究可为寒旱区湖泊沉积物氟释放污染防控提供重要的理论支撑。

关键词：岱海氟化物；吸附解吸；动力学；热力学；正交实验

Analysis of fluoride occurrence characteristics and influencing factors in surface sediments of Lake Daihai (Inner Mongolia) based on adsorption models

Wang Xizheng[1], Lu Junping[1,2,3,4,5**], Liu Yinghui[1], Lyu Chunjian[1,2,3,4,5],Sun Jiale[1], Mi Jiahui[1], LiZhuo[1] & Zhang Hao[1]
(1:Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, P.RChina)
(2:State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, P.R.China)

---

* 2025-07-10 收稿；2025-09-02 收修改稿。
国家自然基金重点项目区域联合基金（U24A20633）、内蒙古自治区科技计划项目（2023YFHH0060,2025YFHH0188）、国家自然科学基金项目(52260029)、内蒙古自治区教育厅科技英才项目(NJYT22040)、内蒙古农业大学青年教师科研能力提升基金项目（BR220102）、内蒙古自然科学基金项目(2022MS05053，2024QN05005）和内蒙古自治区科技领军人才团队项目（2022LJRC0007）联合资助。
** 通信作者；E-mail：lujunping2008@imau.edu.cn。

(3:Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018, P.R.China)
(4:Inner Mongolia Autonomous Region Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Section of the Yellow River Basin, Hohhot 010018,P.R. China)
(5:Daihai Wetland Hydrology and Ecological Environment Field Scientific Observation and Research Station of Inner Mongolia Autonomous Region, Liangcheng, 012000，P.R.China)

Abstract: Lakes across Inner Mongolia are increasingly affected by elevated fluoride concentrations due to environmental changes, posing significant ecological and human health risks, including carcinogenic threats. To elucidate the speciation of fluoride in lake sediments and the factors governing its adsorption-desorption behavior, we conducted a study on Lake Daihai. Surface sediment samples were collected, and fluoride speciation was determined using sequential extraction. The spatiotemporal distribution of fluoride was analyzed with ArcGIS. Furthermore, a 4-factor, 3-level orthogonal experiment and adsorption-desorption kinetic modeling were employed to investigate the influence of environmental factors on fluoride behavior in sediments from cold arid lakes. Results indicated that the average total fluoride content in the sediments was 860.44 ± 53.64 mg/kg, ranging from 600.03 to 1388.67 mg/kg. The concentrations of water-soluble, exchangeable, Fe/Mn-bound, and organic-bound fluoride ranged from 29.51 to 42.87 mg/kg, 8.37 to 21.81 mg/kg, 2.46 to 7.21 mg/kg, and 9.79 to 17.59 mg/kg, respectively. Kinetic analysis revealed that the pseudo-second-order model provided a superior fit across different initial concentrations, indicating its appropriateness for describing the adsorption process. Thermodynamic fitting with Langmuir and Freundlich models confirmed that monolayer adsorption was dominant, with multilayer adsorption on heterogeneous surfaces also being a significant mechanism. Range and variance analysis of the orthogonal experiment identified temperature as the core driving factor for fluoride adsorption-desorption (significance order: temperature > initial concentration > disturbance intensity > pH). The optimal adsorption conditions were determined as an initial concentration of 10 mg/L, a temperature of 20 °C, pH 7, and a shaking frequency of 200 r/min. This study provides a critical theoretical basis for managing fluoride release from lake sediments in cold, arid regions.
Keywords: Fluoride in Lake Daihai; Adsorption-desorption; Kinetics; Thermodynamics; Orthogonal Experiment

氟化物是天然水体的组成部分之一，广泛存在于河流、湖泊、地下水等水体中。水中的氟化物通常来源于岩石和矿物的溶解过程，特别是含有氟的矿物，如氟石（CaF_2）和萤石。这些矿物在水流通过时会释放氟离子，水中氟含量的高低与所流经的岩石富氟程度有着密切关系。受地质条件影响，不同地区水体中氟的含量存在着显著差异。刘东生院士[5]深入研究了中国氟物质的地质和地球化学背景，以及地方性氟病的分布特点。认为中国的地方性氟病主要集中在四个区域，这些区域的氟源均来自富含氟的岩石，同时干旱和半干旱的地质环境有助于氟的积累，大部分氟化物以沉淀、吸附和络合等形式积聚在沉积物中，蓄积在沉积物中的氟化物不仅会对底栖生物造成直接影响，还会在沉积环境条件发生变化时向水体中释放，导致沉积物成为水生态系统中最重要的内部污染源[6]。氟化物具有非生物降解性，可通过生物累积和食物链传播，进而影响整个生态系统[错误!未找到引用源。]。由此可见，研究氟化物在湖泊沉积物中的赋存形态，有助于深入理解该地区生态系统中氟的迁移与转化机制，对预测和控制氟化物对水体及生态系统潜在风险具有重要的实际意义。

目前，纵多学者对我国南方和中原地区地表和地下水体氟化物展开了一些相关研究报道，如戴星[8]等研究了松嫩平原高氟区水库地表水氟化物的时空分布规律、影响因素，并评估了其健康风险。Qingqing Liu [错误!未找到引用源。]等研究了山西省地下水氟和砷污染变化情况，为减少地下水污染和防范居民健康风险提供了支持和建议。关于岱海水环境、水生态恶化的问题也进行了广泛研究，研究焦点集中于讨论湖泊沉积物污染释放[错误!未找到引用源。]、面积萎缩[错误!未找到引用源。]、生物多样性减少[错误!未找到引用源。]等问题，对湖内沉积物中氟化物污染的系统性研究关注较少，张博[13]等仅对岱海沉积物中氟化物的空间分布特征进行了报道，忽略了氟化物沉积物-上覆水水界面迁移机理的研究。湖泊沉积物是连续、高分辨率的“地质档案”，记录着流域内环境的变化。氟的行为（迁移、

富集、释放）对环境条件极为敏感。现有研究证实氟化物大量存在于湖泊沉积物中，而湖泊沉积物中氟化物吸附解吸行为、赋存形态转化与环境因素动态变化的响应关系缺少深入研究。尤其对于分布于半干旱区内陆湖泊由于其独特的水文地球化学条件，如强蒸发作用、高氟背景值，以及显著的季节性温差，其沉积物中氟化物迁移转化机制更加复杂，如何准确辨识岱海沉积物氟化物的赋存形态及分布特征，进一步采集高氟化物分布区沉积物开展吸附-解吸模拟试验，应用动力学与热力学模型揭示沉积物中氟化物迁移机理具有重要研究价值。

岱海是我国北方重要的湖泊之一，位于中国内蒙古高原，是内蒙古地区第三大内陆湖泊，担负着内蒙古自治区的生态功能调节、水土保持、涵养水源的重要任务。据遥感资料显示，1980-2020 年，岱海的水位下降了 9 m，湖泊面积由 200 km^2 萎缩至 50 km^2 左右，仅是原湖泊面积的 36.15%。湖泊水量的突变促使湖泊内物质发生浓缩，湖泊氟化物浓度持续升高。由于其独特的地理条件和气候特征，该地区湖泊沉积物中氟化物的分布及其迁移转化规律与其他地区存在显著差异。因此，本研究通过野外采样与室内模拟实验，深入探讨湖泊表层沉积物中氟化物的赋存形态特征及其影响因素，量化温度、pH 等因子对氟化物吸附-解吸的贡献度，建立适用于寒旱区湖泊的氟污染预测模型，旨在揭示氟化物在沉积物-水界面的迁移转化机制，从而为解决湖泊氟污染问题提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

岱海（112°30'~112°52'E，40°30'~40°45'N）位于中国北方的半干旱区，坐落于内蒙古自治区乌兰察布市的凉城县，地处温带半干旱大陆性季风气候区。岱海地处盆地的东南端，长 20 km，宽 10 km，2023 年湖面面积约为 45km^2，蓄水量为 5.19 亿 m^3，最大水深为 18.4 m，平均水深约为 6 m[14]。该湖为典型的尾闾湖，受季节性河流补给，但无外流。岱海的水源主要依赖于湖区降水、地表径流和地下径流，年平均气温为 5.1 ℃，多年最高日平均水温为 26.6 ℃，年平均降水量为 392 mm，且年均蒸发量高达 1938 mm[15]。本次在岱海湖区均匀布设 10 个采样点，涵盖了不同水深和地质类型，囊括了河口浅滩和湖心区域，编号为 DH1—DH10（图 1），于 2023 年 4-11 月和 2024 年 1 月，每月乘船采集样品。使用抓斗取泥器采取 0-10 cm 深的湖泊表层沉积物，将采集的沉积物样品在实验室自然风干（25℃，40 %RH），充分研磨后过 100 目筛，随后保存于封口袋中贮藏。

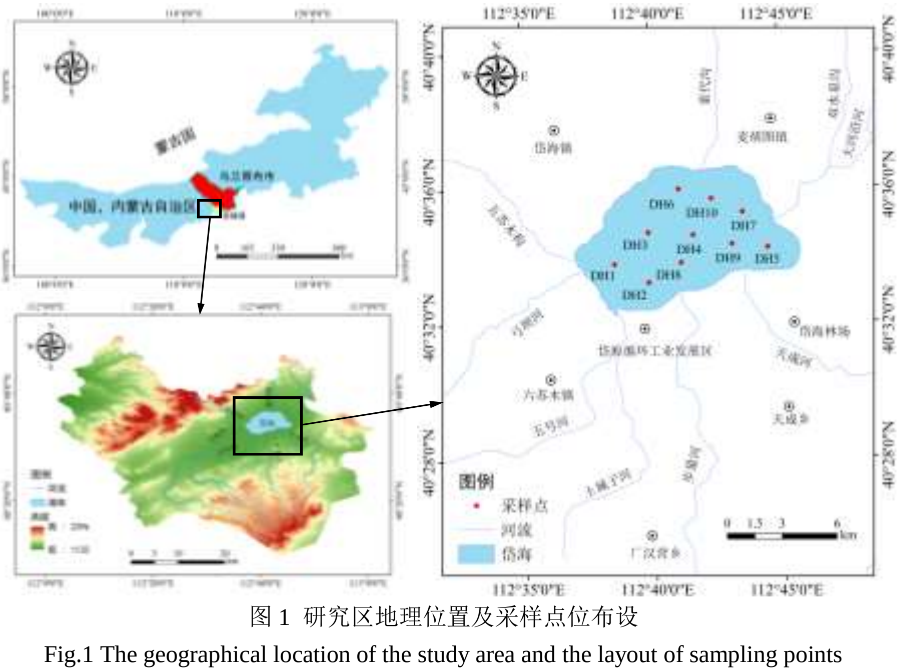


图 1 研究区地理位置及采样点位布设

Fig.1 The geographical location of the study area and the layout of sampling points

1.2 实验方法

1.2.1 *沉积物氟化物含量测定* 依据《土壤水溶性氟化物和总氟化物的测定离子选择电极法》(HJ 873-2017)，沉积物总氟含量测定采用碱熔-电极法，不同形态氟化物（包括水溶态、可交换态、铁锰结合态、有机束缚态以及残渣态）含量的测定，采用连续分级提取法对样品进行前处理，再用碱熔-电极法测定沉积物前处理步骤如下：

称取 1 g 处理后的沉积物样品，置于 100 ml 离心管中，加入 10 ml 超纯水，密封后将离心管放置于摇床上 70 ℃振荡 2 h，随后放入离心机(6000 r/min)离心，提取上清液过 0.45 μm 玻璃纤维滤膜，测定水溶态氟含量；用超纯水洗去残留的溶液，加入 10 ml 1 mol/L 的醋酸钠溶液，70 ℃振荡 2 h 后离心，收集滤液上清液，过滤并测定可交换态氟含量；对上一步样品清洗后加入 10 ml 0.04 mol/L (pH=2)盐酸羟铵溶液，60 ℃振荡 1 h，离心后过滤上清液，测得铁锰结合态氟含量；在上一步洗涤后的样品中加入 5 ml 30%的 H_2O_2，水浴振荡至 H_2O_2 完全挥发，随后加入 10 ml 3.2 mol/L 醋酸铵溶液，80 ℃振荡 1 h，离心后过滤上清液，测得有机束缚态氟含量；残渣态氟含量为总氟含量与可提取态氟含量的差值。

1.2.2 *吸附-解吸动力学实验* 称取 1.0000 g 过 80 目筛的表层沉积物样品，置于 3 个 100 ml 三角锥形瓶中。向锥形瓶中分别加入 50 ml 浓度为 5 mg/L、15 mg/L、30 mg/L 的 NaF 溶液。将锥形瓶置于恒温摇床中进行振荡。分别在 0、5、10、15、30、45、60、120、180 和 240 min 时间点取样，使用医用注射器吸取 5 ml 上清液并通过 0.45 μm 针式过滤器进行过滤。根据上覆水氟化物检测浓度值，及时补充相同体积或浓度的模拟水，确保待测液体积误差小于 0.1%。随后使用多参数测试仪 SevenDirect SD 50（METTLER TOLEDO，瑞士）测定上清液中氟化物的浓度。

在吸附实验达到振荡平衡后，弃去各样品中的上清液，向每个锥形瓶中加入 50 ml 蒸馏水继续振荡。同样在 0、5、10、15、30、45、60、120、180 和 240 min 时间点取样，收集上清液并通过 0.45 μm 滤膜，最后使用多参数测试仪测定上清液中氟化物的浓度。

吸附-解吸动力学模型用于描述吸附体系中溶质浓度随时间变化的动态过程。本次选取两种模型（准一级动力学模型，准二级动力学模型）对氟化物在沉积物表面的吸附-解吸过程及其作用机理进行分析。

一级动力学公式：

$$\frac{1}{q_t}=\frac{1}{q_1}+\frac{k_1}{q_1}\times\frac{1}{t} \qquad (1)$$

二级动力学公式：

$$\frac{1}{q_t}=\frac{1}{k_2\times q_2{}^2}+\frac{t}{q_2} \qquad (2)$$

式中，q_1、q_2 为平衡吸附量(mg/g)；t 为吸附时间(min)；k_1、k_2 分别代表准一、二级吸附动力学速率常数，min^{-1}、g·/(mg·min)。

1.2.3 *吸附-解吸热力学实验* 使用电子天平准确称取 1.0000 g 过 80 目筛的沉积物样品，分别装入 4 支 50 ml 离心管中，配制质量浓度分别为 0、2、4、6、8 mg/L 的氟化钠（NaF）溶液，向每支离心管中依次加入 25 ml 相应浓度的 NaF 溶液。将离心管置于恒温摇床中，分别在 15、25、35 ℃条件下，振荡 2 h，使吸附反应达到平衡，振荡结束后，取出离心管，以 8000 r/min 离心 10 min，取上清液经 0.45 μm 滤膜过滤。用电极法测定上清液中氟化物浓度，每个样品平行测定 3 次，取平均值作为最终结果。

吸附等温曲线描述了在恒定温度下，吸附质在吸附剂表面的吸附量随其压力或浓度变化的曲线。本试验采用 Langmuir 和 Freundlich 两种模型，对氟化物与沉积物之间的吸附热力学数据进行拟合分析。

Langmuir 公式：

$$\frac{1}{q_e}=\frac{1}{K_L\cdot Q_m\cdot C_e}+\frac{1}{Q_m} \qquad (3)$$

Freundlich 公式：

$$\lg q_e = \lg K_F + \frac{1}{n \cdot \lg C_e} \quad (4)$$

式中，K_L 为 Langmuir 吸特征常数(L/g)；Q_m 为沉积物中污染物的饱和吸附量；C_e 为污染物在液相中的质量浓度(mg/L)；q_e 为沉积物对污染物的吸附量(mg/g)；K_F 为 Freundlich 吸附特征常数(L/g)；n 为描述非线性程度的特征常数。

1.2.4 *吸附-解吸多因素正交模拟实验* 岱海沉积物对氟化物的吸附效果不仅受其自身理化性质的影响，还受到多种外部因素的制约，如 pH、扰动强度、温度以及上覆水氟离子浓度等。为模拟环境因子对湖泊沉积物氟化物吸附行为的驱动作用，本次设计多因素水平正交实验，研究了温度、pH、扰动强度（震荡频率）及上覆水氟离子浓度（初始浓度）对岱海沉积物氟化物吸附效果的影响。

设计 4 因素 3 水平正交表格，共进行九组实验。其中，氟化钠初始浓度与 pH 通过控制变量法进行调节。根据课题组前期研究成果，扰动强度设置为 3 个震荡频率梯度：快速震荡（200 r/min）、中速震荡（180 r/min）和慢速震荡（160 r/min），温度范围基于岱海年均温（15.1 ℃）和夏季峰值（27.1 ℃）设定为 15 ℃、20 ℃和 25 ℃。正交实验设计如表 1 所示。

表 1 正交实验因素和水平

Tab.1 Orthogonal experimental factors and levels

水平	因素			
	A 初始浓度($mg \cdot L^{-1}$)	B 温度(℃)	C pH	D 震荡频率($r \cdot min^{-1}$)
1	5	15	3	160
2	10	20	5	180
3	15	25	7	200

1.3 质量控制

试验所选用试剂均为分析纯，溶液使用去离子水进行配置，每 10 个样品同步测量 2 次空白试样（去离子水），在样品浓度中予以扣除。F^-标准溶液加标回收率控制在 95%~105%，样品均进行 3 次平行实验，结果以平均值表示，每组平行实验标准误差均<5%，用以保证实验精确性。

1.4 数据处理

实验数据采用 Excel 2022、IBM SPSS statistics 27 分析软件进行正交实验极差分析与方差分析；应用 Arcmap 10.8.2 绘制采样点位图，反距离权重法绘制含量分布图；使用 Origin 2024、R Studio 2024.12.0 进行模型拟合与图形绘制。氟化物及影响因子之间的相关性采用 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 沉积物氟化物含量水平及时空差异性分析

2.1.1 *表层沉积物中各形态氟化物含量水平* 岱海表层沉积物中总氟含量范围为 600.03~1388.67 mg/kg，平均值为 860.44±53.64 mg/kg，对比各地区沉积物中总氟含量(表 2), 岱海表层沉积物中总氟含量均值显著高于国内外大部分地区，但仍处于国内沉积物总氟含量变化范围内。

根据其化学特性和结合方式，沉积物中氟化物的赋存形态可分为水溶态，可交换态，铁锰结合态，有机束缚态以及残渣态。其中前 4 种形态统称为可提取态[24]。岱海表层沉积物中氟含量总体表现为：残渣态≫可提取态。可提取态氟含量介于 51.41~69.49 mg/kg 之间，均值为 60.67±1.95 mg/kg，占比 7.1%；残渣态氟含量介于 568.34~1197.34 mg/kg 之间，均值为 799.77±52.33 mg/kg，占比 92.9%（图 2）。在可提取态氟化物中，则表现为水溶态>有机束缚态>可交换态>铁锰结合态。水溶态氟和可交换态氟是沉积物中对环境变化最敏感的氟化物形态，有着较强的迁移性，易被生物吸收，在碱性条件下被称为生物有效氟[6],[25]。其中水溶态氟含量介于 29.51~42.87 mg/kg 之间，均值为 32.36±1.31 mg/kg；可交换态氟含量介于 8.37~12.52

mg/kg 之间，均值为 10.25±0.50 mg/kg。岱海作为封闭内陆湖泊，降水少，蒸发强烈，水体的矿化度和 pH 偏高。秦樊鑫[25]等人的研究表明，土壤中 pH 与水溶态氟呈极显著正相关，OH^-与 F^-具有相似的电荷和离子半径（OH^-≈1.40 Å， F^-≈1.33 Å），因此两者在土壤胶体表面的吸附位点上存在强烈的竞争吸附。沉积物中如铁氧化物（赤铁矿、针铁矿）、铝氧化物（三水铝石、勃姆石）、锰氧化物等组分表面常常带有正电荷，吸附在这些正电荷上 F^-称为可交换态氟化物。在碱性条件下，OH^-将吸附位点上的 F^-替换下来，使 F^-重新释放到上覆水中，进而转化为水溶态氟化物[26]。铁锰结合态氟与有机束缚态氟可通过吸收作用转化为生物有效氟[错误!未找到引用源。]，本研究中铁锰结合态氟含量介于 2.46~7.21 mg/kg 之间，均值为 4.84±0.50 mg/kg。在碱性环境中，铁锰氧化物表面因带有负电荷而对氟化物的吸附能力显著减弱[27]，且沉积物中存在的其他阴离子会与氟离子竞争吸附位点，进而降低铁锰结合态氟化物含量。有机束缚态氟化物是指氟化物与有机质通过吸附、络合或共价结合等方式形成的复合物[28]。有机束缚态在 9.79~17.59 mg/kg 之间，均值为 13.22±0.87 mg/kg。

表 2 各地区沉积物中氟化物含量水平汇总表 1)

Tab..2 Summary of fluoride content levels in sediments by region

地点	氟化物			地点	氟化物		
	范围 (mg/kg)	均值 (mg/kg)	数据来源		范围 (mg/kg)	均值 (mg/kg)	数据来源
埃及地中海东部	30-1000	380	[16]	莱州湾沿海	130-528	336	[21]
沙湖	936-1682	1261	[17]	内蒙古乌梁素海	328-1085	676	[22]
运城盆地	206-781	-	[18]	内蒙古高原达里诺尔湖	253-940	643	[6]
宁夏西吉县	200-900	629	[19]	中国沉积物	54-9364	506	[23]
北京永定河	217-814	424	[20]	内蒙古岱海	600-1389	860	本研究

1）“—”表示文章中没有相关数据

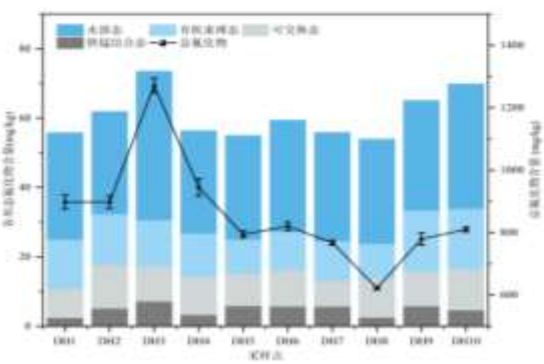


图 2 各形态氟化物含量图

Fig.2 Fluoride content of each form

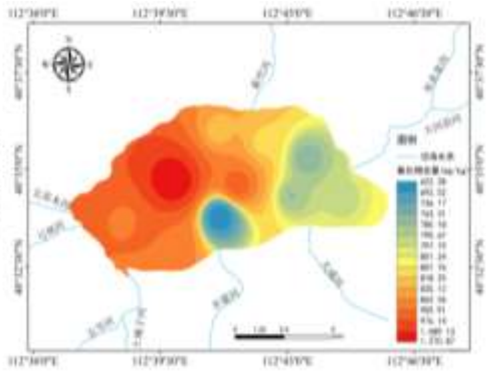


图 3 岱海表层沉积物总氟化物空间分布

Fig.3 Spatial distribution of total fluoride in surface sediments of Lake Daihai

2.1.2 表层沉积物中氟化物时空分布特征 岱海表层沉积物总氟含量空间分布如图 3 所示，总氟含量表现为西北部高，东南部低的分布特征，其中高值区（如 DH3 点位）总氟均值为 1270.87±24.00 mg/kg，较低值区（如 DH8）总氟均值高 104.23%。低值主要集中在南部湖区步量河与东部湖区双水泉沟、大河沿河交汇河口区域，高值主要集中在中西部湖区。其原因可能为氟化物浓度在河口处较低，汇入岱海湖体的河流对氟化物具有一定的稀释作用，进而导致河口沉积物总氟含量偏低；而岱海中西部总氟含量偏高这一现象可能与西部农业种植用地以及西南部岱海电厂早期循环水排污、入湖五苏木沟、弓坝河补给有关，也与西部工业发展区的用地规划密切相关。沉积物中各形态氟化物空间分布如图 4 所示，其中水溶态氟化物与总氟

化物分布基本一致，总体呈现出西北部高、东南部低的分布趋势；铁锰结合态氟化物呈现出南部>北部>西部>东部的特征；可交换态氟化物与有机束缚态氟化物分布情况复杂。

运用 RStudio 对岱海表层沉积物和界面上覆水体的基本理化指标进行相关性分析表明(图 5)，水溶态氟含量与总氟含量、铁锰结合态含量呈极显著正相关性(R 分别为 0.64、0.48，P<0.001)，与有机束缚态氟含量呈高度显著正相关性(R 为 0.31，P<0.01)，表明岱海水溶态氟化物与总氟化物、铁锰结合态氟化物、有机束缚态氟化物有着相同的变化趋势。可交换态氟含量与 pH、TDS 以及盐度(PSU)呈极显著负相关性(R 为-0.43，P<0.001)，与电导率呈高度显著正相关性(R 为 0.31，P<0.01)，证实了界面上覆水理化性质对表层沉积物中可交换态氟化物存在显著影响。有机束缚态氟可与大量存在的有机质竞争吸附位点或形成可溶性络合物[26]。由此可见，岱海表层沉积物中可交换态氟化物与有机束缚态氟化物含量可能与沉积物中稳态结合腐殖质分布趋势相关[29]，表层沉积物中氟化物含量的空间分异特征主要受区域地质环境与水动力条件共同调控[30]。具体而言，氟化物来源既包含岱海湖盆内源沉积作用产生的原生矿物释放，也涉及流域地表径流携带的外源输入。

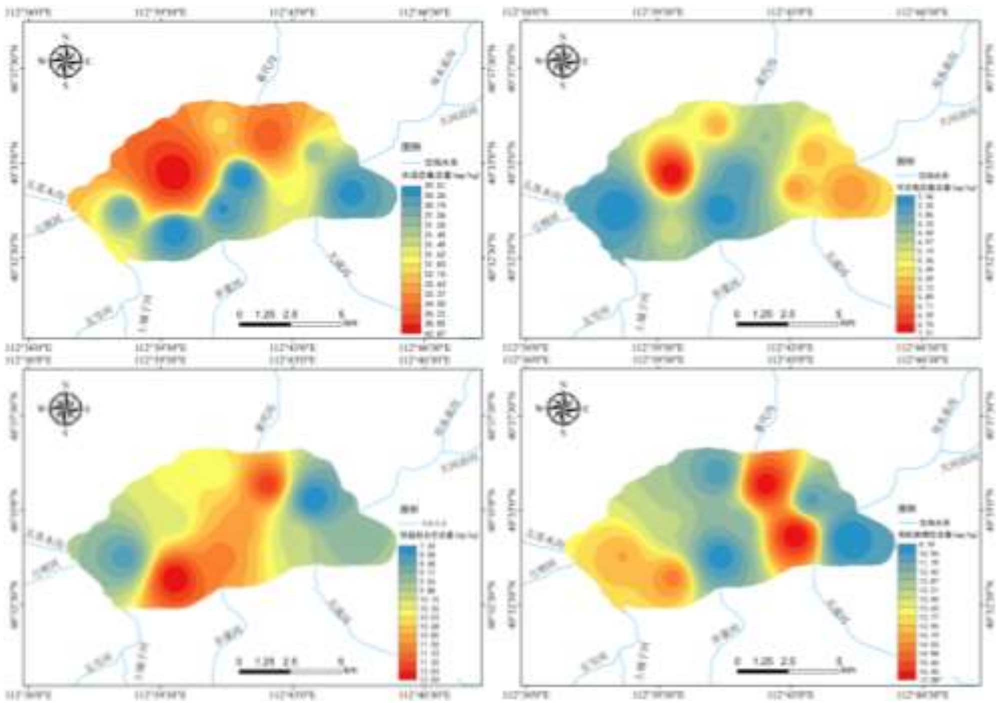
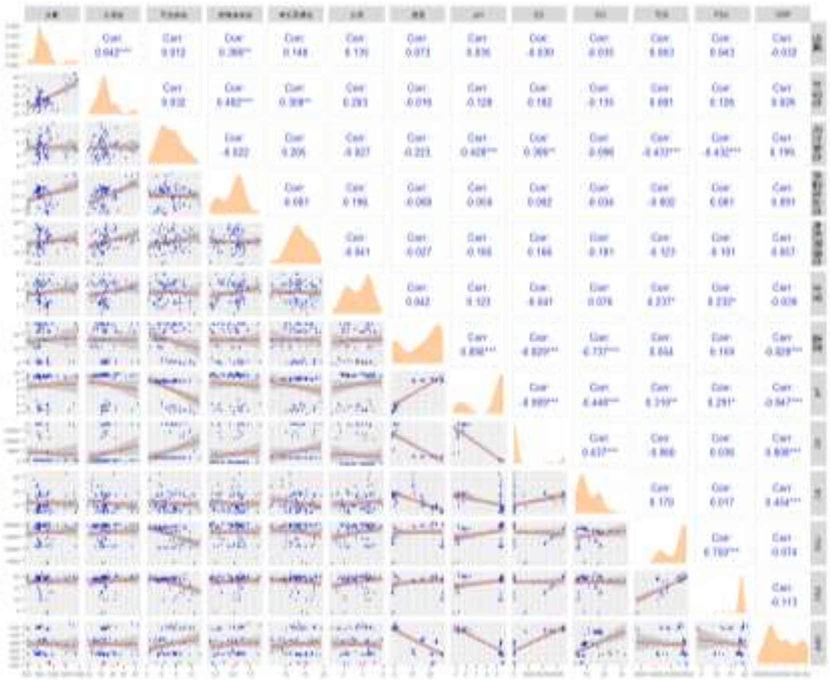


图 4 岱海表层沉积物可提取态氟化物空间分布

Fig.4 Spatial distribution of extractable fluoride in surface sediments of Daihai

2023 年 4-11 月，2024 年 1 月研究期内，岱海各月表层沉积物总氟含量范围在 600-1389 mg·kg⁻¹之间（图 6），6 月和 9 月总氟含量均值最高，当水体中的氟化物来源于土壤或地下水时，气温和降水协同作用导致湖泊降水补给、径流补给和蒸发量的增加，较强的水流可能会冲刷并携带陆地上的氟化物物质，进而加剧氟化物在水体和沉积物中的积聚。4 月由于天气原因，未能采集到 DH8、DH9、DH10 三个点位的沉积物样品，故不纳入分析范围。值得注意的是，7 月、8 月总氟均值较 6 月、9 月相比分别下降 3.63%和 3.31%，这一现象可能与夏季热力学条件改变导致的吸附-解吸动态平衡偏移有关。根据课题组同步测定结果[14]，岱海上覆水总氟浓度范围在春季（4 月、5 月）、夏季（6-8 月）、秋季（9-11 月）冬季（1 月）均值分别为 6.04、6.67、5.84 和 6.32 mg/L。其中夏季上覆水浓度均值较春季、秋季分别高 10.43%和 14.21%。结果表明，当温度超过氟化物吸附的最佳热力学阈值时，解吸行为增强，湖泊上覆水中氟化物含量升高，沉积物中氟化物含量降低。



***表示显著性 p<0.001，**表示显著性 p<0.01，*表示显著性 p<0.05

图 5 表层沉积物与界面上覆水体理化因子相关性分析

Fig.5 Correlation Analysis of Physical and Chemical Factors of Overlying Water Bodies on the Surface Sediments and Boundaries

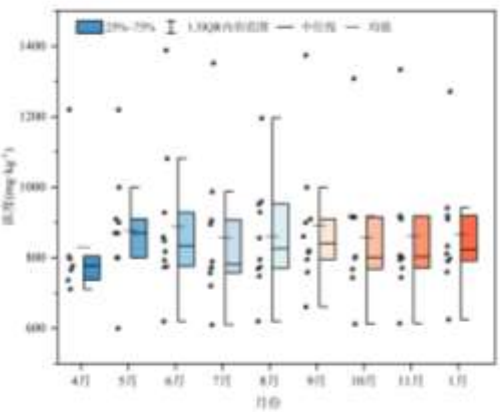


图 6 沉积物中氟化物时间分布特征

Fig.6 The temporal distribution characteristics of fluoride in sediments

2.2 沉积物中氟化物的吸附-解吸机理分析

2.2.1 吸附-解吸动力学分析 氟化物在岱海沉积物上的吸附动力学特征揭示了环境因子对吸附过程的多尺度调控机制。由图 7 可见，在不同初始浓度下，氟化物的吸附量随吸附时间变化逐渐增加，最终趋于饱和，趋势线逐渐平缓。具体来看，在前 15 min 内，吸附速率最快，斜率最大，氟化物在沉积物上的吸附量迅速增加，且已接近平衡状态下总吸附量的 93%以上，表明这一阶段为快速吸附阶段；在 20 至 25 min 之间，斜率逐渐趋平，氟化物在沉积物上的吸附速率开始减缓，吸附量的增加变得缓慢，进入了慢速吸附阶段；而在 100 min 后，吸附量已无明显波动，可认为吸附过程已达平衡，这一阶段为吸附平衡阶段。研究

表明，吸附速率受氟化物浓度和吸附位点的影响显著。吸附位点越多且活性越高，吸附速率越快，吸附量也越大。在快速吸附阶段，由于扩散阻力较小，氟化物主要通过扩散方式吸附在沉积物颗粒表面。沉积物含有有限的吸附位点，表面结构较为简单，主要的相互作用力包括范德华力、氢键和偶极力，且所需的活化能较低，此时分配作用占主导地位[31]；在慢速吸附阶段，沉积物表面的吸附位点逐渐趋于饱和，氟化钠开始从大孔径向小孔径扩散，克服更大的扩散阻力向沉积物内部扩散，导致吸附推动力减弱，加之岱海高盐碱度环境引发的竞争吸附行为，二者协同作用导致动力学迟滞，因此所需的活化能较高[32];最终，吸附过程趋于平衡。准一级动力学拟合度(R^2)高，表明吸附过程的整体速率受到物理扩散步骤的限制；准二级动力学拟合度(R^2)高，表明吸附过程的整体速率受到化学吸附步骤本身的限制。当初始浓度为 5 mg/L、15 mg/L、30 mg/L 时，准一级动力学模型 R^2 为 0.839、0.688 和 0.744(P<0.0001)，准二级动力学模型 R^2 为 0.840、0.696、0.740(P<0.0001)，相比之下，准二级动力学模型拟合度更高，其原因可能为沉积物中的铁锰氧化物提供了活性位点，吸附过程以表面络合为主导。但两种动力学模型拟合度较为接近,表明可能存在混合吸附机制共存的现象，需结合吸附热力学进一步分析。

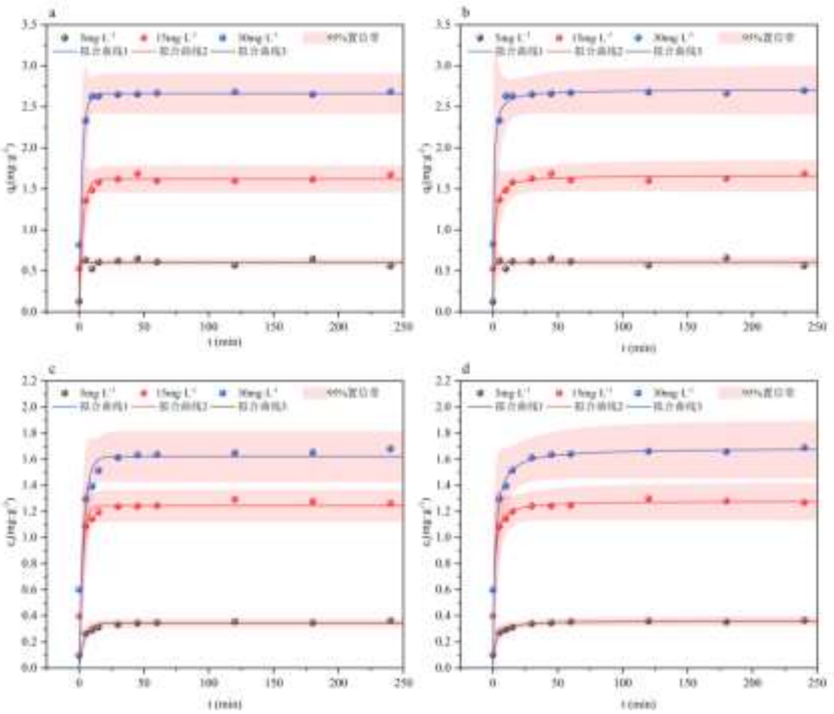


图 7 吸附-解吸动力学拟合曲线图

Fig.7 Adsorption - desorption kinetics fitting curve

在不同初始浓度下，氟化钠在沉积物上的解吸动力学的拟合趋势线如图如图 7(c)和 7(d)所示，解吸过程与吸附行为具有相似的动力学特征，均呈现快速反应、缓慢过渡及最终平衡的动态特征。实验数据显示，前 15 min 为快速解吸阶段，表现为解吸量急剧上升，随后解吸速率显著减缓，经历约 180 min 的缓慢过渡期后逐渐达到动态平衡。其中，解吸总量仅为吸附量的 24.6%，这种现象可能与吸附质-吸附剂间的特异性相互作用密切相关：一方面，表面络合与化学键合作用（如离子共价键形成）强化了吸附稳定性[33]，另一方面，沉积物中铁铝氧化物等活性组分提供的特定吸附位点，通过配位交换机制产生了选择性吸附效应，导致部分吸附质形成不可逆吸附现象。初始浓度为 5 mg/L、15 mg/L、30 mg/L 时，准一级动力学模型 R^2 分别为 0.818、0.721 和 0.586(P<0.0001)，准二级动力学模型 R^2 分别为 0.815、0.648、0.585(P<0.0001)，故准一级动力学模型较准二级动力学模型可更准确拟合表征氟化物在沉积物上的解吸

行为，表明解吸速率主要受固相内部扩散控制[34]，可能与岱海沉积物中黏土矿物的层间结构阻滞效应密切相关。

2.2.2 吸附热力学分析 吸附等温线经常被用在固-液吸附体系，来研究吸附质和吸附剂之间相互作用的关系。本次选用 Freundlich、Langmuir 两种模型[35]，其中 Freundlich 模型主要适用于非均质层物理吸附，Langmuir 模型主要适用于单分子层化学吸附。分别在 15 ℃、25 ℃、35 ℃ 的条件下对氟化物在沉积物上的吸附特性进行拟合分析，如图 8(a)、图 8(b)所示。在一定温度的范围内，氟化物吸附量随温度增加呈现升高趋势，表明升温有利于增强氟化物的吸附能力。然而当温度超过某一临界值时，氟化钠的溶解度增加，导致疏水作用减弱，从而影响吸附效果，该实验结果与本文 2.1.2 中岱海沉积物中氟化物均值的时间分布特征的结论相一致。根据拟合参数，比较 Langmuir 和 Freundlich 两种模型，发现 Langmuir 模型的确定系数 R^2在 0.983～0.999 之间，而 Freundlich 模型的确定系数 R^2在 0.981～0.996 之间。相比之下，Langmuir 模型的拟合优度更高，说明在吸附过程中，单层吸附起到了关键作用。Freundlich 模型的拟合效果次之，表明非均相表面的多分子层吸附也是影响吸附过程的重要机制。K_F 值的大小反映了吸附剂与吸附质之间的结合能力，且拟合曲线得到的 n 值大于 1，表明沉积物表面异质性显著，且与氟离子（F^-）之间具有较强的亲和力[36]。这些结果进一步证实了吸附过程并非简单的物理吸附，而是通过形成化学键实现的稳定化学吸附。赵鹬[37]等的研究也得到了与本实验相似的结果。

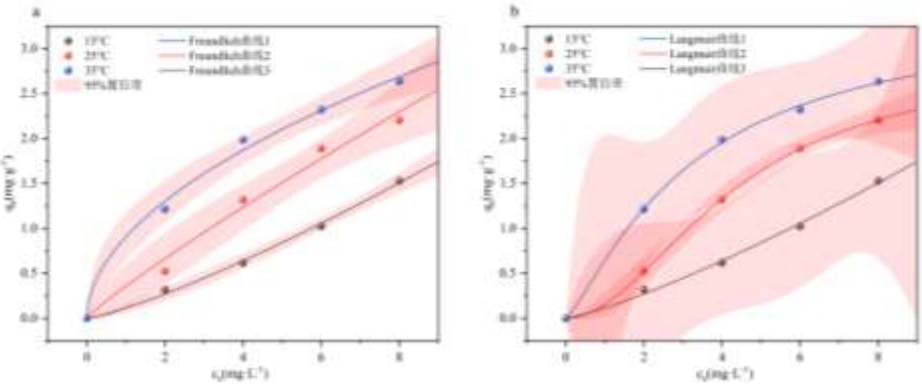


图 8 吸附热力学拟合曲线图

Fig.8 Adsorption thermodynamics fitting curve

2.2.3 吸附多因素正交实验结果分析 基于正交实验设计原理，本研究选取了对氟化物去除率影响最为显著的 4 种影响因素作为自变量，即氟化物初始浓度（A）、温度（B）、pH（C）以及震荡频率（D），并以氟化物去除率为响应值进行分析，旨在模拟环境因素对湖泊沉积物吸附行为的影响(表 3)。

对各影响因素、各水平下的氟化物去除率取平均值并进行分析与计算, 表 3 中极差 *R* 越大，表明该因素在实验过程中对氟化物去除率的影响越大。通过分析，初始浓度、温度、pH 和扰动强度（震荡频率）的极差分别为 2.73%、4.47%、1.27%和 1.73%。经比较可知，针对岱海沉积物对氟化物的吸附能力，上述 4 种因素中，对氟化物去除率的影响由大到小排序依次为：温度>初始浓度>扰动强度（震荡频率）>pH。单因素下 k 值越大，则该水平下氟化物去除率越高，去除效果越好。因此，根据分析结果，在氟化钠初始浓度为 10 mg/L，温度为 20℃，pH 为 7，扰动强度（震荡频率）为 200 r/min 的条件下，岱海沉积物对氟化钠的吸附行为最强烈，去除效果最佳。

对氟化物去除率进行方差分析(表 4),结果显示。氟化物去除率受到初始浓度、温度、pH、扰动强度（震荡频率）的影响，其中初始浓度和温度对氟化物去除率影响极其显著(P<0.001)，pH 和扰动强度（震荡频率）对氟化物去除率影响显著(P<0.05)，所选择的 4 种因素对氟化物去除率影响显著程度从大到小依次为：温度>初始浓度>扰动强度（震荡频率）>pH。

基于正交实验极差分析和方差分析结果表明，温度是沉积物-水界面氟化物吸附-解吸行为的核心驱动

因子，与岱海年温差达 30 ℃的强烈季节性波动存在耦合效应。该耦合效应有效阐明了研究区域表层沉积物中总氟均值在 7-8 月高温季相较于 6 月、9 月呈现异常降低现象的机理，与本文 2.1.2 章节揭示的表层沉积物氟化物含量时空分布特征相互印证。

表 3 正交实验结果与极差分析

Tab.3 Orthogonal experiment results and range analysis

编号	A 初始浓度 ($mg\cdot L^{-1}$)	B 温度 (℃)	C pH	D 震荡频率 ($r\cdot min^{-1}$)	两次重复实验去除率(%)		平均去除率±标准差(%)
1	1(5)	1(15)	1(3)	1(160)	89.1	90.3	89.7±0.85
2	1(5)	2(20)	3(7)	2(180)	92.4	91.8	92.1±0.42
3	1(5)	3(25)	2(5)	3(200)	89.9	88.3	89.1±1.13
4	2(10)	1(15)	3(7)	3(200)	94	94.8	94.4±0.57
5	2(10)	2(20)	2(5)	1(160)	95.9	95.3	95.6±0.42
6	2(10)	3(25)	1(3)	2(180)	89.8	88.4	89.1±0.99
7	3(15)	1(15)	2(5)	2(180)	90.2	90.4	90.3±0.14
8	3(15)	2(20)	1(3)	3(200)	93.7	92.7	93.2±0.71
9	3(15)	3(25)	3(7)	1(160)	88.5	90.1	89.3±1.13
k1	90.30	91.47	90.67	91.53			
k2	93.03	93.63	91.67	90.50			
k3	90.93	89.17	91.93	92.23			
R	2.73	4.47	1.27	1.73			

1）k1、k2、k3 表示表示 4 种因素对应 3 种水平的平均去除率

表 4 沉积物氟化物去除率与 4 因素之间的方差分析结果 1)

Tab.4 The results of variance analysis on the fluoride removal rate of sediments and the four factors involved

方差来源	类平方和	自由度	均方	F 值	显著性
A 初始浓度	24.564	2	12.282	20.245	＜0.001***
B 温度	59.871	2	29.936	49.344	＜0.001***
C pH	5.351	2	2.676	4.410	0.046*
D 震荡频率	9.124	2	4.562	7.520	0.012*

1）***表示极其显著差异($p<0.001$)，**表示高度显著差异($p<0.01$)，*表示显著差异($p<0.05$)

为更进一步研究各因素对氟化物去除率的影响趋势，绘制了氟化物去除率(纵坐标)与影响因素水平(横坐标)关系图（图 9）。可见，岱海表层沉积物对氟化物去除率随初始浓度 A 升高先增大后减小，原因是初始浓度过低时，溶液中氟离子（F^-）与吸附剂表面浓度差较小，导致吸附驱动力不足，难以在实验时间内达到吸附平衡状态；而初始浓度过高时，吸附位点趋于饱和，去除率下降。氟化物去除率随温度升高先增大后减小，其原因可能为低温条件时，受动力学限制作用，氟离子（F^-）和吸附剂分子热运动减弱，导致扩散速率降低[38]，吸附过程未能在实验时间内达到平衡；温度大于 20 ℃时，氟化物吸附受热力学作用，且以化学吸附为主，反应过程释放热量($\Delta H<0$)，高温推动平衡向解吸方向移动[39]。氟化物去除率随 pH 升高而增大，原因是酸性条件下，氟离子（F^-）与溶液中氢离子（H^+）生成弱酸 HF 呈电中性而难以被静电吸附；中性和弱碱性溶液中，氟离子以游离态存在，易被吸附剂捕获。氟化物去除率随扰动强度（震荡频率）升高先减小后增大，此现象是多因素协同作用的结果，其作用机制涉及传质效率、吸附剂稳定性及动态平衡的复杂耦合关系。

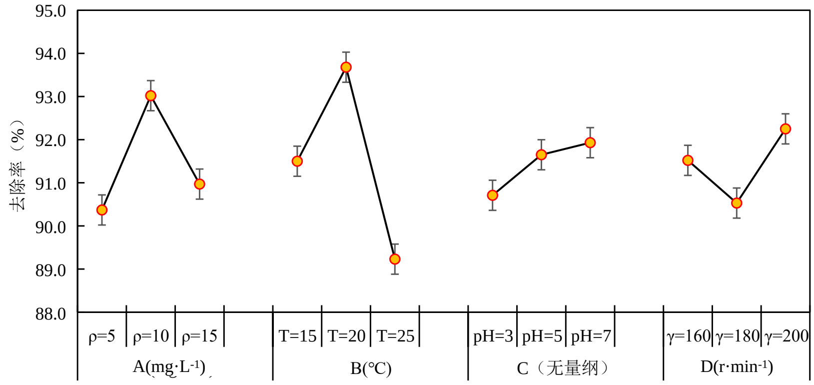


图 9 沉积物氟化物去除率与影响因素水平关系图

Fig.9 Relationship between removal rate and factor level

3 结论

(1)岱海表层沉积物中总氟含量在 600.03~1388.67 mg/kg 之间，均值为 860.44±53.64 mg/kg，显著高于国内外大部分地区。岱海表层沉积物中氟含量总体表现为残渣态≫可提取态。在可提取态氟化物中，则表现为水溶态>有机束缚态>可交换态>铁锰结合态。相关性分析表明，可交换态氟含量与 pH、TDS 以及盐度呈现出极其显著的负相关性(R 为 0.43，P<0.001)，与底层水电导率呈高度显著正相关性(R 为 0.31，P<0.01)，证实了泥水界面上覆水理化性质对湖泊表层沉积物中可交换态氟化物的吸附-解吸存在显著影响。

(2)岱海总氟均值呈现出西北＞东南部低的分布特征，低值主要集中在东、南部湖区河口区域，高值主要集中在中西部湖区。其中，高值区总氟含量较低值区高 104.23%。水溶态氟化物与总氟化物分布基本一致，呈西北＞东南；铁锰结合态氟化物呈南部>北部>西部>东部；可交换态氟化物与有机束缚态氟化物分布情况复杂。

(3)岱海表层沉积物氟化物的吸附特性拟合分析结果表明，准二阶动力学模型对于吸附过程拟合度更高，而准一级动力学模型更适用于拟合解吸过程。选用 Freundlich、Langmuir 两种热力学模型对氟化物的吸附特性拟合分析，Langmuir 模型的拟合优度更高，说明单层吸附起到了关键作用。Freundlich 模型的拟合效果次之，表明非均相表面的多分子层吸附也是影响吸附过程的重要机制。

(4)岱海表层沉积物氟化物吸附-解吸行为及赋存形态是一个主要受水温、pH 、扰动强度和上覆水氟离子浓度等环境因素变化而制衡的动态源汇过程。4 种因素对氟化物沉积物-水界面迁移影响排序：温度>初始浓度>扰动强度（震荡频率）>pH。与乌梁素海、达里诺尔湖等北方寒旱区同类湖泊相比，均存在蒸发浓缩作用导致水体氟化物浓度偏高的共性问题，但岱海作为高盐碱典型尾闾湖浓缩、富集、离子交换作用相比更加强烈，氟化物浓度升高趋势更加凸显，值得重点关注。建议长期监测岱海水体氟含量变化，重点关注高温期泥-水界面氟释放行为，可采取定期清淤等工程措施，有效降低和控制氟污染风险。

4 参考文献

[1] 唐芳,陈玲,项朋志,等.壳聚糖/羟基磷灰石复合材料对氟离子吸附研究.广州化工,2020,**48**(2):54-58.

[2] Adewole O A ,Changlai X ,Zhihao Z , et al.Groundwater fluoride chemistry and health risk assessment of multi-aquifers in Jilin Qianan, Northeastern China.Ecotoxicology and Environmental Safety,2021,**211**:111926-111926.

[3] Sifat N ,Abdur R ,Asif J , et al.Hydrogeological properties, sources provenance, and health risk exposure of fluoride in the groundwater of Batkhela, Pakistan.Environmental Technology & Innovation,2021:102239-.

[4] He JL, Zong CX, Xu WZ, et al. Research on Fluoride Intake from Drinking Water for Children . Beverage Industry, 2021, 24(03): 53-59.[何惊雷,宗晨曦,许文昭等.关于儿童饮用水中氟摄入研究.饮料工业,2021,**24**(3):53-59.]

[5] Liu DS, Chen QM, Yu ZC, et al. Geochemical Issues of Endemic Fluorosis in China . Geochimica, 1980, (01): 13-22.[刘东生,陈

庆沐,余志成,等.我国地方性氟病的地球化学问题.地球化学,1980,(1):13-22.]

[6] Chen R, Tang YF, Yang J, et al. Distribution Characteristics and Genesis of Fluoride in Dalinolun Lake of Inner Mongolia Plateau . Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(01): 60-70.[陈如,汤宇烽,杨军等.内蒙古高原达里诺尔湖氟化物分布特征及成因.环境工程技术学报,2024,**14**(1):60-70.]

[7] Wu J ,Sun Z .Evaluation of Shallow Groundwater Contamination and Associated Human Health Risk in an Alluvial Plain Impacted by Agricultural and Industrial Activities, Mid-west China.Exposure and Health,2016,**8**(3):311-329.

[8] Dai X, Xie XL, Qian F, et al. Characteristics and Risk Assessment of Fluoride Pollution in Reservoir Surface Water in the High-Fluoride Area of the Songnen Plain Journal of Lake Sciences, 1-13..[戴星,谢晓琳,钱锋等.松嫩平原高氟区水库地表水氟污染特征与风险评价.湖泊科学,1-13]

[9] Yuan L ,Yonghong B ,Wujuan M , et al.Land-use change caused by anthropogenic activities increase fluoride and arsenic pollution in groundwater and human health risk..Journal of hazardous materials,2020,(prepublish):124337-124337.

[10] Sun Y ,Zhang R ,Ma R , et al.Distribution, sources, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia, China.Environmental Science and Pollution Research,2021,**28**(18):1-10.

[11] Chen J ,Lv J ,Li N , et al.External Groundwater Alleviates the Degradation of Closed Lakes in Semi-Arid Regions of China.Remote Sensing,2019,**12**(1):45-45.

[12] Fu Xinyu, Liu Huamin, Yu Xiaowen, et al. Research on Water Sources and Utilization Strategies of Wetland Plants in the Lake Shore Zone of Daihai Lake . Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(12): 42-49.[付昕宇,刘华民,于晓雯等.岱海湖滨带湿地植物水分来源及利用策略研究.干旱区资源与环境,2020,**34**(12):42-49.]

[13] Zhang B, Guo YY, Chen JY, et al. Fluoride Occurrence Characteristics and Release Risk of Sediments in Daihai Lake . China Environmental Science, 2020, 40(04): 1748-1756.[张博,郭云艳,陈俊伊等.岱海沉积物氟化物赋存特征及其释放风险.中国环境科学,2020,**40**(4):1748-1756.]

[14] 刘莹慧.岱海多介质体系中氟化物分布迁移规律及风险性评估研究[学位论文].内蒙古农业大学,2024.]

[15] Lu ZF, Shi XH, Li GH. Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Driving Factors in the Saline Lake Daihai Affected by Eutrophication . Environmental Science, 2024, 45(10): 6157-6170.[卢宗福,史小红,李国华.富营养化咸水湖泊岱海温室气体排放特征及驱动因素分析.环境科学,2024,**45**(10):6157-6170.]

[16] El-Said G F, Khalil M K, Draz S E O. Anomalous distribution of fluoride and phosphorus forms in surface sediments along eastern Egyptian Mediterranean Sea coast. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**: 14240-14253.

[17] Tian L, Zhu X, Wang L, et al. Distribution, occurrence mechanisms, and management of high fluoride levels in the water, sediment, and soil of Shahu Lake, China. Applied Geochemistry, 2021, **126**: 104869.

[18] Gao X, Naseem A, Luo W, et al. Impact of microbial activity on fluoride release from sediments in areas with high fluoride groundwater: Mechanisms, sources and the lithology diversity. Science of The Total Environment, 2024, **955**: 176940.

[19] Wei C, Guo H, Zhang D, et al. Occurrence and hydrogeochemical characteristics of high-fluoride groundwater in Xiji County, southern part of Ningxia Province, China. Environmental geochemistry and health, 2016, **38**: 275-290.

[20] Chen JJ, Jing HW, Liu BX, et al. Distribution Characteristics and Genesis Analysis of Fluoride in Groundwater of the Yongding River Alluvial Fan in Beijing . Environmental Chemistry, 1-10 [陈吉吉,荆红卫,刘保献,等.北京永定河冲洪积扇地下水氟化物分布特征及成因分析.环境化学,1-10

[21] Chen Q, Lu Q, Song Z, et al. The levels of fluorine in the sediments of the aquifer and their significance for fluorosis in coastal region of Laizhou Bay, China. Environmental Earth Sciences, 2014, **71**: 4513-4522.

[22] Liu Y, Lu J, Liu T, et al. Analysis of the distribution across media, migration, and related driving factors of fluoride in cold and arid lakes during the freezing period. Environmental Research, 2024, **244**: 117899.

[23] Liu Q ,Zhang B ,Zhai D , et al.Continental-scale distribution and source identification of fluorine geochemical provinces in drainage catchment sediment and alluvial soil of China.Journal of Geochemical Exploration,2020,**214**(prepublish):106537-106537.

[24] Wu WH, Xie ZM, Xu JM, et al. Characteristics of Fluorine Occurrence Forms and Their Influencing Factors in Different Soils . Environmental Science, 2002, (02): 104-108.[吴卫红,谢正苗,徐建明等.不同土壤中氟赋存形态特征及其影响因素.环境科

学,2002,(02):104-108.]

[25] Qin FX, Wu D, Huang XF, et al. Fluorine forms and distribution characteristics of tea garden soil in fluorosis-prone areas . China Environmental Science, 2014, 34(11): 2859-2865.[秦樊鑫,吴迪,黄先飞等.高氟病区茶园土壤氟形态及其分布特征.中国环境科学,2014,**34**(11):2859-2865.]

[26] Liu X, Liang XJ, Xiao X, et al. Experimental Study on the Effects of pH on the Migration and Transformation of Different Forms of Fluorine in the Sediment of Lakes in Western Jilin Province . Environmental Pollution and Control, 2011, 33(6): 19-22.[刘璇,梁秀娟,肖霄等.pH 对吉林西部湖泊底泥中不同形态氟迁移转化影响的实验研究.环境污染与防治,2011,**33**(6):19-22.]

[27] Zhao YX, Zeng HP, Lu YF, et al. Research on the Removal of As(Ⅴ) by Iron and Manganese Sludge from the Backwashing of Biological Iron and Manganese Removal Filter . China Water & Wastewater, 2017, 33(11): 1-6.[赵运新,曾辉平,吕育锋等.生物除铁除锰滤池反冲洗铁锰泥除 As(V)研究.中国给水排水,2017,**33**(11):1-6.]

[28] Liu JH, Wang YJ, Yang JM, et al. Distribution characteristics and speciation of fluoride in soda salt-alkali soil in fluorosis areas of western Jilin Province . Soil, 2017, 49(3): 558-564.[刘金华,王玉军,杨靖民等.吉林省西部氟病区苏打盐碱土氟的赋存形态及分布特征.土壤,2017,**49**(3):558-564.]

[29] Mao HF, He J, Hou DK, et al. Simulation Experiment Study on Organic Matter Degradation and Dynamic Response of Microbial Quantity in Sediments of Wulamusu Lake and Daihe Lake . Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 2013, 32(1): 118-126.[毛海芳,何江,侯德坤等.乌梁素海和岱海沉积物有机质降解与微生物量动态响应模拟试验研究.农业环境科学学报,2013,**32**(1):118-126.]

[30] Liu H, Sun SA, Wang J, et al. Spatial Characteristics and Factor Identification of Exceedance of Drinking Water Quality Standards in Urban Centralized Sources of Drinking Water in the Yellow River Basin . Geographical Research, 2023, 42(12): 3264-3277.[刘慧,孙思奥,王晶等.黄河流域城市集中式生活饮用水水源地水质超标空间特征与因子识别.地理研究,2023,**42**(12):3264-3277.]

[31] Liu X ,Lu S ,Guo W , et al.Antibiotics in the aquatic environments: A review of lakes, China.Science of the Total Environment,2018,**627**:1195-1208.

[32] Jiang Y ,Yuan L ,Liu L , et al.Bisphenol A in the Yellow River: Sorption characteristics and influential factors.Journal of Hydrology,2018,**564**:307-313.

[33] Xu X ,Li X .Sorption and desorption of antibiotic tetracycline on marine sediments.Chemosphere,2009,**78**(4):430-436.

[34] Ma PG, Zhang HT, Ding WM. Research on Kinetics and Thermodynamics of Fluoride Removal by Activated Alumina Modified by Particles . Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2019, **46**(3): 1-6.[马培根,张海涛,丁文明.颗粒改性活性氧化铝吸附除氟动力学和热力学的研究.北京化工大学学报(自然科学版),2019,**46**(3):1-6.]

[35] 陈延斌,谢政.污染河道沉积物对氮磷的吸附解吸热力学特征.甘肃水利水电技术,2023,**59**(6):34-40.

[36] Gomoro K ,Zewge F ,Hundhammer B *et al*.Fluoride removal by adsorption on thermally treated lateritic soils.Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia,2012,**26**(3):361-372.

[37] Zhao Y, Shi L, Zhang DQ, et al. Synthesis of Magnesium Oxide Adsorbent by Precipitation Method and Its Adsorption Mechanism for Fluoride . Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, **44**(02): 971-981.[赵蘅,石翎,张栋强等.沉淀法合成氧化镁吸附剂及其对氟化物的吸附机理.化工进展,2025,**44**(2):971-981.]

[38] Yang LB, Chen YP, Zhang CB, et al. Molecular Dynamics Simulation of Self-Diffusion Coefficient of Restricted Lennard-Jones Fluids . Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(2): 317-320.[杨立波,陈永平,张程宾等.受限 Lennard-Jones 流体自扩散系数的分子动力学模拟.东南大学学报(自然科学版),2011,**41**(2):317-320.]

[39] Zhang XZ, He R, Liu ZW, et al. Investigation on the Adsorption/Desorption Behavior and Influencing Factors of Norfloxacin in Sediments of the Upper Reaches of the Yellow River . China Environmental Science, 2024, 44(7): 4009-4020.[张晓珍,何蕊,刘哲炜等.诺氟沙星在黄河上游沉积物中的吸附/解吸行为及影响因素探究.中国环境科学,2024,**44**(7):4009-4020.]