

烟台四十里湾潮间带表层沉积物中铁的形态研究

王晨晨¹, 潘大为^{1,2}, 韩海涛^{1,2}, 胡雪萍^{1,2}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研究烟台四十里湾潮间带表层沉积物中铁形态, 为潮间带沉积物中铁污染提供理论依据。应用 Tessier 连续提取法测定了表层沉积物中铁的可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态及残渣态含量, 讨论并分析沉积物中总铁和各形态铁分布特征及相关性。研究结果表明各采样点沉积物中铁的含量相差不大, 铁形态以残渣态为主, 占总铁的比例范围为 56.43% ~ 85.92%, 有效态铁占总铁的比例范围为 14.08% ~ 43.57%。相关性分析结果表明总铁含量主要受残渣态铁控制, 可交换态铁与其他形态铁及总铁的相关性反映了铁在水体和沉积物中的迁移转化。

关键词: 表层沉积物; 铁; 形态研究; 烟台四十里湾; 潮间带

中图分类号: X132 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2019)04-0555-06

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2019.04.011

Research on iron speciation in surface sediments in intertidal zone of Yantai Sishili bay

WANG Chen-chen¹, PAN Da-wei^{1,2}, HAN Hai-tao^{1,2}, HU Xue-ping^{1,2}

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To provide a theoretical basis for iron pollution in sediment iron speciation in the sediments from the intertidal zone of Yantai Sishili bay was studied in this paper. Contents of exchangeable, carbonate, Fe-Mn oxide, organic and residual iron in surface sediments were analyzed by Tessier sequential extraction procedure. Distribution and correlation of total iron and different iron speciation in surface sediments were discussed in detail. The results showed that the contents of iron in different sampling sites had no significant difference. The iron speciation was dominated by residual iron with percentage of 56.43% ~ 85.92%, while the percentage of bio-available fraction iron was 14.08% ~ 43.57%. Correlation analysis showed that the content of total iron was mainly controlled by residual iron. Correlation between exchangeable iron and other iron forms as well as total iron reflected the migration of iron between water and sediment.

Key words: surface sediment; iron; speciation; Yantai Sishili bay; intertidal zone

Fe 在地壳中的丰度为 6.71%, 仅次于 O、Si、Al, 是自然界中最基本的氧化还原性质活泼的变价金属元素之一, 广泛存在于岩石、土壤、水、生物和大气溶胶中, 并密切参与地球表面的地球化学、矿物学以及生物学过程^[1-2]。作为海洋中浮游植物生长的限制因素之一, Fe 在海洋中含量的增

加, 可以促进浮游植物的生长, 减少大气中 CO₂ 的含量, 缓解温室效应^[3]。Fe 含量的增加也可能会诱发海域赤潮现象^[4]。Fe 的存在量对于浮游植物有效利用 C、N 和 P, 对于叶绿素的生物合成和光合作用等都起着重要的作用^[5]。Fe 在调节水生环境质量方面起着重要作用, Fe 的总量可以作

收稿日期: 2017-11-02, 修订日期: 2018-01-10

基金项目: 中国科学院青年创新促进会基金(20111170); 中国科学院仪器研制项目(YZ201558); 中国科学院科技基础调查专项资助项目(NO. 2014FY10600)

作者简介: 王晨晨(1991-), 女, 山东滕州人, 硕士研究生, 研究方向为环境分析与监测, E-mail: 15195962509@163.com

通讯作者: 潘大为, 男, 博士, 研究员, E-mail: dwpan@yic.ac.cn

为评价海洋水体或沉积物污染程度的一个重要因子,但是不能反映其生态特性,因为Fe在水体或沉积物中是以不同形态存在的,不同的赋予形态与环境的相互作用会直接影响到其在环境中的生物可利用性、释放、迁移等特性^[6-7]。因此,研究海洋沉积物中Fe形态的分布特征及其相关性对研究海洋环境中Fe的迁移转化规律具有重要的意义。

近年来人们对沉积物中Fe的研究主要集中在Fe元素的早期成岩作用^[8]、地球化学循环和古生物环境意义^[2]、Fe、P与Fe、S的地球化学特征和相关性分析^[9-11]、以及沉积物Fe形态分布特征^[12-14]等相关内容上。杨宏伟^[7]等应用沉积物中金属的连续浸提技术研究了黄河干流表层沉积物铁的形态分布特征和相关性;弓晓峰^[14]等采用BCR法测定了潘阳湖典型湿地不同层次土壤铁的形态,研究并分析了总铁和各形态铁的分布特征,但目前对潮间带沉积物中Fe形态分布特征的研究较少。故本文选择烟台四十里湾潮间带为研究区域对潮间带沉积物中Fe形态分布进行研究。烟台四十里湾位于烟台市莱山区北部海域,三面邻陆,一面向海,为耳状半封闭海湾,海岸线长约20 km,平均水深8~10 m,是中国北方一个重要

的浅海养殖区,也是烟台的重要水产养殖场所。近年来,受人类活动(航运、排污、海水养殖等)影响,大量污染物进入海湾,对该海域的生态环境破坏严重,赤潮时有发生^[15],微量元素Fe也是海域中赤潮发生的限制因子之一^[16]。本研究以烟台四十里湾潮间带表层沉积物为研究对象,采用分级提取法对沉积物中不同形态的Fe进行提取,并分析其分布特征和迁移转化规律,为烟台四十里湾环境质量综合评价提供科学依据,为今后的科学管理和污染防治工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

2014年10月底和2015年7月底对烟台四十里湾潮间带进行了两个航次的调查(图1),共采集了60个表层沉积物样品,包括5个断面15个枯季表层沉积物样品(每个断面高、中、低潮滩各取一个样品)和15个断面45个洪季表层沉积物样品(每个断面高、中、低潮滩各取一个样品)。用抓斗式取样器采集表层沉积物泥样于聚乙烯袋中,每个采样点样品量不少于2 kg,在4℃左右密封保存。样品带回实验室后于-20℃冷库贮备用。



图1 烟台四十里湾潮间带取样站位

Fig. 1 Sampling stations in intertidal zone of Yantai Sishili bay

1.2 实验方法

所有沉积物样品经冷冻干燥以后,用玛瑙研钵将其研碎并全部通过160目筛,混合均匀后冷

藏待测。对烟台四十里湾沉积物中Fe形态采用Tessier^[17]连续分级提取法连续提取。各形态Fe和总Fe的浓度均用原子吸收法进行检测,通过对比各形态Fe之和(Σ Fe)与总Fe(TFe)可以得出,

回收率($\Sigma \text{Fe}/\text{TFe}$) 在 74% 和 134% 之间,表明沉积物中 Fe 的分级提取方法比较可靠。

2 结果与讨论

2.1 烟台四十里湾潮间带沉积物总 Fe 的分布特征

对烟台四十里湾潮间带枯季和湿季表层沉积物中总 Fe 进行测定,含量如图 2 所示,枯季沉积物总 Fe 含量范围为 $1790.00 \times 10^{-6} \sim 7730.00 \times 10^{-6}$,湿季沉积物总 Fe 含量范围为 $1980.00 \times 10^{-6} \sim 9980.00 \times 10^{-6}$,枯季和湿季总 Fe 的含量变化不大。Fe 含量在 P01、P02、P14、P15 处相对较高,可能是由于这几个取样点在辛安河附近,而辛安河水环境受辛安河污水处理厂以及附近钢铁建材公司的影响。总 Fe 含量在高、中、低潮滩无显著性差异,没有表现出明显的自然沉积地貌分异,这可能是由于强烈的人为活动(水产养殖、旅游)改变了烟台四十里湾周边的水动力条件和高、中、低潮滩泥沙的自然淤积规律。

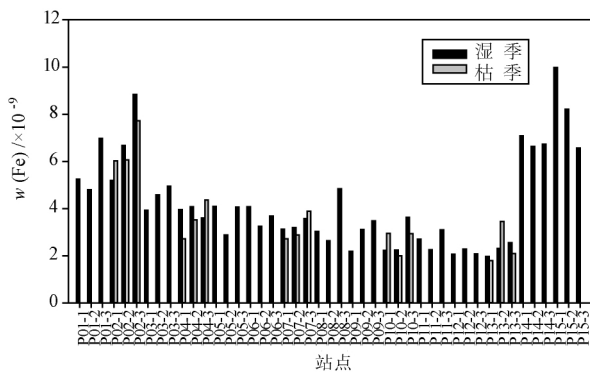


图 2 烟台四十里湾潮间带表层沉积物总 Fe 含量分布

Fig. 2 Distribution of total iron in surface sediments in intertidal zone of Yantai Sishili bay

表 1 烟台四十里湾表层沉积物中 Fe 的含量与其他区域的对比

Tab. 1 Comparison of the content of iron in surface sediments between Yantai Sishili bay and other areas

研究区域	$w(\text{Fe}) / \times 10^{-9}$	数据来源
三江平原	24.30 ~ 37.10	[1]
太湖	25.25 ~ 35.57	[6]
黄河干流	14.01 ~ 30.98	[7]
达赫拉湾	1.70 ~ 28.00	[18]
布里斯班河口	7.69 ~ 18.77	[19]
墨西哥湾北海岸	31.99 ~ 39.73	[20]
烟台四十里湾	1.79 ~ 9.98	本研究

从表 1 中可以发现,烟台四十里湾潮间带表层沉积物总 Fe 含量均低于黄河干流、三江平原、太湖、布里斯班河口、达赫拉湾和墨西哥湾北海岸总 Fe 含量。黄河干流表层沉积物总 Fe 含量与不同地质环境下沉积物的母质来源和矿物成分有关,也与人类活动以及工业污染状况有关。三江平原多级沟渠系统沉积物中 Fe 含量结果表明,Fe 沿多级沟渠系统的运移并非逐级富集,而会受到沟渠构型、径流水文、径流水质和植被覆盖等多种因素共同作用的结果。太湖 3 种类型湖区沉积物总 Fe 含量在藻型湖区富营养化程度较高,过渡性湖区其次,草型湖区具有较强的自净能力。烟台四十里湾潮间带表层沉积物总 Fe 含量相对较低,说明烟台四十里湾水体富营养化程度较低,Fe 含量对赤潮现象发生的影响也相对较低。

2.2 烟台四十里湾潮间带沉积物 Fe 的形态分布

烟台四十里湾枯季和湿季表层沉积物中各形态 Fe 占总 Fe 的比例如图 3、图 4 所示。枯季表层沉积物中各形态 Fe 含量占总 Fe 比例由大到小依次为 Fe-5 (60.80% ~ 78.61%) > Fe-4 (9.56% ~ 23.76%) > Fe-3 (8.08% ~ 19.68%) > Fe-2 (0 ~ 0.05%) \approx Fe-1 (0 ~ 0.04%); 湿季表层沉积物中各形态 Fe 含量占总 Fe 比例由大到小依次为 Fe-5 (56.43% ~ 85.92%) > Fe-3 (5.56% ~ 22.73%) > Fe-4 (1.37% ~ 23.08%) > Fe-1 (0 ~ 0.18%) > Fe-2 (0 ~ 0.09%)。枯季和湿季表层沉积物中各形态 Fe 占总 Fe 含量基本相似,变化不大(由于 P04-2 和 P13-2 站位处枯季表层沉积物样品量不够,故未测其 Fe 形态)。

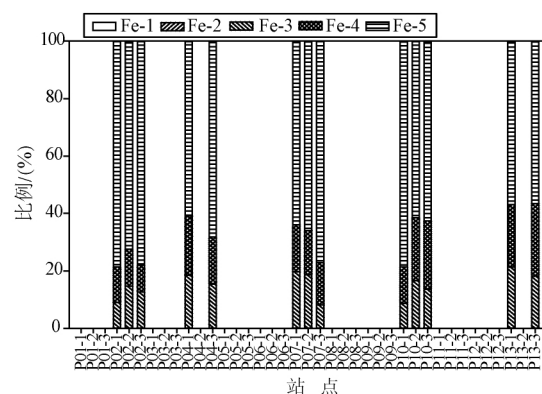


图 3 烟台四十里湾潮间带枯季表层沉积物 Fe 形态分布

Fig. 3 Distribution of iron speciation in surface sediments in intertidal zone of Yantai Sishili bay in dry season

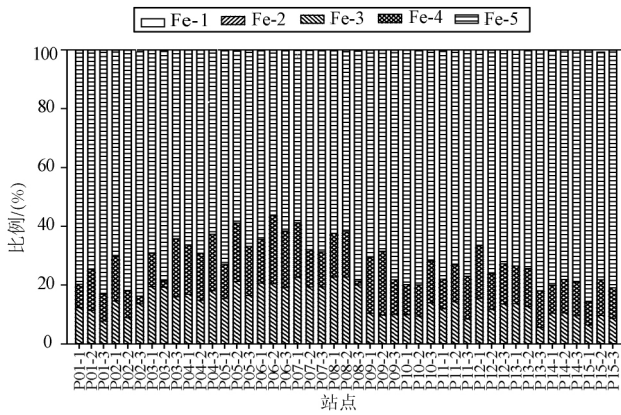


图4 烟台四十里湾潮间带湿季表层沉积物 Fe 形态分布
Fig. 4 Distribution of iron speciation in surface sediments in intertidal zone of Yantai Sishili bay in wet season

样品中 Fe-1 含量极少,在上述五个形态中居第四位,这与烟台四十里湾水体偏碱性有关(见表2, pH 在 8.60 ~ 9.19 之间),水体中大部分铁离子由于形成氢氧化物而沉积在沉积物表面上,自由铁离子浓度极低,不利于吸附。Fe-2 含量较易受环境的影响,当水体 pH 发生变化时,会重新释放回水体。沉积物中 Fe-2 含量在 $0 \sim 4.40 \times 10^{-6}$ 之间,在上述五个形态中含量最少。由此可以初步判断,沉积物中有机质的含量相对较低^[7]。铁锰氧化物结合态是指铁锰氧化物结合在一起,通过吸附或共沉淀作用积累的金属形态,属于较强的离子键结合的化学形态,当水体中氧化还原电位降低时,或水体缺氧时,这种结合态的金属键被还原,从而可能造成水体的污染。沉积

物中 Fe-3 含量在 $150.00 \times 10^{-6} \sim 957.00 \times 10^{-6}$ 之间,其中 P13-3 含量最低, P02-3 处含量最高。从表 2 看出,沉积物取样时各取样点处的氧化还原电位相差不大, Fe-3 的含量差异应该是主要受人文活动的影响。Fe 与 S、有机质有较强的结合能力,生物对 Fe 也有较强的选择性吸收,存在于生物体中的 Fe 也是沉积物中 Fe-4 的一个潜在来源。Fe-4 含量在 $57.00 \times 10^{-6} \sim 586.00 \times 10^{-6}$ 之间, P03-2 (76.00×10^{-6}) 和 P08-3 (57.00×10^{-6}) 处含量较低, Fe-4 含量最高点在 P03-3 (986.00×10^{-6}) 这间接反映了 P03-2 和 P08-3 处有机质含量较低, P03-3 处有机质含量较高。沉积物中 Fe-5 含量在 $1050.00 \times 10^{-6} \sim 8360.00 \times 10^{-6}$ 之间,占总铁比率在 56.43% 以上,其中在 P15-1 处沉积物样品中 Fe-5 含量为全程最高 (8360.00×10^{-6}),占总铁比率为 85.92%。Fe-5 主要来源于沉积物中 Fe 的原生矿物,部分来源于铁硅酸盐矿物风化后再结晶的产物,如赤铁矿和针铁矿。

2.3 烟台四十里湾潮间带沉积物有效态 Fe 及 Fe 形态相关性分析

表 2、3 列出了烟台四十里湾表层沉积物中有效态 Fe (BFe) (即 $BFe = Fe-1 + Fe-2 + Fe-3 + Fe-4$)、 $BFe/\sum Fe$ 、 $Fe-3/BFe$ 、 $Fe-4/BFe$ 的比值及沉积的理化性质。表 4、5 列出了用 SPSS 19.0 相关性分析软件对烟台四十里湾沉积物的各形态 Fe 和总 Fe 之间的相关性进行统计分析的结果。

表 2 烟台四十里湾枯季表层沉积物 BFe 含量及占 $\sum Fe$ 的比率、Fe-3 和 Fe-4 占 BFe 的比率,以及沉积的理化性质

Tab. 2 Content of BFe and their ratio to $\sum Fe$, the content of Fe-3 and Fe-4 and their ratio to BFe, and physical and chemical properties on the surface sediments of Yantai Sishili bay in dry season

编号	BFe/ $\times 10^{-9}$	Fe-3/BFe/(%)	Fe-4/BFe/(%)	BFe/ $\sum Fe$ (%)	pH	Eh
P02-1	1.54	42.36	57.64	21.42	8.61	-103
P02-2	1.70	53.30	46.60	27.53	8.78	-112
P02-3	1.68	56.77	43.02	22.23	8.87	-117
P04-1	1.30	47.22	52.78	39.20	9.19	-138
P04-3	1.54	48.32	51.57	31.82	8.84	-114
P07-1	1.22	54.57	45.38	36.07	8.97	-124
P07-2	1.30	54.58	45.31	34.04	8.74	-110
P07-3	0.10	35.41	64.49	22.83	8.75	-110
P10-1	0.71	40.56	59.21	21.39	8.97	-124
P10-2	0.85	43.07	56.73	38.45	8.60	-100
P10-3	1.25	36.25	63.60	37.37	8.67	-105
P13-1	0.79	49.35	50.48	43.07	8.87	-119
P13-3	1.01	41.61	58.28	43.45	8.70	-106

数据表明, Fe-3 和 Fe-4 为 BFe 的主要存在形态, 并且除湿季表层沉积物 P02-3 和 P03-2 两个采样点处 Fe-3 和 Fe-4 含量相差较大外, 其他采样点处 Fe-3 和 Fe-4 含量相差不大。BFe 占 Σ Fe 比率为 14.08% ~ 43.57%, 含量相对较高, 可能会影响上覆水及生物体内 Fe 含量。

样品中 Fe-5 与 Σ Fe 呈现极显著正相关关系 (湿季: $r=0.922^{**}$, $P<0.01$; 枯季: $r=0.976^{**}$,

$P<0.01$), 说明沉积物中 Σ Fe 含量主要受 Fe-5 控制。Fe-2、Fe-3、Fe-4 与 Σ Fe 均呈现显著正相关关系, 并且 Fe-2、Fe-3、Fe-4 为沉积物中 BFe 的主要存在形态, 说明沉积物中 BFe 的含量相对较高, 当水环境发生变化时, 容易影响上覆水体中 Fe 含量。Fe-1 与 Fe-2、Fe-3、Fe-4、Fe-5、 Σ Fe 呈显著负相关, 反映了 Fe 在水体和沉积物中的迁移转化现象。

表 3 烟台四十里湾枯季表层沉积物 BFe 含量及占 Σ Fe 的比率、Fe-3 和 Fe-4 占 BFe 的比率

Tab. 3 Content of BFe and their ratio to Σ Fe, the content of Fe-3 and Fe-4 and their ration to BFe on the surface sediments of Yantai Sishili bay in wet season

编号	BFe/ $\times 10^{-9}$	Fe-3/BFe / (%)	Fe-4/BFe / (%)	BFe/ Σ Fe / (%)	编号	BFe/ $\times 10^{-9}$	Fe-3/BFe / (%)	Fe-4/BFe / (%)	BFe/ Σ Fe / (%)
P01-1	1.15	60.47	39.32	20.27	P08-3	0.89	93.02	6.40	21.37
P01-2	1.57	45.11	54.81	25.25	P09-1	0.67	34.80	64.68	29.46
P01-3	1.56	45.98	53.92	16.88	P09-2	1.00	30.73	68.98	31.52
P02-1	1.54	49.21	50.71	29.65	P09-3	0.90	45.26	54.11	21.76
P02-2	1.62	49.49	50.41	18.08	P10-1	0.51	48.61	50.96	20.16
P02-3	1.15	83.08	16.58	16.29	P10-2	0.53	46.86	52.74	19.99
P03-1	1.11	62.75	36.77	30.79	P10-3	0.71	49.34	50.32	28.16
P03-2	0.81	90.22	9.42	21.31	P11-1	0.50	53.94	45.58	22.01
P03-3	1.78	44.53	55.30	35.71	P11-2	0.61	53.24	46.36	26.77
P04-1	1.27	50.26	49.55	33.54	P11-3	0.70	36.48	63.13	22.99
P04-2	1.44	48.23	51.64	30.72	P12-1	0.62	45.65	53.82	33.49
P04-3	1.52	48.23	51.46	37.22	P12-2	0.58	48.58	50.83	23.85
P05-1	1.33	57.20	42.66	27.04	P12-3	0.67	49.32	50.21	27.22
P05-2	1.34	51.64	48.28	41.11	P13-1	0.65	51.44	48.05	26.45
P05-3	1.37	49.53	50.25	33.14	P13-2	0.60	49.54	50.38	25.61
P06-1	1.32	58.21	41.72	35.51	P13-3	0.49	30.90	69.00	18.01
P06-2	1.64	46.92	52.97	43.57	P14-1	1.56	52.22	47.78	19.89
P06-3	1.45	49.77	49.98	38.34	P14-2	1.59	48.10	51.86	21.90
P07-1	1.31	54.86	45.03	41.24	P14-3	1.52	45.53	54.27	21.02
P07-2	1.28	60.52	39.27	32.01	P15-1	1.37	45.10	54.58	14.08
P07-3	1.28	61.64	37.98	31.30	P15-2	1.34	44.13	55.80	21.93
P08-1	1.25	60.18	39.61	37.64	P15-3	1.49	45.10	54.57	19.08
P08-2	1.29	59.53	40.23	38.19					

表 4 不同形态 Fe 与总 Fe 之间的相关性(枯季)

Tab. 4 Correlation between the different iron forms and total iron (in dry season)

Fe 形态	Fe-1	Fe-2	Fe-3	Fe-4	Fe-5	Σ Fe
Fe-1	1	-0.405	-0.678*	-0.632*	-0.668**	-0.662*
Fe-2		1	0.632*	0.308	0.600*	0.714**
Fe-3			1	0.605*	0.674*	0.750**
Fe-4				1	0.680*	0.680*
Fe-5					1	0.976**

表5 不同形态 Fe 与总 Fe 之间的相关性(湿季)

Tab.5 Correlation between the different iron forms and total iron (in wet season)

Fe 形态	Fe-1	Fe-2	Fe-3	Fe-4	Fe-5	ΣFe
Fe-1	1	-0.343*	-0.488**	-0.519*	-0.488**	-0.566**
Fe-2		1	0.415**	0.178	0.332*	0.414**
Fe-3			1	0.465**	0.494**	0.577**
Fe-4				1	0.490**	0.446**
Fe-5					1	0.922**

3 结论

(1) 烟台四十里湾潮间带沉积物中总 Fe 含量范围在 $1790.00 \times 10^{-6} \sim 9980.00 \times 10^{-6}$, 平均值为 4070.00×10^{-6} , 最大值和最小值分别出现在湿季 P15-1 和枯季 P13-1 处; 各形态 Fe 以残渣态铁含量最高, 占总 Fe 比率 56.43% ~ 78.58%, 是沉积物中 Fe 的主要存在形式, 有效态 Fe 含量占 14.08% ~ 43.57%, 含量相对较高, 可能会影响上覆水体或生物体内 Fe 含量。

(2) 烟台四十里湾表层沉积物的各形态 Fe 和总 Fe 之间的相关性结果表明, 总 Fe 与残渣态 Fe 呈显著正相关关系, 说明总 Fe 含量主要受残渣态 Fe 控制; Fe-2、Fe-3、Fe-4 与 ΣFe 均呈现显著正相关关系, 同时 Fe-2、Fe-3、Fe-4 为沉积物中 BFe 的主要存在形态, 进一步说明沉积物中 BFe 的含量相对较高, 当水环境发生变化时, 容易影响上覆水体中 Fe 含量; 可交换态 Fe 与其他形态 Fe 及总 Fe 呈显著负相关, 间接反映了 Fe 在水体和沉积物中的迁移转化。

参考文献:

- [1] 邹元春, 吕宪国, 姜明, 等. 三江平原多级沟渠系统沉积物中铁的分布特征[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 889-893.
- [2] LI C, YANG S Y, LIAN E G, et al. Chemical speciation of iron in sediments from the Changjiang Estuary and East China Sea: iron cycle and paleoenvironmental implications[J]. Quaternary International, 2017, 452: 116-128.
- [3] 潘晓峰, 阎百兴, 王莉霞. 三江平原河水中铁的形态研究[J]. 环境科学, 2010, 31(9): 2042-2047.
- [4] 屠霄霞. 铁对海洋初级生产力的影响[J]. 农机化研究, 2007, 29(3): 18-20.
- [5] 欧明明, 张曼平, 冯媛媛. 海水中铁的几种形态对海生小球藻生长的影响[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(4): 627-633.
- [6] 杨文斌, 唐皓, 韩超, 等. 太湖沉积物铁形态分布特征及磷铁相关性分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4): 1145-1156.
- [7] 杨宏伟, 吴雅丽, 马旭阳. 黄河干流表层沉积物铁形态的分布特征及相关性分析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3663-3669.
- [8] TAO J, MA W W, ZHU M X, et al. Characterization of iron diagenesis in marine sediments using refined iron speciation and quantized iron(III)-oxide reactivity: a case study in the Jiaozhou Bay, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 36(7): 48-55.
- [9] 尹洪斌, 范成新, 李宝, 等. 太湖北部沉积物中铁硫的地球化学特征研究[J]. 地球化学, 2008, 37(6): 595-601.
- [10] SUN Q Y, SHENG Y Q, YANG J, et al. Dynamic characteristics of sulfur, iron and phosphorus in coastal polluted sediments, North China[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 588-595.
- [11] MA W W, ZHU M X, YANG G P, et al. In situ high-resolution DGT measurements of dissolved sulfide, iron and phosphorus in sediments of the East China Sea: insights into phosphorus mobilization and microbial iron reduction[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 124(1): 400-410.
- [12] KUNO A, MATSUO M, WANG Q, et al. Iron speciation of sediments from Kuhai Lake in China by Mössbauer spectroscopy[J]. Hyperfine Interactions, 2005, 166(1/2/3/4): 637-642.
- [13] KUNO A, MATSUO M, CHIBA S, et al. Seasonal variation of iron speciation in a pearl-raising bay sediment by Mössbauer Spectroscopy[J]. Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, 2008, 9(1): 13-18.
- [14] 弓晓峰, 杨菊云, 刘春英, 等. 鄱阳湖典型湿地土壤铁形态分布特征[J]. 南昌大学学报: 工科版, 2015, 37(1): 1-6.
- [15] 沈春燕, 施平, 赵辉. 烟台四十里湾叶绿素 a 浓度的时空分布特征及其影响机制[J]. 海洋科学, 2014, 38(9): 33-38.
- [16] 曾江宁, 曾淦宁, 黄韦良, 等. 赤潮影响因素研究进展[J]. 东海海洋, 2004, 22(4): 40-47.
- [17] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851.
- [18] HAKIMA Z, MOHAMED M, AZIZA M, et al. Environmental and ecological risk of heavy metals in the marine sediment from Dakhla Bay, Morocco[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(9): 7970-7981.
- [19] DUODU G O, GOONETILLEKE A, AYOKO G A. Potential bio-availability assessment, source apportionment and ecological risk of heavy metals in the sediment of Brisbane River estuary, Australia[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 117(1/2): 523-531.
- [20] MARTÍNEZ T, TEJEDA S, ESTAÑOL B, et al. Chemical and sequential analysis of some metals in sediments from the North coast of the Gulf of Mexico[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2016, 309(1): 343-350.