

改性黏土法消除球形棕囊藻赤潮的 现场实验与效果评估*

曹西华^{1,2} 俞志明^{1,2} 邱丽霞^{1,3}

(1. 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室(中国科学院海洋研究所) 青岛 266071; 2. 海洋国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266071; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 球形棕囊藻是一种具有复杂异型生活史的有毒有害赤潮生物,近年来在我国近海频繁暴发成灾,形成的巨大囊体为国内外罕见。迄今还未见到有效消除囊体型球形棕囊藻赤潮的方法报道。本文通过海上围隔实验和现场赤潮消除工程跟踪监测,考察了喷洒改性黏土消除囊体型球形棕囊藻赤潮的可行性与效率,并分析了改性黏土法治理赤潮时对水体及沉积环境的可能影响。围隔实验结果表明,喷洒改性黏土可以有效消除水体中过量的微藻细胞,其中以少量多次喷洒方法的效果最好,生物量(chl *a*)去除率>90%。在对 2016 年 2 月广西防城港附近海域球形棕囊藻赤潮消除时的跟踪监测结果表明,改性黏土法适用于工程化消除赤潮作业,能够快速消除水体中的大量球形棕囊藻囊体,随改性黏土絮凝体沉入海底的赤潮藻可以快速分解而失去活性。喷洒改性黏土对于赤潮水体的主要理化指标影响不显著,所监测的水体 COD、pH 和不同形态氮、磷、硅等生源要素浓度都在原有水质水平范围内波动。

关键词 球形棕囊藻; 赤潮; 改性黏土; 治理; 环境影响; 色素

中图分类号 X55 doi: 10.11693/hyhz20170200026

赤潮是影响近海景观和生态安全的常见自然灾害现象(于仁成等, 2016)。为减轻或消除有害赤潮影响、保护受灾区内景物的安全或价值,构建高效可行的应急防护对策和方法已成为国内外赤潮防治研究的重要内容之一(Anderson, 1997; Heisler *et al*, 2008; 于仁成等, 2016)。改性黏土法有效地改善了天然黏土矿物凝胶性质差、除藻效率低、应用量大的问题,受到了国内外专家和政府组织的高度重视(Anderson, 1997; Anderson *et al*, 2001; Yu *et al*, 2004)。已有研究对该方法的除藻机制、除藻效率关键影响因素及生态安全性等都进行了系统考察研究(俞志明等, 1994; 曹西华等, 2004, 2006; 王志富等, 2014),在此基础上,改性黏土法防控赤潮逐渐得到了大范围的应用推广。继 2005 年在南京玄武湖蓝藻水华应急处置工程中被

成功应用,改性黏土法又先后被成功应用在了青岛奥帆赛场及邻近海(2007—2008)、上海游泳世锦赛金山室外赛场(2010)、深圳世界大学生运动会海上赛场邻近海(2010)、秦皇岛近海浴场与邻近海(2012—2016)等不同海区的不同类型有害赤潮的应急防控行动中。已有研究和应用都表明,改性黏土法是防控常见类型赤潮的一种高效、可行方法。

球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)是一种具有复杂异型生活史的赤潮生物,其单细胞个体仅有数微米,而在暴发形成赤潮时多以囊体形态为主(王小冬, 2010; 李亚男等, 2012)。虽然早在 20 世纪 90 年代该藻引发的赤潮就已出现在我国近海(陈菊芳等, 1999),但近年来该类型赤潮在我国南部沿海连年大规模暴发,而且赤潮时形成的囊体可以大至数厘米,为国内

* 国家自然科学基金项目, 41576119 号; 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目, U1606404 号。曹西华, 研究员, E-mail: caoxh@qdio.ac.cn

通讯作者: 俞志明, 研究员, 博士生导师, E-mail: zyu@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-02-01, 收修改稿日期: 2017-02-28

外沿海赤潮中非常罕见的形态(齐雨藻等, 2002; Smith *et al.*, 2014)。球形棕囊藻赤潮对暴发海区的养殖、景观和生态健康等都带来了严重危害(杨维东等, 2009; Liu *et al.*, 2010), 更严重的是棕囊藻巨大囊体还会通过堵塞冷源用水供应而影响赤潮发生区沿岸核电站的安全运行, 因此迫切需要有效的应急防控方法。

已有的改性黏土法治理赤潮研究和应用都是针对一些个体微小的赤潮生物(细胞大小在几到几百微米)开展的, 对于赤潮时的大粒径球形棕囊藻囊体的去除研究和实践还未见到报道。本研究通过现场围隔实验及工程化消除赤潮时的跟踪监测, (1) 现场实验测试了喷洒改性黏土材料消除球形棕囊藻囊体的效率, 分析了改性黏土法应急消除该类型赤潮的可行性; (2) 跟踪观测了赤潮消除时的球形棕囊藻囊体去除率、水体与沉积物中主要环境因子的变化, 分析了改性黏土法消除该类型赤潮时可能的环境效应, 为综合评估该方法提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 现场围隔实验

现场围隔实验于 2015 年 3 月在广西防城港附近海域进行, 如图 1 所示。实验时采用悬浮的透明塑料薄膜袋在实验海区隔离出一定体积的实验用海水, 该围隔袋直径为 1.0m, 高 3.0m, 充水体积约为 2.5m^3 (图 2)。为加快围隔水体中微藻的快速增殖, 在各实验水体中添加了不同的营养液, 其中围隔袋 A 为培养对照组而不添加营养液, 其余围隔袋内都添加了 *f/2* 藻类培养营养液, 并在 C、D、E 内再分别添加了不同浓度的尿素。实验开始后每天早晚定时对各国隔水体中的微藻形态及密度采样观测, 并借助多水质参数仪(Alec AAQ177, 日本)实时观测水体中叶绿素(chlorophyll *a*)浓度变化。当围隔水体中微藻生物量达到赤潮暴发水平后, 随即开始改性黏土法除藻实验。消除实验时在 B、C 围隔袋中分别喷洒总用量相同的同一种改性黏土材料 MC-I, 其中在 B 中为一次性添加, 而在 C 中分三批次添加, 每次添加后都采用船用桨板将上层 30cm 的水体搅动促使所添加材料在赤潮水体中混匀; D、E 两个围隔袋内分别添加了不同配方的改性黏土材料 MC-II 和 MC-III, 均为一次性添加、搅匀。实施消除后 2.5h 对各水体进行第一次采样和跟踪监测, 随后每天一次观测。

1.2 现场消除作业

2015—2016 年冬季, 钦州湾内再次暴发了球形

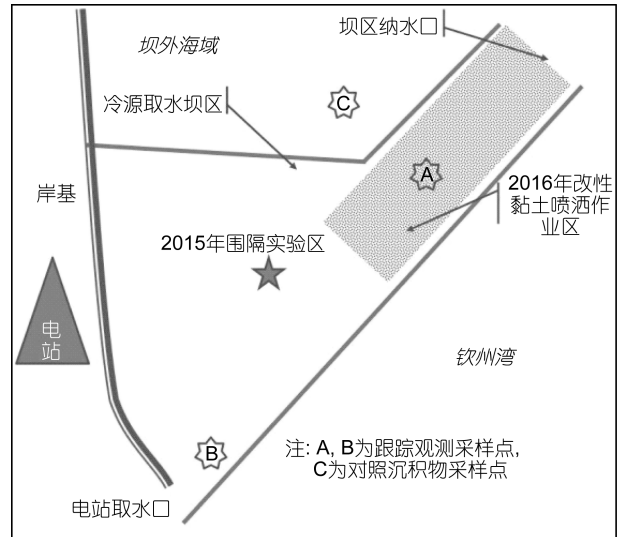


图 1 现场围隔实验与球形棕囊藻藻华应急消除海区位置示意图

Fig.1 The field sites for the mesocosm experiments and the emergent spraying modified clays to remove the bloomed *phaeocystis globose*

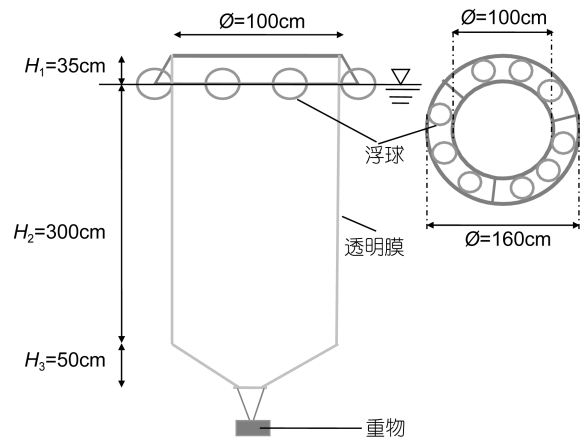


图 2 围隔实验装置示意图

Fig.2 Sketches of device for the mesocosm experiments

棕囊藻赤潮, 大量球形棕囊藻囊体漂浮在近岸水体中。由于该类赤潮对附近防城港核电站冷源取水有潜在威胁, 2016 年 2 月 1 日相关部门紧急启动了改性黏土喷洒行动。赤潮消除时, 在核电站冷源取水坝区的纳水口至中部区域喷洒改性黏土作业 1h, 喷洒改性黏土约 1.5 吨, 具体作业区如图 1 阴影部分所示。

1.3 跟踪监测方法

现场跟踪监测采用固定点采样法(采样点位置如图 1 所示)。其中 A 点位于消除作业区, 采集水样和表层沉积物样; B 点位于作业区下游的未作业区, 采集水样作对照分析; C 点位于坝区以外未消除作业海区, 采集沉积物作对照分析。分别在消除作业前、消除作业 30min 和结束后 2.5h 采集各站点水样, 采用卡

盖式透明 PMMA 水样采集器分表底两层采集, 采样后 30min 内在岸基实验室内进行样品预处理或分析。观测的主要水体指标包括 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-N}$ 、DON、DOP 等不同形态的生源要素, 以及 pH、COD、球形棕囊藻囊体密度等。沉积物采样利用小型箱式采泥器(Ekman-Birge, 德国)采集表层泥样, 分析指标包括植物色素、总有机碳(TOC)、不同形态氮和磷、以及 Fe、Al、Cu、Zn、Pb、Ni、Hg、Cd、Cr 等金属离子。

1.4 样品分析方法

水样中球形棕囊藻囊体计数: 取适量体积水样(视囊体密度而定), 在重力作用下通过 $10\mu\text{m}$ 筛绢过滤, 将截留有囊体的筛绢置于 $f/2$ 培养液中浸泡洗脱, 转移囊体至培养液中, 用 4% 酸性鲁哥氏(Lugol's)溶液固定, 在 50mL 沉降杯中沉降十五分钟后利用倒置光学显微镜计数囊体, 并计算水样中的囊体密度。

水样 pH 值和 COD 分别采用 pH 计法和碱性高锰酸钾法, 具体测定方法详见《海洋监测规范》(国家海洋局, 2008)。不同形态氮、磷、硅的分析采用营养盐自动分析仪法(San⁺⁺Skalar-1000, 荷兰)完成, 其中 DON、DOP 是由过 GF/F 玻璃纤维滤纸水样中的 TN、TP 分别与 DIN 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的差值得出, 样品预处理和分析的具体方法详见文献(卢光远等, 2014)。

沉积物中色素的提取与分析法参考文献(Jiang *et al.*, 2017), 不同形态氮、磷的测定参考文献(李学刚等, 2007), TOC 采用重铬酸钾氧化-还原容量法(国家海洋局, 2008), 金属离子采用 0.1mol/L 的盐酸浸取后 ICP-MS 测定。

1.5 数据统计分析方法

数据差异显著性检验采用 origin 8.5 中的 t 检验法($P=0.05$)完成。

2 结果与讨论

2.1 改性黏土对围隔水体高密度微藻的消除

在围隔实验中, 围隔袋内水体温度比外围水体更稳定, 且普遍比外围水温高约 $2\text{--}3^\circ\text{C}$ 。添加营养液后各围隔水体内的微藻都出现快速生长现象, 虽然没有添加营养液的对照围隔内的微藻也因温度升高而增长, 但其明显低于营养加富实验组。当培养进入第 4 天后, 营养加富围隔水体的 chl a 浓度可以达到 $30\mu\text{g/L}$ 以上(图 3), 水体颜色已有起始的浅蓝色变为棕色。对照陈菊芳等(1999)报道的我国南海棕囊藻赤潮暴发时水体 chl $a > 10\mu\text{g/L}$ 的经验值, 该培养水体

已达到严重赤潮暴发状态。同时的采样镜检发现, 虽然各围隔袋内的微藻生物仍然为多种混杂, 但在围隔袋 C 中已出现了少量粒径在数十到数百微米的球形棕囊藻囊体(图 4)。第 5 天, 采用改性黏土法对 B、C、D、E 等围隔袋内微藻分别进行了消除实验。采用不同方法添加不同改性黏土后围隔水体中 chl a 变化如图 3 所示。结果表明, 喷洒改性黏土后水体中 chl a 值迅速降低, 在第二天监测时水体中的叶绿素浓度已远低于对照围隔 A, 去除率均 $>90\%$, 说明现场实验用的改性黏土都可以有效消除围隔袋内高密度的微藻。随后的跟踪监测发现, 至实验结束时各喷洒了改性黏土的围隔水体内都没有出现微藻生物量反弹增高的现象(图 3)。对有囊体出现的 C 围隔袋水样做进一步镜检也没有再发现囊体。总体来看, 实验所用

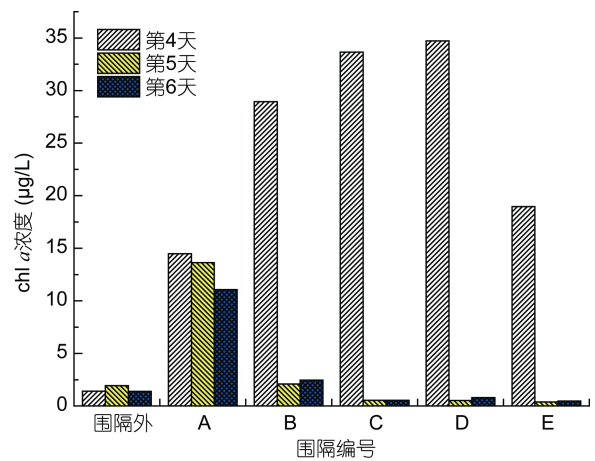


图 3 围隔水体内 chl a 浓度在消除前后的变化
Fig.3 Change in chl a concentrations in the different mesocosm waters

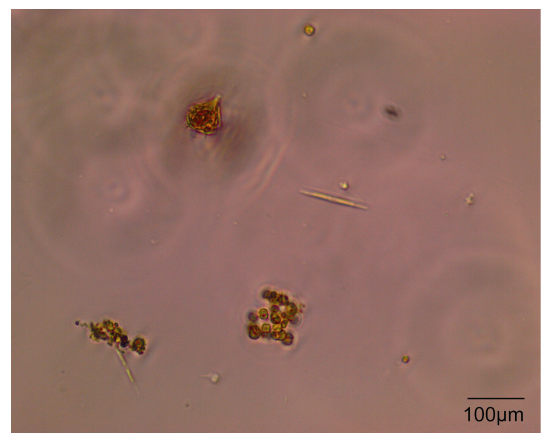


图 4 围隔实验水体中出现的球形棕囊藻囊体(光学显微镜)
Fig.4 *Phaeocystis* colonies in mesocosm (by optical microscope)

的 MC-II 型改性黏土表现出最好的去除效果(D 围隔), 而 MC-I 型改性黏土虽然在采用一次性喷洒消除作业时的效果稍差(B 围隔), 但若采用总用量相同下的多次喷洒法, 该类型改性黏土也可以表现出很好的消除效果(C 围隔)。

2.2 工程化赤潮消除时球形棕囊藻囊体的消除效果

对消除作业时不同区域水体中囊体的跟踪监测结果如图 5 所示。在消除作业区 A 点, 喷洒改性黏土前水体中囊体粒径多集中在 800—5000 μm 范围, 平均密度为 60 ind./L; 喷洒作业 30min 后, 对上层水体再次镜检时囊体密度降为 5 ind./L, 说明改性黏土材料可以快速絮凝消除水体中大部分的囊体; 消除作业结束后 2.5h 时水体中的囊体数进一步下降, 与消除作业前相比较约有 96.7% 的囊体被消除。位于下游取水口的观测点 B 由于不在消除作业区, 因此前两次采样时该点水体中的囊体密度普遍较高, 但在喷洒区作业结束后 2.5h 的采样镜检时, 该处的囊体密度也已大幅度下降, 80% 以上的囊体已经消失, 原因是上游经过改性黏土净化后的水体已流至此位点。

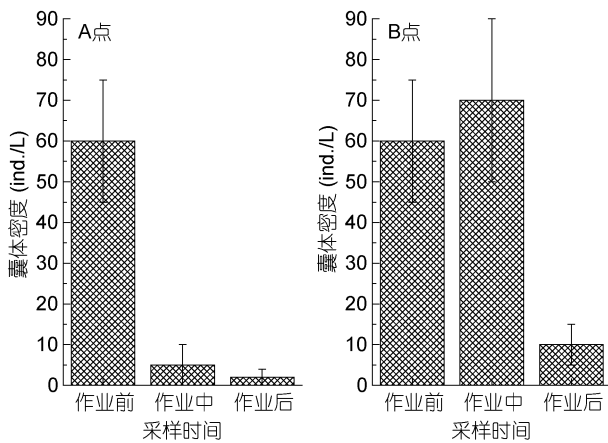


图 5 不同区域水体中球形棕囊藻囊体密度的变化

Fig.5 Variation in *Phaeocystis* colony concentration in different sites

2.3 赤潮消除时现场环境要素的变化

在消除作业区 A 点, 分别在改性黏土喷洒作业前、喷洒作业 30min 及喷洒作业后 2.5h 进行了水体环境要素跟踪监测, 其结果如图 6 和图 7 所示。该结果表明, 作业区表层水体中 DIN, DON, DOP, $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在不同时段平均浓度分别为 (36.7 \pm 0.7), (12.5 \pm 0.3), (0.15 \pm 0.04), (40.8 \pm 5.4) 和 (0.75 \pm 0.02) $\mu\text{mol/L}$, 底层各营养要素浓度与表层基本一致(图 6)。对比不同时段作业区水体中的营养盐浓

度来看, 喷洒改性黏土前后水体中的主要形态氮、磷、硅并没有出现统计学上有显著差异的变化(t 检验, $P=0.05$)。水体 pH 值基本维持在 7.9—8.1(图 7), 符合国家海水水质一类标准(国家环境保护局, 2004)。虽然喷洒改性黏土可能会引起水体中 COD 浓度的波动, 但其波动范围较小, 其浓度始终低于一类水质标准 (2mg/L), 且可以在喷洒作业结束后快速恢复到作业前的浓度水平(图 7)。因此, 喷洒改性黏土对消除作业区水体的 pH、COD 等因子也没有显著水平的影响 (t 检验, $P=0.05$)。

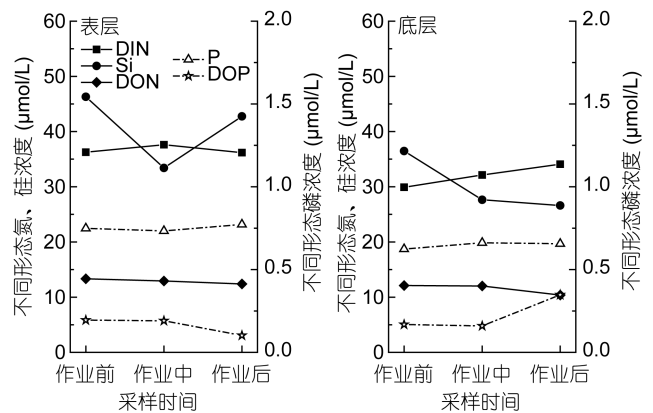


图 6 赤潮消除时水体中不同形态氮磷硅生要素浓度的变化

Fig.6 Variations in different biogeochemical elemental concentrations during red tide removal

先前有室内试验和现场跟踪监测结果都表明, 改性黏土材料对水体中的一些营养要素有较好的吸附去除效果, 对富营养化水质有一定的改善作用。如俞志明等(1995)研究发现黏土对水体中的磷酸盐有较好的去除效果; 张哲海(2006)在玄武湖跟踪了喷洒改性黏土消除蓝藻水华前后的水质变化, 发现喷洒改性黏土后湖水综合污染指数、富营养化程度均有不同程度的降低。本次赤潮消除区为非封闭区, 作为核电站冷源取水通道不断纳入近岸潮汐余流水, 而且监测阶段多有工程船在该区域施工作业, 影响水质变化的不可控因素多变, 可能对改性黏土材料改善水质的效果会有缓冲或掩盖影响, 因此所监测指标在喷洒前及喷洒后之间没有表现出显著水平的变化。

虽然如此, 一些水体富营养化指标在改性黏土施用过程的局部时间内仍表现出浓度降低趋势, 可以为我们评估改性黏土法潜在生态效应提供参考。例如, 喷洒改性黏土时会导致水体中活性硅酸盐的降低, 特别是底层水体中的 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 浓度在整个赤潮消

除过程都表现为下降趋势(图 6)。另外, 在赤潮消除作业时水体中的 DON、DOP 等也呈下降趋势, 说明改性黏土可能会对水体中的溶解有机态氮、磷有一定的去除效果, 而水体中的有机态氮、磷可能对赤潮暴发有重要影响(Sanderson *et al.*, 2008)。

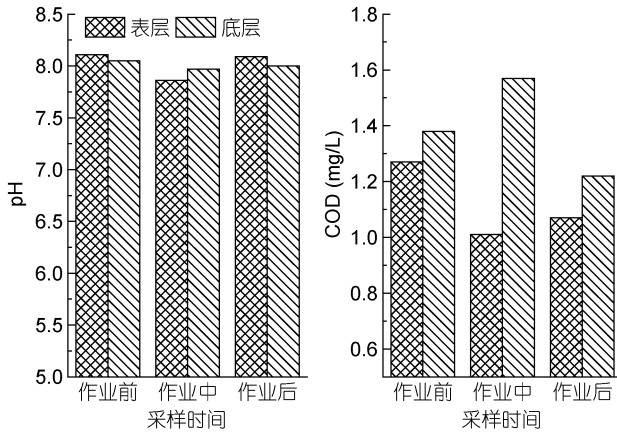


图 7 消除作业前后水体中 pH 和 COD 的变化

Fig.7 Variations of pH and COD after modified clays were applied

在对水质变化监测的同时, 我们对该区域沉积物也进行了采样监测。19'-丁酰氧基岩藻黄素(19'-butanoyloxy-fucoxanthin, But-Fuco)和 19'-己酰氧基岩藻黄素(19'-hexanoyloxy-fucoxanthin, Hexa-Fuco)是棕囊藻属微藻可能含有的特征色素, 对现场表层沉积物色素的监测中没有发现 Hexa-Fuco 色素, 这与先前文献(Jiang *et al.*, 2017)报道的我国南海球形棕囊藻只有 But-Fuco 色素、不含有 Hexa-Fuco 色素的发现是一致的。对改性黏土喷洒作业区和未喷洒对照区的表层沉积物样中植物色素含量对比分析发现, 虽然对照区也在赤潮影响范围内, 但区内沉积物中的植物色素浓度普遍低于消除作业区, 特别是对海区内球形棕囊藻有指示作用的特征色素 But-Fuco 仅为消除作业区的 7.9%(图 8)。对照采样点位于冷源取水坝的邻近海, 与坝内采样点的主要不同是该位点没有喷洒改性黏土, 因此两个站点沉积物中特征色素浓度的显著差异应该是由赤潮消除工程实施导致的。这从另一个角度说明了喷洒改性黏土对悬浮球形棕囊藻絮凝和快速沉降的高效性。其他色素虽然不是球形棕囊藻的特征色素, 但也是该藻富含的色素, 如 chl *a*、岩藻黄素(fucoxanthin)等, 这两种色素在消除作业区分别比对照区高出了 2.82 倍和 2.83 倍, 这些藻源色素在短时间内快速沉积下来也很好的说明了改性黏土在“俘获”水体中球形棕囊藻的高效性。另外,

通常认为脱镁叶绿素(pheophytin *a*)色素是 chl *a* 直接分解的次级产物, 而脱镁叶绿酸盐(pheophorbide *a*)是 chl *a* 被摄食者咀嚼后降解的次级产物。现场监测结果发现消除作业区沉积物中的脱镁叶绿素浓度远高于脱镁叶绿酸盐, 说明被改性黏土沉降下来的球形棕囊藻多是以未被摄食态为主。脱镁叶绿素浓度的快速增加也说明有较大比例的被絮凝下沉藻细胞受到破坏而失去了生物活性, 这大大降低了藻细胞从絮凝体中逃逸后再生长的可能性。由于赤潮藻细胞沉降到水体底层后的生物活性和再次增殖潜力将影响赤潮治理的效率, 现场观测到的脱镁叶绿素浓度快速增加现象表明改性黏土除藻具有很好的“绝对有效性”。

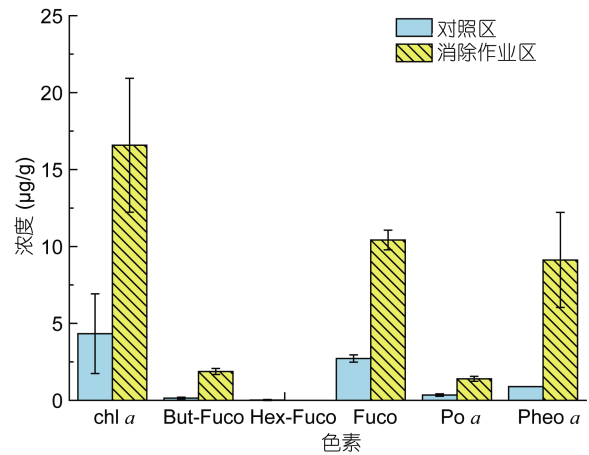


图 8 不同采样点沉积物表层色素浓度的变化

Fig.8 Concentrations of several algal pigments in different sites

注: 几种色素的全称: chl *a*: chlorophyll *a*; But-Fuco: 19'-butanoyloxy-fucoxanthin; Hex-Fuco: 19'-hexanoyloxy-fucoxanthin; Fuco: fucoxanthin; Po *a*: pheophorbide *a*; Pheo *a*: pheophytin *a*

不同采样点沉积物表层泥样中主要生源要素碳、氮、磷浓度的监测结果如图 9 所示。在微藻生长过程具有重要作用的氮、磷通常都以多种形态存在。对样品中氮、磷的分析表明, 对照区沉积物中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对 TN 的贡献非常大, 约占总氮的 76%, 而消除作业区样品中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较低, TN 也远低于对照区。分析其原因可能是对照区的沉积物较长时间没有受到扰动, 滋生大量腐殖质, 而作为冷源取水的坝区经常被疏浚, 因此铵氮类化合物较少。由于对照区 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对 TN 影响太大, 当前的结果还不能判断改性黏土法消除赤潮时对底质中氮的影响。

在两个监测点表层沉积物中的磷都以无机态磷为主, 这与大多数近海湾沉积物中的磷特征相同, 其中消除作业区的总磷浓度显著高于对照区, 并且

不论是有机态磷还是无机态磷都要高于对照区。另外,消除作业区沉积物中的 TOC 也明显升高,比对照区的增加了 52%。本次现场跟踪监测发现的消除作业区沉积物中 TOC、TP 显著增加,说明在采用改性黏土法消除赤潮生物时,该材料不仅可以吸附一些高价态的无机态阴离子(如 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$),而且可以快速与水体

中的藻源有机质絮凝聚结,随后沉降到海底表层。这个过程可能会在短时间内导致沉积物表层中有机质含量和磷的升高,这是先前室内研究没有发现的。但由于两个采样点碳、氮、磷等生源要素本底值并不完全相同,现有数据仍无法对自然水体中单位改性黏土的生源要素吸附效率做定量评价。

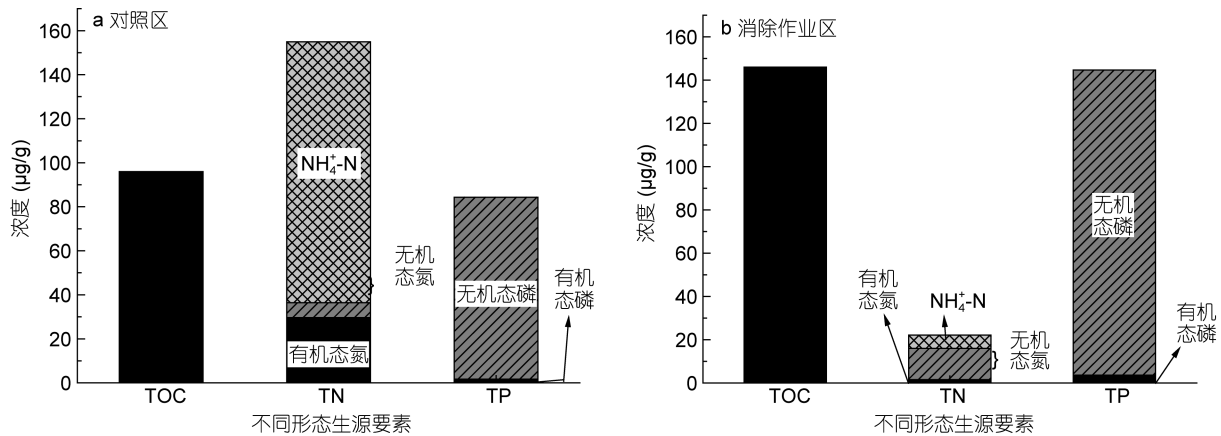


图 9 不同采样点沉积物中碳、氮、磷等生源要素浓度

Fig.9 Variations in different biogeochemical elemental concentrations in different sediments

对于现场表层沉积物中可以酸浸提取金属离子的监测结果如表 1 所示。与对照区相比较,消除作业区沉积物中的金属离子浓度并没有显著变化(t 检验, $P=0.05$),这说明采用改性黏土法控制赤潮不会给作业区带来金属离子污染。

表 1 不同采样点沉积物中金属离子浓度变化
Tab.1 Variation in metal ion concentrations in different sediments

离子	对照区 ($\mu\text{g/g}$)	消除作业区 ($\mu\text{g/g}$)	差异率 (%)
Fe	57235.70	58104.62	1.52
Al	23537.34	25226.92	7.18
Cu	69.00	77.46	12.26
Zn	313.44	316.69	1.04
Pb	133.59	148.35	11.05
Ni	44.59	40.92	-8.23
Cd	0.79	0.95	20.25
Cr	27.76	28.69	3.35

3 结论

(1) 喷洒改性黏土是有效消除球形棕囊藻囊体的方法,其中以少量多次喷洒法的除藻效果为最好。在广西防城港附近的球形棕囊藻赤潮水体喷洒改性黏土后,水体中过量的囊体型球形棕囊藻被快速消除。

(2) 赤潮消除作业区沉积物中的色素变化进一步证实了大量球形棕囊藻被改性黏土絮凝沉降到水体底层,随后快速分解。

(3) 在工程化消除球形棕囊藻赤潮时,所喷洒改性黏土对于暴发赤潮水体的水质没有显著影响,水体中 COD、pH 和不同形态氮、磷、硅等营养要素浓度都在原有水质水平范围内波动。

致谢 中国科学院海洋研究所孙华杰参与了现场采样过程,广西科学院姜发军博士、陆家昌博士和许铭本博士对本研究的现场分析提供了支持,中国科学院海洋研究所李学刚研究员、中国水产研究院黄海水产研究所江涛博士在沉积物分析过程给予了大力支持,在此致以诚挚谢忱!

参 考 文 献

- 于仁成,刘东艳,2016.我国近海藻华灾害现状、演变趋势与应对策略.中国科学院院刊,31(10):1167—1174
- 王小冬,2010.棕囊藻囊体形成及对环境压力的响应.青岛:中国海洋大学博士学位论文
- 王志富,俞志明,宋秀贤等,2014.有害藻华治理过程中改性黏土对仿刺参(*Apostichopus japonicas* Selenka)稚参的影响.海洋与湖沼,45(2):233—238
- 卢光远,宋秀贤,俞志明等,2014.改性黏土絮凝海洋原甲藻对水体中氮、磷的影响研究.中国环境科学,34(2):492—498
- 齐雨藻,徐宁,王艳等,2002.中国赤潮研究的新进展

- 球形棕囊藻赤潮及其产硫的研究. 中国基础科学, (4): 25—28
- 李亚男, 沈萍萍, 黄良民等, 2012. 棕囊藻的分类及系统进化研究进展. 生态学杂志, 31(3): 745—754
- 李学刚, 宋金明, 牛丽凤等, 2007. 近海沉积物中氮磷的同时测定及其在胶州湾沉积物中的应用. 岩矿测试, 26(2): 87—92
- 杨维东, 商文, 刘洁生, 2009. 球形棕囊藻对五种水生动物的急性毒性作用. 热带亚热带植物学报, 17(1): 68—73
- 陈菊芳, 徐宁, 江天久等, 1999. 中国赤潮新记录种——球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*). 暨南大学学报: 自然科学版, 20(3): 124—129
- 张哲海, 2006. 玄武湖蓝藻水华应急治理成效分析. 污染防治技术, 19(5): 56—59
- 国家海洋局, 2008. GB 17378.4-2007 海洋监测规范 第4部分: 海水分析. 北京: 中国标准出版社
- 国家环境保护局, 2004. GB 3097-1997 海水水质标准. 北京: 环境科学出版社
- 俞志明, 马锡年, 谢阳, 1995. 黏土矿物对海水中主要营养盐的吸附研究. 海洋与湖沼, 26(2): 208—214
- 俞志明, 邹景忠, 马锡年, 1994. 一种提高黏土矿物去除赤潮生物能力的新方法. 海洋与湖沼, 25(2): 226—232
- 曹西华, 宋秀贤, 俞志明, 2004. 改性黏土去除赤潮生物及其对养殖生物的影响. 环境科学, 25(5): 148—152
- 曹西华, 宋秀贤, 俞志明等, 2006. 有机改性黏土去除赤潮生物的机制研究. 环境科学, 27(8): 1522—1530
- Anderson D M, 1997. Turning back the harmful red tide. Nature, 388(6642): 513—514
- Anderson D M, Anderson P, Bricelj V M *et al*, 2001. Monitoring and management strategies for harmful algal blooms in coastal waters. Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series No.59, Singapore: Asia Pacific Economic Cooperation Program, 183
- Heisler J, Glibert P M, Burkholder J M *et al*, 2008. Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus. Harmful Algae, 8(1): 3-13
- Jiang T, Yu Z H, Qi Z H *et al*, 2017. Effects of intensive mariculture on the sediment environment as revealed by phytoplankton pigments in a semi-enclosed bay, South China Sea. Aquaculture Research, 48(4): 1923—1935
- Liu J S, van Rijssel M, Yang W D *et al*, 2010. Negative effects of *Phaeocystis globosa* on microalgae. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 28(4): 911—916
- Sanderson M P, Bronk D A, Nejstgaard J C *et al*, 2008. Phytoplankton and bacterial uptake of inorganic and organic nitrogen during an induced bloom of *Phaeocystis pouchetii*. Aquatic Microbial Ecology, 51(2): 153—168
- Smith W O, Liu X, Tang K W *et al*, 2014. Giantism and its role in the harmful algal bloom species *Phaeocystis globosa*. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 101: 95—106
- Yu Z M, Sengco M R, Anderson D M, 2004. Flocculation and removal of the brown tide organism, *Aureococcus anophagefferens* (Chrysothymales), using clays. Journal of Applied Phycology, 16(2): 101—110

FIELD EXPERIMENT AND EMERGENT APPLICATION OF MODIFIED CLAYS FOR *PHAEOCYSTIS GLOBOSA* BLOOMS MITIGATION

CAO Xi-Hua^{1,2}, YU Zhi-Ming^{1,2}, QIU Li-Xia^{1,3}

(1. CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract *Phaeocystis globosa* has a polymorphic life cycle. It is a toxic phytoplankton species which can form colonies and bloom into eco-disasters in the worldwide seawaters. *P. globosa* blooms frequently occurred along the south China coasts in recent years. These colonies are over several centimeters in diameter, and is much larger than those reported in other oceans. No previous reports are made about how to mitigate effectively *P. globosa* blooms. In this study, we tested the efficiencies of the colony removal and the environmental effects of different modified clays (MCs) in the field mesocosm and a bloom mitigation. Results of our mesocosm experiments showed that it was efficient to remove *P. globosa* blooms by spraying MCs, which presented algal biomass removal efficiencies of more than 90%, and the better efficiency was achieved by frequent spraying MCs at small dosages. Spraying MCs was also effective for removing colonies of *P. globosa* blooms in the Fangchenggang coast. Analysis of algal pigments in sediments showed that MCs could effectively settle and lyse *P. globosa* cells after they were coagulated. Notably, the impact of MCs on COD, pH and concentrations of different forms of nitrogen, phosphorus and silicon in the bloomed water was minimum and the variations of these parameters were within the range of water quality.

Key words *Phaeocystis globosa*; red tide; modified clays; mitigation; environmental effects; pigments