

# 巨牡蛎(*Crassostrea* sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积

刘锡尧,袁东星\*,陈耀瑾

(厦门大学环境与生态学院,厦门 361005)

**摘要:** 研究了巨牡蛎(*Crassostrea* sp.) 对配备烟气海水脱硫装置电厂的脱硫海水中汞(Hg)的生物累积。在电厂的排水口(实验点)和参考点分别吊养牡蛎群,定期采集样品,测定海水中的Hg浓度和牡蛎的Hg含量(均以干重计)。实验点和参考点海水中的总汞(THg)浓度分别为 $(120.6 \pm 55.5) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $n=5$ )和 $(2.7 \pm 1.0) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $n=5$ ),甲基汞(MeHg)的浓度分别为 $(0.30 \pm 0.44) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $n=5$ )和 $(0.28 \pm 0.31) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $n=5$ )。在7 d内,实验点牡蛎体内THg含量从 $(138.3 \pm 14.3) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  ( $n=6$ )迅速增加到 $(3012 \pm 289) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  ( $n=6$ ),且在后来的34 d内,一直保持在 $2935 \sim 4490 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 的高含量水平;而参考点牡蛎对THg未见明显累积,为 $60.7 \sim 137.5 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间。暴露期间实验点牡蛎体内MeHg的含量未发生显著变化,保持在 $55.4 \sim 73.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间。而参考点牡蛎MeHg含量呈略微下降的趋势,但变化幅度不大,在 $15.6 \sim 55.6 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间。本研究表明,燃煤电厂排放的脱硫海水中的THg可被牡蛎迅速累积至很高的含量水平,有不容忽视的潜在风险。脱硫海水中MeHg的浓度很低,其在牡蛎体内未见明显累积;在本研究的条件下,未观测到牡蛎自身合成MeHg或将无机汞转化为MeHg。

**关键词:** 汞;生物累积;牡蛎;海水;烟气海水脱硫

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1374-06

## Bioaccumulation of Mercury in *Crassostrea* sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System

LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin

(College of the Environment &amp; Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A field experiment was conducted to study mercury (Hg) bioaccumulation in *Crassostrea* sp. exposed to waste seawater discharged from a coal-fired power plant equipped with a flue gas desulfurization system. Oysters were cultured in the discharge outlet of the power plant (studying site) and a control site, respectively. The total Hg (THg) concentrations (all counted as dry weight) of seawater in the studying and control sites were determined as  $(120.6 \pm 55.5) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $n=5$ ) and  $(2.7 \pm 1.0) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $n=5$ ), respectively, while methyl Hg (MeHg) concentrations were  $(0.30 \pm 0.44) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $n=5$ ) and  $(0.28 \pm 0.31) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $n=5$ ), respectively. The THg in oyster at the studying site increased dramatically from  $(138.3 \pm 14.3) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  ( $n=6$ ) to  $(3012 \pm 289) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  ( $n=6$ ) within 7 d, and remained at high levels of  $2935 \sim 4490 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  for the next 34 d. In contrast, the THg in oyster at the control site showed no significant change, and kept at low levels of  $60.7 \sim 137.5 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ . After 41 d exposure, the MeHg in oyster at the studying site had no significant change, ranging from  $55.4 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  to  $73.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , and the content at the control site showed a slight decrease, ranging from  $15.6$  to  $55.6 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ . The study showed that THg in the waste seawater discharged at the coal-fired power plant could be quickly bioaccumulated by oyster to a great extent, the potential risk can thus not be ignored. MeHg concentration in the waste seawater was quite low, and no obvious bioaccumulation was found in oyster. Under the study conditions, no self-synthesis of MeHg or transformation of inorganic Hg into MeHg was found.

**Key words:** mercury; bioaccumulation; oyster; seawater; flue gas desulfurization

许多沿海地区的燃煤火力发电厂采用烟气海水脱硫工艺削减SO<sub>2</sub>的排放。但SO<sub>2</sub>被海水吸收排海的同时,燃煤中的汞(Hg)也被吸收、排放到海域中<sup>[1,2]</sup>。此部分Hg在海洋生物尤其是海产品体内累积,对人类健康带来潜在风险,但对此尚未有相关的研究报道。

牡蛎是我国重要的经济贝类之一,在沿海地区分布广泛,产量丰富。牡蛎对养殖、生长条件的要

求相对较低,能够在高污染区存活,能够耐受海水中较高浓度的重金属,且寿命较长<sup>[3]</sup>。据报道,牡蛎对Hg的生物累积程度比大多数其它金属更大<sup>[4]</sup>,对Hg的累积能力也比其它贝类更强<sup>[5]</sup>,为此,牡蛎可

收稿日期: 2012-07-05; 修订日期: 2012-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(20777063, 40976070)

作者简介: 刘锡尧(1985~),男,博士研究生,主要研究方向为环境化学与监测, E-mail: xyliuxmu@xmu.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: yuandx@xmu.edu.cn

作为海洋环境中 Hg 污染的指示生物<sup>[6]</sup>。

本研究在现场吊养巨牡蛎(*Crassostrea* sp.) ,分析其对燃煤电厂脱硫海水中总汞 (THg) 和甲基汞 (MeHg) 的中长期累积规律, 以期为评估脱硫海水 Hg 暴露风险提供实验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

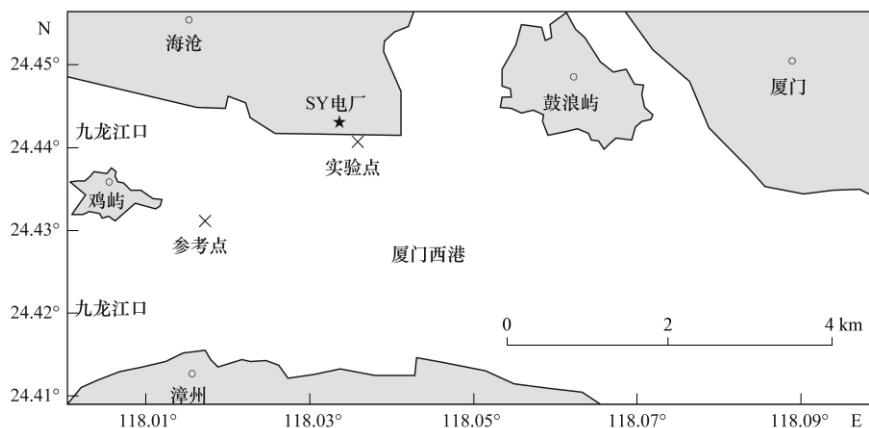


图 1 研究地点示意

Fig. 1 Map of studying area

### 1.2 样品的采集和测定的参数

在第 0、7、14、21、28、34、41 d, 取实验点和参考点牡蛎各 8~12 个, 以备测定其 THg 和 MeHg 含量。每次取样时, 现场记录海水温度、pH 等参数。采集两处的表层海水样品, 以备测定其 THg、总 MeHg、溶解态 THg 和溶解态 MeHg 的浓度, 以及盐度、叶绿素 a、浮游植物细胞总数、悬浮颗粒物、溶解氧、化学需氧量(高锰酸盐指数) 等水质参数。

### 1.3 样品测定

(1) 牡蛎样品预处理 选取个体大小相近的牡蛎(壳长为 2.8~3.7 cm) 6~10 个, 使用不锈钢刀剥去外壳后, 用塑料勺将软体组织全部取出, 用超纯水冲洗 3 遍后, 冷冻干燥。样品经磨碎、混匀后, 在 -20℃ 下密闭保存。

(2) 牡蛎样品 THg 分析 冷干后的样品经 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> (3/7, 体积比) 混合溶液消解后, 按 EPA 1631 方法<sup>[7]</sup> 测定。牡蛎样品 MeHg 分析: 冷干后的样品经 25% (质量分数) KOH 的甲醇溶液萃取后, 按照 EPA 1630 方法<sup>[8]</sup> 测定。

(3) 海水样品 THg、溶解态 THg 的测定 取现场采集、实验室 0.45 μm 微孔滤膜过滤后的海水样品, 按照 EPA 1631 方法<sup>[7]</sup> 进行。海水样总 MeHg、

溶解态 MeHg 的测定: 按照 EPA 1630 方法<sup>[8]</sup> 进行。  
(4) 海水水质参数测定 均按照文献[9]进行。

研究区域实验点和参考点如图 1 所示, 实验点位于配备烟气海水脱硫装置的厦门 SY 电厂排放口, 参考点位于离实验点 2 150 m、接近鸡屿处。2008 年 7~8 月, 在实验点和参考点, 分别吊养采自厦门市同安牡蛎养殖区的牡蛎各约 100 个, 吊养深度为最低潮位以下约 1 m。实验共进行了 41 d, 以研究牡蛎对 SY 电厂脱硫海水中 MeHg 和 THg 的累积规律。

溶解态 MeHg 的测定: 按照 EPA 1630 方法<sup>[8]</sup> 进行。

(4) 海水水质参数测定 均按照文献[9]进行。

### 1.4 统计分析

实验点和参考点海水水质参数、海水样中各形态 Hg 的浓度、牡蛎中的 MeHg 含量比较, 均采用配对样本均数比较 (*T* 检验) 的方法; 实验点和参考点牡蛎 THg 和 MeHg 含量随暴露时间变化的趋势判断, 采用秩相关分析 (spearman correlation analysis) 的方法。

## 2 结果与分析

### 2.1 海水水质参数

如表 1 所示, 实验点海水温度显著高于参考点; pH 显著低于参考点; 悬浮颗粒物的含量远高于参考点; 叶绿素 a 浓度略微低于参考点, 但差异不显著。实验点和参考点的海水溶解氧、高锰酸盐指数和盐度无显著性差异; 浮游植物细胞总数也无显著性差异。综上, 两处海水水质参数的差异主要体现在悬浮颗粒物、温度和 pH 上。

### 2.2 海水中 Hg 的形态

如表 2 所示, 实验点海水 THg 浓度显著高于参考点, 实验点海水 THg 浓度符合国家二类海水水质标准, 参考点符合国家一类标准<sup>[10]</sup>。脱硫海水中总

MeHg 和溶解态 THg 占 THg 的比例很小,分别为 0.2% 和 5.1%,Hg 的主要赋存形态为颗粒态无机

汞(94.8%),两处海水总 MeHg、溶解态 THg 无显著性差异。

表 1 实验点和参考点海水水质参数<sup>1)</sup>

Table 1 Seawater conditions of the studying and control sites

参数	参考点	实验点	配对样本均数比较 ( <i>T</i> 检验)	显著性水平
温度/°C	30.0 ± 1.3	32.1 ± 1.8	<i>P</i> = 0.009 ( <i>n</i> = 4)	**
pH	7.86 ± 0.10	6.77 ± 0.40	<i>P</i> = 0.015 ( <i>n</i> = 4)	*
悬浮颗粒物/mg·L <sup>-1</sup>	9.50 ± 1.60	76.47 ± 7.81	<i>P</i> = 0.003 ( <i>n</i> = 3)	**
盐度	19.23 ± 7.22	23.76 ± 5.57	<i>P</i> = 0.388 ( <i>n</i> = 3)	NS
溶解氧/mg·L <sup>-1</sup>	6.44 ± 0.82	5.93 ± 0.35	<i>P</i> = 0.366 ( <i>n</i> = 2)	NS
高锰酸盐指数/mg·L <sup>-1</sup>	1.43 ± 0.55	0.98 ± 0.28	<i>P</i> = 0.438 ( <i>n</i> = 3)	NS
叶绿素 <i>a</i> /μg·L <sup>-1</sup>	6.73 ± 1.25	5.70 ± 1.39	<i>P</i> = 0.059 ( <i>n</i> = 2)	NS
浮游植物细胞总数/个·L <sup>-1</sup>	4.61 × 10 <sup>5</sup> ± 1.60 × 10 <sup>5</sup> ( <i>n</i> = 4)	4.41 × 10 <sup>5</sup> ± 1.12 × 10 <sup>5</sup> ( <i>n</i> = 4)	<i>P</i> = 0.572 ( <i>n</i> = 4)	NS

1) \*\* 表示 0.001 < *P* < 0.01, 非常显著; \* 表示 0.01 < *P* < 0.05, 显著; NS 表示 *P* > 0.05, 不显著

表 2 海水 THg、溶解态 THg、总 MeHg 和溶解态 MeHg 浓度<sup>1)</sup>

Table 2 THg, dissolved THg, total MeHg and dissolved MeHg concentrations in seawater

参数	参考点	实验点	配对样本均数比较 ( <i>T</i> 检验)	显著性水平
THg/ng·L <sup>-1</sup>	2.7 ± 1.0	120.6 ± 55.5	<i>P</i> = 0.009 ( <i>n</i> = 5)	**
溶解态 THg/ng·L <sup>-1</sup>	1.0 ± 0.2	6.2 ± 3.4	<i>P</i> = 0.258 ( <i>n</i> = 2)	NS
总 MeHg/ng·L <sup>-1</sup>	0.28 ± 0.31	0.30 ± 0.44	<i>P</i> = 0.910 ( <i>n</i> = 2)	NS
溶解态 MeHg/ng·L <sup>-1</sup>	N. D	N. D		
总 MeHg/THg/%	10.4	0.2		
溶解态 THg/THg/%	37.0	5.1		

1) N. D 表示未检出; \*\* 表示 0.001 < *P* < 0.01, 非常显著; NS 表示 *P* > 0.05, 不显著

### 2.3 牡蛎 THg 含量的变化

如图 2 所示,从第 0 d 到第 7 d,实验点牡蛎 THg 含量从(138.3 ± 14.3) ng·g<sup>-1</sup> (*n* = 6, 干重, dw) 迅速增加到(3 012 ± 289) ng·g<sup>-1</sup> (*n* = 6),日累积速率达 410.5 ng·g<sup>-1</sup>,且在后来的 34 d 内,一直保持在 2 935 ~ 4 490 ng·g<sup>-1</sup> 的高含量水平,但在第 21 ~ 28 d 之间,牡蛎 THg 下降了 32.8%,原因可能是牡蛎正处于产卵期(厦门巨牡蛎的产卵高峰期为 5 ~ 9 月),本研究观察到牡蛎的内脏由白色变透明,且变得清瘦,说明发生了大规模产卵<sup>[11]</sup>。而参考点牡蛎对 THg 未见明显累积,牡蛎 THg 在 60.7 ~ 137.5 ng·g<sup>-1</sup> 之间,甚至呈略微下降的趋势(秩相关分析: Correlation coefficient = -0.429, *P* = 0.337)。

### 2.4 牡蛎 MeHg 含量的变化

如图 3 所示,实验点牡蛎 MeHg 含量虽显著高于参考点(*P* < 0.001),但对 MeHg 未见累积趋势(秩相关分析: Correlation coefficient = -0.143, *P* = 0.760) 牡蛎 MeHg 含量未发生显著变化,始终保持在 55.4 ~ 73.1 ng·g<sup>-1</sup> 之间。而参考点牡蛎 MeHg 含量呈略微下降的趋势(秩相关分析: Correlation coefficient = -0.679, *P* = 0.094) 但变化幅度不大,

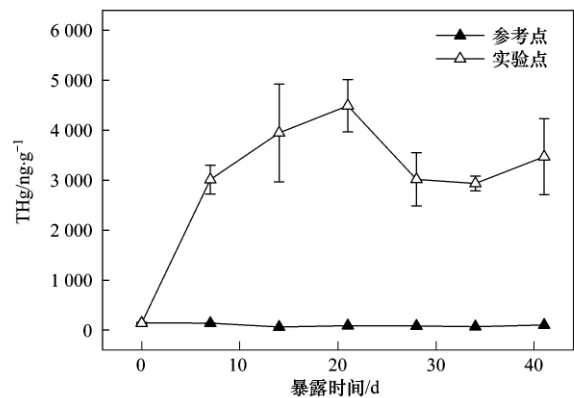


图 2 牡蛎 THg 含量随暴露时间的变化

Fig. 2 THg concentration in oyster as a function of exposure time

保持在 15.6 ~ 55.6 ng·g<sup>-1</sup> 之间。

## 3 讨论

### 3.1 脱硫海水水质参数变化

测得的实验点海水温度显著高于参考点,源自烟气与海水的交换;实验点海水 pH 显著低于参考点,原因是海水吸收烟气中酸性 SO<sub>2</sub> 导致 pH 值降低。实验点海水中悬浮颗粒物的含量远高于参考点,是因为在烟气海水脱硫工艺运行时,经过静电除

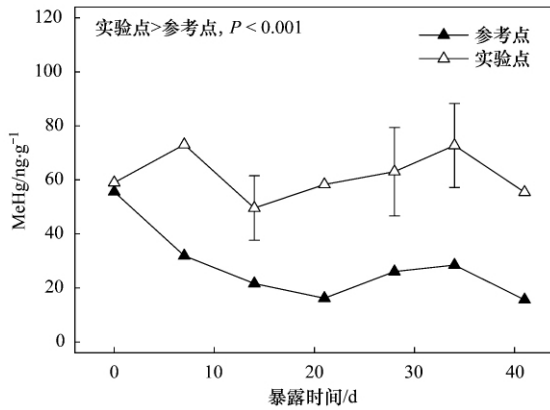


图3 牡蛎 MeHg 含量随暴露时间的变化

Fig. 3 MeHg concentration in oyster as a function of exposure time

尘器的剩余飞灰被洗涤到脱硫海水中,造成海水中悬浮颗粒物浓度增加.国内学者的相关研究也得到类似结果<sup>[12]</sup>.

### 3.2 脱硫海水中 Hg 的浓度

本研究测得实验点海水即脱硫海水 THg 浓度为(120.6 ± 55.5) ng·L<sup>-1</sup>,因受潮位、海流方向、电厂工况和燃煤 Hg 含量波动等多方面因素的影响,测定结果的标准偏差较大. Liang 等<sup>[2]</sup>在 2008 年监测了 SY 电厂附近海域,测得排水口海水 THg 浓度为 93 ng·L<sup>-1</sup>. 吴来贵<sup>[13]</sup>测得深圳西部电厂曝气池出口海水 THg 浓度为 40 ~ 100 ng·L<sup>-1</sup>. 本研究的测定结果与上述相关报道相近. 实验点海水 THg 浓度虽远高于参考点,但仍然较低,符合国家二类海水水质标准,且与国内学者在相关海域的监测结果<sup>[14]</sup>处在相同的量级.

### 3.3 牡蛎对 THg 的生物累积

按照生物累积金属动力学模型<sup>[15]</sup>将生物体当作箱室,生物体内金属浓度由金属输入生物体和生物体输出金属的速率共同决定,金属含量随时间的变化可表示为:  $dC/dt = k_1 C_m - k_2 C$ , 式中  $k_1$  为吸收常数 [ $L \cdot (g \cdot d)^{-1}$ ],  $C_m$  为环境相金属浓度 ( $ng \cdot L^{-1}$ )  $k_2$  为排出速率常数,  $C$  为生物体金属含量 ( $ng \cdot g^{-1}$ ). 对上式积分,当输入大于输出时,某一时间点生物体的金属含量 ( $C_t$ ) 为:  $C_t = C_0 + k_1 C_m / k_2 \times (1 - e^{-k_2 t})$ , 为生物累积曲线; 在稳定状态下  $dC/dt = 0$ , 生物体金属含量 ( $C_{ss}$ ) 为:  $C_{ss} = C_0 + k_1 C_m / k_2$ . 当输入小于输出时,  $C_t = C_0 - k_1 C_m / k_2 \times (1 - e^{-k_2 t})$ , 为生物排出曲线; 在稳定状态下,  $C_{ss} = C_0 - k_1 C_m / k_2$ . 生物富集系数 (BCF) 为:  $BCF = (C_{ss} - C_0) / C_m$ .

将实验点牡蛎 THg 含量与暴露时间进行拟合,因 Hg 输入大于输出,得到牡蛎的生物累积曲线  $y =$

$138.3 + 3418 \times (1 - e^{-0.3046x})$ , 如图 4 所示. 根据动力学方程  $k_2 = 0.3046 d^{-1}$ ;  $k_1 = 7.95 L \cdot (g \cdot d)^{-1}$ ; 生物半衰期  $B_{1/2} = \ln 2 / k_2 = 2.3 d$ ;  $C_{ss} = C_0 + 3418 = 3553.3 ng \cdot g^{-1} (dw)$ , 在暴露 14.7 d 后牡蛎体内 THg 含量即可趋于稳定; 生物富集系数 BCF 为  $2.83 \times 10^4$ .

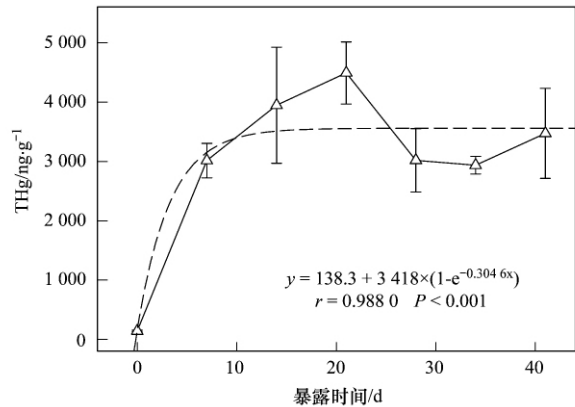


图4 实验点牡蛎 THg 生物累积动力学拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of THg bioaccumulation kinetics for oyster at the studying site

将参考点牡蛎 THg 含量与暴露时间进行拟合,因 Hg 输入大于输出,得牡蛎的排出曲线  $y = 144.5 - 64.0 \times (1 - e^{-0.1138x})$ , 如图 5 所示. 根据动力学方程  $k_1 = 2.70 L \cdot (g \cdot d)^{-1}$ ;  $k_2 = 0.1138 d^{-1}$ ;  $B_{1/2} = \ln 2 / 0.1138 = 6.1 d$ ;  $C_{ss}$  为  $80.5 ng \cdot g^{-1} (dw)$ , 在暴露约 37 d 后牡蛎体内 THg 含量趋于稳定.

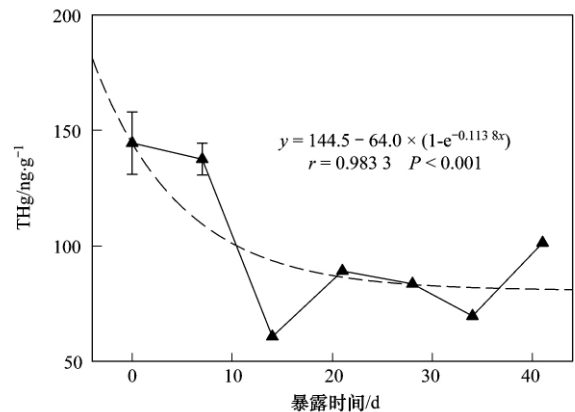


图5 参考点牡蛎 THg 生物累积动力学拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of THg bioaccumulation kinetics for oyster at the control site

根据报道,可将 8.0 作为牡蛎湿重 (ww) 和干重 (dw) 的换算因子<sup>[3]</sup>. 经过折算后,在第 7 ~ 41 d,实验点牡蛎 THg 含量为  $0.367 \sim 0.561 mg \cdot kg^{-1} (ww)$ . 比较相关的国内和国际标准可知<sup>[16~18]</sup>,实验点牡蛎 THg 含量峰值超过了大多数国内外的限

量标准( $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , ww),因而对人类健康具有潜在的暴露风险。

国内外许多学者也研究了牡蛎对 Hg 的生物累积和排出<sup>[19~24]</sup>,结果与本研究一致。但本研究对象脱硫海水 THg 的浓度较其他研究的更低,更具有环境现实意义。与相关研究相比,牡蛎对脱硫海水 THg 的吸收速率常数较大,生物富集系数较大,排出速率常数也较大,生物半衰期较短,这些均与脱硫海水温度较高有关。

### 3.4 牡蛎对 MeHg 的生物累积

按照生物累积污染物动力学模型<sup>[15]</sup>,将实验点牡蛎 MeHg 含量与暴露时间进行拟合,如图 6 所示。因实验点海水中 MeHg 浓度较低,牡蛎对 MeHg 的吸收小于代谢,得到生物排出曲线:  $y = 59.0 - 0.2075 \times (1 - e^{-0.000000004x})$ 。因  $k_2$  很小( $4 \times 10^{-10} \text{ d}^{-1}$ ),拟合无显著意义,可认为在整个实验期间牡蛎 MeHg 含量无显著变化。参考点海水中 MeHg 浓度很低,牡蛎对 MeHg 的吸收小于代谢,且牡蛎的生长对 MeHg 含量有稀释效应,MeHg 含量呈指数下降。牡蛎 MeHg 的生物排出曲线为  $y = 55.6 - 34.4 \times (1 - e^{-0.1921x})$ 。实验点牡蛎 MeHg 的  $k_2$  ( $4 \times 10^{-10} \text{ d}^{-1}$ ) 小于 THg 的  $k_2$  ( $0.3046 \text{ d}^{-1}$ ),可见无机汞较 MeHg 更易排出。而参考点牡蛎 MeHg 的  $k_2$  ( $0.1921 \text{ d}^{-1}$ ) 大于 THg 的  $k_2$  ( $0.1138 \text{ d}^{-1}$ ),可能与参考点海水 MeHg 和 THg 的浓度均较低,牡蛎 MeHg 含量的变化很小,计算的误差增大有关。Blackmore 等<sup>[25]</sup>发现在海水温度  $28^\circ\text{C}$ 、盐度 28 下,牡蛎对 MeHg 的吸收速率常数为 Hg(II) 的 1.67 倍,原因是 MeHg 脂溶性高,容易从消化颗粒上脱附下来而被牡蛎吸收。同时也发现,牡蛎对 MeHg 的排出速率慢于 Hg(II) 的排出速率。

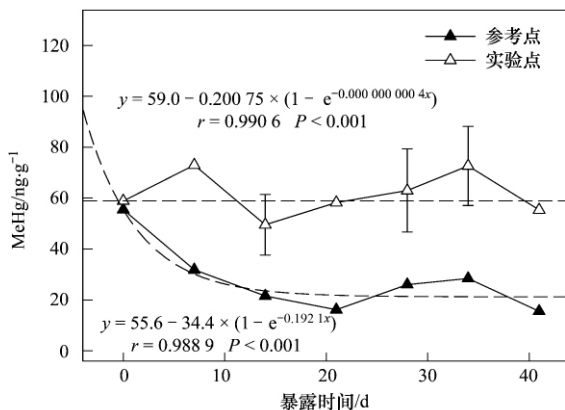


图 6 实验点和参考点牡蛎 MeHg 生物累积动力学拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of MeHg bioaccumulation kinetics for oyster at the studying and control sites

根据牡蛎对 THg 和 MeHg 的累积情况,可知虽然实验点牡蛎 THg 含量迅速增加,但 MeHg 含量却未见增加。将 MeHg 占 THg 的比例与 THg 含量进行拟合,得相关曲线,如图 7 所示。随着牡蛎 THg 含量的增加,MeHg 比例呈反比例下降,据此可认为牡蛎体内 MeHg 含量未发生显著变化,是固有的、内源性的;而牡蛎 THg 含量的增加是外源性的,源自对海水中无机汞的累积。因此推断,在本研究的条件下,未观测到牡蛎自身合成 MeHg 或将无机汞转化为 MeHg。

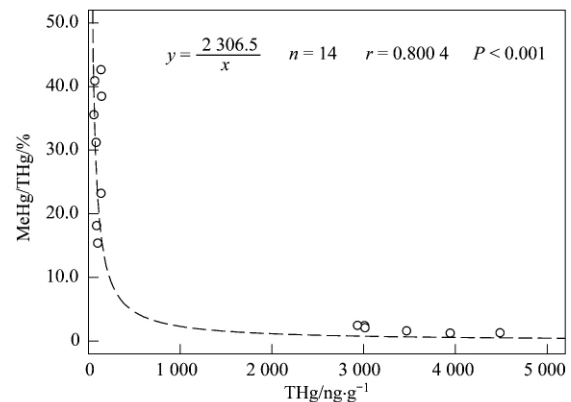


图 7 牡蛎 MeHg% 与牡蛎 THg 含量的关系

Fig. 7 Relationship between MeHg% and THg in oysters

## 4 结论

(1) 燃煤电厂排放的脱硫海水中 Hg 的主要赋存形态为颗粒态无机汞,虽 THg 浓度符合国家二类海水水质标准,但 Hg 可被牡蛎迅速累积至很高的含量水平,有不容忽视的潜在风险。

(2) 牡蛎对脱硫海水中 THg 的累积符合生物累积动力学模型;但吸收速率常数较大,生物富集系数较大,排出速率常数也较大,生物半衰期较短,这些都与脱硫海水的较高温度有关。

(3) 脱硫海水中 MeHg 的浓度很低,其在牡蛎体内未见明显累积。

(4) 在本研究的条件下,未观测到牡蛎自身合成 MeHg 或将无机汞转化为 MeHg。

### 参考文献:

- [1] 陈进生. 海水脱硫电站燃煤过程中汞的形态转化与排放特性研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [2] Liang Y, Liu X Y, Yuan D X, et al. Mercury species in seawater and sediment of Xiamen western sea area adjacent to a coal-fired power plant[J]. Water Environment Research, 2010, 82(4): 335-341.
- [3] Vaisman A G, Marins R V, Lacerda L D. Characterization of the mangrove oyster, *Crassostrea rhizophorae*, as a biomonitor for

- mercury in tropical estuarine systems , Northeast Brazil [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology , 2005 , **74**( 3) : 582-588.
- [ 4 ] Denton G R W , Burdon-Jones C. Influence of temperature and salinity on the uptake , distribution and depuration of mercury , cadmium and lead by the black-lip oyster *Saccostrea echinata* [J]. Marine Biology , 1981 , **64**( 3) : 317-326.
- [ 5 ] Najdek M , Sapunar J. Total and methyl-mercury content in bivalves , *Mytilus galloprovincialis* lamarek and *Ostrea edulis* linnaeus: Relationship of biochemical composition and body size [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology , 1987 , **39**( 1) : 56-62.
- [ 6 ] Meyer U , Hagen W , Medeiros C. Mercury in a northeastern Brazilian mangrove area , a case study: potential of the mangrove oyster *Crassostrea rhizophorae* as bioindicator for mercury [J]. Marine Biology , 1998 , **131**( 1) : 113-121.
- [ 7 ] U. S. EPA Method 1631 , Revision E , 2002. Mercury in water by oxidation , purge and trap , and cold vapor atomic fluorescence spectrometry [S].
- [ 8 ] U. S. EPA Method 1630 , 1998. Methyl mercury in water by distillation , aqueous ethylation , purge and trap , and cold vapor atomic fluorescence spectrometry [S].
- [ 9 ] GB 17378-2007. 海洋监测规范 [S].
- [ 10 ] GB 3097-1997. 海水水质标准 [S].
- [ 11 ] Cunningham P A , Tripp M R. Accumulation and depuration of mercury in the American oyster *Crassostrea virginica* [J]. Marine Biology , 1973 , **20**( 1) : 14-19.
- [ 12 ] 张志红 , 唐茂平. 漳州后石电厂 6 × 600 MW 超临界机组海水脱硫工艺介绍 [J]. 中国电力 , 2002 , **35**( 7) : 69-71.
- [ 13 ] 吴来贵. 深圳西部电厂 4 号机组海水脱硫系统监测分析 [J]. 热能动力工程 , 2003 , **18**( 2) : 200-202.
- [ 14 ] 许廖奇 , 刘汝海 , 王金玉 , 等. 春季胶州湾海水汞的形态研究 [J]. 环境科学 , 2012 , **33**( 1) : 42-47.
- [ 15 ] 王文雄. 微量金属生态毒理学和生物地球化学 [M]. 北京: 科学出版社 , 2010. 116-118.
- [ 16 ] GB 2762-2005. 食品中污染物限量 [S].
- [ 17 ] Canadian Food Inspection Agency. Canadian shellfish sanitation program-manual of operations [S]. Ottawa , ON , Canada , 2009.
- [ 18 ] State/Territory health departments within Australia and New Zealand. Australia New Zealand food standards code [S]. Australia Legislation , 2010.
- [ 19 ] 沈鑫绿 , 马继臻 , 平仙隐 , 等. 巨牡蛎对重金属的生物富集动力学特性研究 [J]. 农业环境科学学报 , 2009 , **28**( 4) : 783-788.
- [ 20 ] 陈海刚 , 林钦 , 蔡文贵 , 等. 3 种常见海洋贝类对重金属 Hg、Pb 和 Cd 的积累与释放特征比较 [J]. 农业环境科学学报 , 2008 , **27**( 3) : 1163-1167.
- [ 21 ] 王晓丽 , 孙耀 , 张少娜 , 等. 牡蛎对重金属生物富集动力学特性研究 [J]. 生态学报 , 2004 , **24**( 5) : 1086-1090.
- [ 22 ] Palmer S J , Presley B J , Taylor R J , *et al.* Field studies using the oyster *Crassostrea virginica* to determine mercury accumulation and depuration rates [ J ]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology , 1993 , **51**( 3) : 464-470.
- [ 23 ] Cunningham P A , Tripp M R. Factors affecting the accumulation and removal of mercury from tissues of the American oyster *Crassostrea virginica* [J]. Marine Biology , 1975 , **31**( 4) : 311-319.
- [ 24 ] Kopfler F C. The accumulation of organic and inorganic mercury compounds by the eastern oyster ( *Crassostrea virginica* ) [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology , 1974 , **11**( 3) : 275-280.
- [ 25 ] Blackmore G , Wang W X. The transfer of cadmium , mercury , methylmercury , and zinc in an intertidal rocky shore food chain [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology , 2004 , **307**( 1) : 91-110.