

# 台湾海峡沿海沉积物中合成麝香分布 及其环境指示意义

刘 艺<sup>1,2</sup>, 徐 亮<sup>3</sup>, 胡琼璞<sup>1,4</sup>, 曾祥英<sup>1\*</sup>, 胡建芳<sup>1</sup>, 于志强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室/广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江西省环境保护科学研究院, 江西 南昌 330029; 4. 杭州谱育科技发展有限公司, 浙江 杭州 311305)

**摘 要:** 台湾海峡位于福建省和台湾岛之间, 是连接南海和东海的通道。本研究在台湾海峡采集了 32 个表层沉积物, 研究了沉积物中合成麝香(SMs)含量水平、化合物组成以及空间分布规律。沉积物中的合成麝香浓度( $\Sigma$ SMs)为 0.448~1.43 ng/g, 平均值为 0.876 ng/g, 在国内外沿海沉积物中处于较低水平; 主要组分为佳乐麝香(HHCB, 0.247~0.916 ng/g)和吐纳麝香(AHTN, 0.193~0.589 ng/g), 分别占 $\Sigma$ SMs 的 48.7%~69.3%和 30.7%~50.6%。台湾海峡中部临近台湾岛和大陆河流入海口区域 $\Sigma$ SMs 较高, 反映了河流输入对海岸沉积物的影响。同时, 在研究区域西北部 $\Sigma$ SMs 也较高, 揭示出在多重洋流共同作用下, 富含有机质的细颗粒可能被搬运并沉降于该区域, 导致污染物的累积。

**关键词:** 海岸带沉积物; 合成麝香; 台湾海峡

中图分类号: X142 文献标志码: A 文章编号: 0379-1726(2022)04-0417-07

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2022.04.004

## Occurrence and distribution of synthetic musks in coastal sediments from the Taiwan Strait and the potential environmental significance

LIU Yi<sup>1,2</sup>, XU Liang<sup>3</sup>, HU Qiongpu<sup>1,4</sup>, ZENG Xiangying<sup>1\*</sup>, HU Jianfang<sup>1</sup>, YU Zhiqiang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry / Guangdong Key Laboratory of Environment and Resources, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jiangxi Academy of Environmental Science, Nanchang 330029, Jiangxi, China; 4. Hangzhou PuYu Technology Development Co., Ltd, Hangzhou 311305, Zhejiang, China)

**Abstract:** The Taiwan Strait, located between Fujian Province and Taiwan Island, is a channel that connects the South and East China Seas. In this study, 32 surface sediment samples were collected in the western Taiwan Strait. Concentrations and spatial distributions of synthetic musks (SMs) in the sediment were investigated. The total SMs ( $\Sigma$ SMs) in the sediment ranged from 0.448 to 1.43 ng/g, with an average of 0.876 ng/g, which was relatively low compared to global coastal sediments. The 1,3,4,6,7,8-hexahydro-4,6,6,7,8,8-hexamethylcyclopenta-(g)2-benzopyrane (HHCB, 0.247 to 0.916 ng/g) and 7-acetyl-1,1,3,4,4,6-hexamethyl-tetraline (AHTN, 0.193 to 0.589 ng/g) were the main components. Higher sedimentary  $\Sigma$ SMs were detected in sediment adjacent to river mouths from the Mainland and Taiwan Island, indicating their terrestrial riverine inputs. Higher levels of  $\Sigma$ SMs were also found in sediment in the northwestern part of the study region, suggesting that the SMs adsorbed onto fine particles could be carried to this studied region, then deposited into coastal sediment under multiple ocean currents.

**Key words:** coastal sediments; synthetic musk; Taiwan Strait

收稿日期: 2020-10-12; 改回日期: 2020-11-13

项目资助: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC018-02)和 NSFC-广东省联合基金重点项目(U1701244)联合资助。

第一作者简介: 刘艺(1995-), 女, 硕士研究生, 环境科学专业。E-mail: 1503296357@qq.com

通信作者: 曾祥英(1969-), 女, 副研究员, 主要从事环境中毒害污染物监测与风险评估研究。E-mail: zengxy@gig.ac.cn

## 0 引言

合成麝香(synthetic musks, SMs)作为人工合成的香味物质,被广泛用于日化产品中,如香水、乳液、防晒霜、除臭剂和洗涤用品等(Kang et al., 2010)。依据结构不同,合成麝香可分为硝基麝香、多环麝香、大环麝香和脂环麝香。硝基麝香是最早人工合成以取代天然麝香的化合物,但因其较显著的毒性效应,如光敏性、神经毒性、致癌性以及雌激素活性等,已被禁止应用于化妆品(Sommer, 2004),但二甲苯麝香(1-tert-butyl-3,5-dimethyl-2,4,6-trinitrobenzene, MX)和酮麝香(4-tert-butyl-2,6-dimethyl-3,5-dinitroacetophenone, MK)在部分低端日化产品中仍占据一定的市场份额(Hu et al., 2011)。目前多环麝香取代硝基麝香成为主要香味物质,其中佳乐麝香(1,3,4,6,7,8-hexahydro-4,6,6,7,8,8-hexamethylcyclopenta-(g)2-benzopyrane, HHCB)和吐纳麝香(7-acetyl-1,1,3,4,4,6-hexamethyl-tetraline, AHTN)最为常用。总体来说,这四种化合物占据了全球合成麝香总生产量95%以上(Li et al., 2018)。使用后的合成麝香主要经由下水道或者城市污水处理系统直接或间接进入自然水体(Buerge et al., 2003)。由于具有较高的辛醇-水分配系数( $\log K_{ow}=5.40\sim 6.30$ ),合成麝香容易吸附在有机质含量高的颗粒物上(Berset et al., 2004),在水流传输过程中逐渐沉淀进入沉积物中,部分可随水流汇入海洋并主要沉降于河口海岸带。目前,关于陆地环境河流沉积物中合成麝香的研究非常广泛(Patel, 2017),但是针对海洋沉积物中合成麝香的研究却比较缺乏。

台湾海峡地处我国福建省和台湾岛之间,接纳闽江、九龙江、晋江、交溪和木兰溪以及台湾岛的淡水河、大肚溪、大甲溪和浊水溪等河流输入,这些河流每年向台湾海峡排放总计超过 $8.70\times 10^7$  t的沉积物,是台湾海峡营养成分和污染物的重要来源(Liao et al., 2018)。台湾海峡也是连接南海和东海的重要物质交换通道。在冬季,东亚季风驱动下浙闽沿岸流携带东海海水进入该区域;而在夏季,来自菲律宾和南海的黑潮分支和台湾暖流为最强潮流,携带来自菲律宾海域和南海的营养物质和污染物进入该海域(Liao et al., 2018; Ya et al., 2018; Zeng et al., 2020)。前期研究结果显示,该区域沉积物面临较为显著的有机磷酸酯阻燃剂或增塑剂(organo-phosphate esters, OPs)

污染,不同输入来源的 OPs 在台湾海峡沉积,包括来源于大陆与台湾岛的河流输入、台湾海峡船舶交通运输的本地污染释放以及东海和南海洋流携带的污染输入(Zeng et al., 2020)。合成麝香作为日化产品中重要的添加剂(Kang et al., 2010),也是地表水中检出频率较高的重要污染物(Buerge et al., 2003; Zeng et al., 2018)。大陆和台湾岛河流输入是否也会导致合成麝香在海峡沉积物中的污染累积,目前尚未见相关的研究报道。

因此,在本研究中我们选择3种硝基麝香和6种多环麝香为目标污染物,研究台湾海峡沉积物中合成麝香的含量组成及空间分布,并以HHCB和AHTN作为生活污水的指示物(Buerge et al., 2003),评估居民日常活动对台湾海峡的潜在影响,初步解析污染物在河口海岸带的迁移传输和沉降过程。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域和样品采集

本研究区域位于台湾海峡北部和西部地区(图1),长350 km,宽约180 km,平均水深为60 m。采样区域接纳多条河流的直接输入,如闽江、九龙江、晋江、交溪、木兰溪、淡水河、大甲溪、大肚溪和浊水溪等。2016年7月22~24日,在船上用不锈钢抓斗共采集了32个表层沉积物(0~5 cm)样品。所有样品均包装于铝箔袋中,然后密封于聚乙烯袋,保存于冰箱-20 °C条件中。研究区域详细介绍参见Liao et al. (2018)。

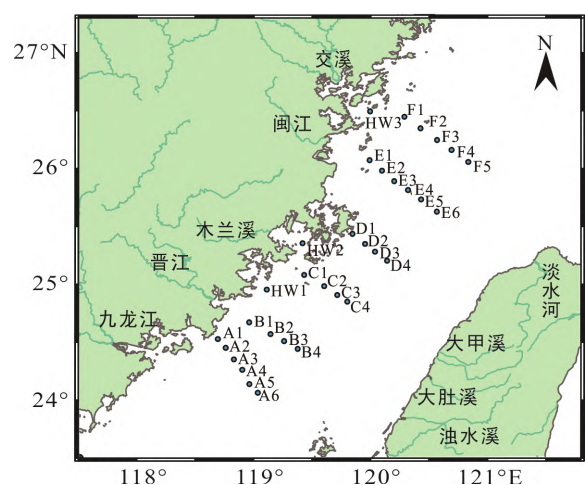


图1 台湾海峡沉积物采样点示意图  
Fig.1 Illustration of sampling locations in the Taiwan Strait

## 1.2 试剂与标准品

本研究目标化合物包括 6 种多环麝香和 3 种硝基麝香, 均购于 LGC Promochem GmbH (Mercatorstrasse, Wesel, Germany) 公司。其中, 多环麝香包括开许梅龙(1,2,3,5,6,7-hexahydro-1,1,2,3,3-pentamethyl-4H-inden-4-one, DPML, 90%)、萨利麝香(4-acetyl-1,1-dimethyl-6-tert-butylindan, ADBI, 98%)、特拉斯(5-acetyl-1,1,2,6-tetramethyl-3-isopropylindan, ATII, 90%)、粉檀麝香(6-acetyl-1,1,2,3,3,5-hexamethylindan, AHMI, 94.5%)、HHCB(75%)和 AHTN(98%); 硝基麝香包括 MX(98%)、MK(98.27%)和葵子麝香(1-(tert-butyl)-2-methoxy-4-methyl-3,5-dinitrobenzene, MA, 99%)。内标六甲基苯(hexamethylbenzene, HMB, 99.5%)购于德国 Ehrenstofer-Schäfer Bgm-Schlosser 实验室。

无水  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  购自广州化学试剂厂, 使用前在 450 °C 下灼烧 4 h 后保存于干燥器中。硅胶(70~230 目)和氧化铝(100~200 目)均购自 Merck Co. (Darmstadt, Germany) 公司, 分别在 120 °C 和 180 °C 条件下活化 12 h, 加入 3% 蒸馏水去活化, 加入正己烷保存备用。实验用丙酮、正己烷、二氯甲烷购于 Merck Co. (Darmstadt, Germany) 公司, 所有溶剂均为色谱纯。

## 1.3 目标化合物提取、净化与定性定量分析

目标化合物的提取、净化以及定性定量分析采用 Zeng et al. (2020) 建立的分析方法。这里简述如下: 沉积物样品冷冻干燥后研磨过 60 目筛, 置棕色玻璃瓶低温保存。称取 10 g 样品, 用经甲醇和二氯甲烷抽提干净的滤纸包好, 用二氯甲烷索氏抽提 72 h, 底瓶中加入适量活化后的铜片脱 S。提取液经旋转蒸发仪浓缩至 1 mL, 置换溶剂为正己烷。所得提取液经硅胶-氧化铝柱分离净化, 收集目标组分, 在柔和高纯  $\text{N}_2$  下浓缩至 0.2 mL, 加入内标物六甲基苯 20  $\mu\text{L}$  (250  $\mu\text{g/L}$ ), 待上机分析。同时, 采用 Vario EL III Elementar 元素分析仪测定沉积物总有机碳(TOC)含量。

目标化合物的定性定量分析通过岛津 2010 GC-MS 完成, 色谱柱为 DB-5MS(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu\text{m}$ , Thermo Scientific, Waltham, MA, USA), EI 源, 离子源温度 250 °C, 进样口和接口温度分别为 280 °C 和 290 °C。不分流模式进样, 进样量 1  $\mu\text{L}$ 。载气为 He, 流速 1 mL/min。定量分析采用选择离子扫描(SIM)方式, 升温程序为: 初始温度 60 °C(保留 3 min), 先以 10 °C/min 的速率升至 160 °C, 然后

以 2 °C/min 的速率升至 200 °C, 最后以 5 °C/min 的速率升至 295 °C, 保留 15 min。

实验过程采取严格的质量保证和质量控制措施。严禁使用含香型洗手液, 实验人员全程佩戴丁腈手套。所有玻璃器材经碱液浸泡 24 h 超声清洗 1 h, 依次用自来水和去离子水冲洗, 烘干后于马弗炉内 450 °C 灼烧 4 h。使用前再连续用甲醇、丙酮和正己烷分别荡洗 3 次。每批样品分析中包括方法空白( $n=5$ )、空白加标( $n=3$ )、基质加标( $n=3$ )、随机挑选的重复样实验( $n=4$ )。空白加标中, 目标化合物的回收率范围为(92.5 $\pm$ 4.94)%~(108 $\pm$ 5.22)%。基质加标中, 目标化合物回收率为(98.1 $\pm$ 5.67)%~(113 $\pm$ 2.76)%。配制浓度水平接近空白值的标准品, 连续进样 7 针, 以 3 倍标准偏差定义为仪器检测限(limit of detection, LOD), 以 2 倍 LOD 定义为方法检测限。本研究目标化合物 LODs 为 0.413~1.65 pg, 以 10 g 沉积物计算方法检测限为 8.26~33.0 pg/g。空白样中检出的 HHCB 和 AHTN 均低于 LOD。

## 2 结果与讨论

### 2.1 台湾海峡沉积物中 SMs 的分布

本研究所有样品中均未检出两种硝基麝香(MX 和 MA)和两种多环麝香(ATII 和 DPML)。大部分样品中检出痕量 MK(<LOD), 部分样品中检出 ADBI 和 AHMI(<LOD), 极少数临近河口的样品中(如 C4、D4 和 E1)检出可定量的 ADBI(0.0152 ng/g)。所有样品中检出 HHCB(0.247~0.916 ng/g, 平均值 0.541 ng/g)和 AHTN(0.194~0.589 ng/g, 平均值 0.334 ng/g)(表 1)。总体来说, 沉积物样品中 SMs 总浓度范围为 0.450~1.43 ng/g, 高值点位于研究区域西北部(F2 和 F3)。

表 1 台湾海峡沉积物中合成麝香含量与分布  
Table 1 Concentration and distribution of SMs in sediments of the Taiwan Strait

化合物	最小值 (ng/g)	最大值 (ng/g)	均值 (ng/g)	检出频率 (%)
ADBI	LOD	0.0152	—	9.37
AHMI	ND	LOD	—	3.13
HHCB	0.247	0.916	0.541	100
AHTN	0.194	0.589	0.334	100
MK	ND	LOD	—	90.5

注: ND. 未检出; LOD. 仪器检测限; “—”表示未计算。

本研究沉积物中主要合成麝香污染物为 HHCB 和 AHTN, 而 ADBI、AHMI 和 MK 在部分样品中检出。前期相关研究发现珠三角沉积物以及室内灰尘中主要合成麝香污染物同样为 HHCB 和 AHTN (Zeng et al., 2018; 胡琼璞等, 2020)。目前, 我国香精香料行业中主要添加使用的合成麝香为 HHCB 和 AHTN, 环境介质中合成麝香的组成特征直观反映了我国目前香精香料行业中合成麝香的使用模式。

水体中的合成麝香主要来源于生活污水, 因此 SMs 常被用作指示生活污水对水体的影响(Buerge et al., 2003)。本研究区域沉积物中合成麝香的广泛分布揭示出居民日常生活对河口海岸带的显著影响。

在过去的几十年中, 针对水体环境中合成麝香的研究主要集中于污水以及河流中合成麝香分布、迁移转化(Hu et al., 2011; Homem et al., 2015; Zeng et al., 2018), 而针对海洋环境中合成麝香分布的研究相对较少。表 2 列出近几年国内外沿海地区沉积物合成麝香的研究结果。从表中可以看出, 河口海岸带沉积物中检出的主要合成麝香均为 HHCB 和 AHTN, 而 ADBI(LOD~2.49 ng/g)和 AHMI(LOD)含量接近或者低于 LOD。这与当今香精香料行业合成麝香的生产和使用模式一致, 体现了海岸带地区合成麝香的生产、使用以及污染释放对海岸带沉积物的影响。本研究台湾海峡沉积物中 SMs 含量水平与国内外沿海地区相比, 总体处于较低水平, 与韩国沿海地区(HHCB: ND~2.70 ng/g; AHTN: ND~1.00 ng/g; Lee et al., 2014)、胶州湾(HHCB: 1.84~4.35 ng/g; AHTN: ND~10.9 ng/g; 王杰等, 2015)、

美国旧金山海湾(HHCB: ND~27.0±2.00 ng/g; AHTN: ND~3.10±0.100 ng/g; Homem et al., 2017)沉积物中含量大致相当。而人口密集、工业发达地区如珠江入海口渔港(HHCB: 39.1~273 ng/g; AHTN: 21.8~125 ng/g; Huang et al., 2016)、澳门沿海地区(HHCB: 3.67~44.5 ng/g; AHTN: 3.56~17.3 ng/g; Zeng et al., 2008)、美国新贝德福德港(HHCB和AHTN均值分别为22.9和12.2 ng/g; Subedi et al., 2014)等河口沉积物中, SMs 含量明显高于本研究。特别值得注意的是, 在珠江入海口(0.35~2.42 ng/g; Huang et al., 2016)和珠江入海口渔港(1.16~9.06 ng/g; Huang et al., 2016)以及胶州湾(6.90~10.9 ng/g; 王杰等, 2015)沉积物中, 硝基麝香 MK 含量水平要高于本研究(ND~LOD)。

## 2.2 台湾海峡沉积物中合成麝香空间分布特征

由于 ADBI、AHMI 和 MK 浓度水平低, 本研究只针对两种主要合成麝香组分(HHCB 和 AHTN)开展深入讨论。AHTN 和 HHCB 空间分布特征并不完全相同(图 2)。临近大陆的采样点 E1(0.589 ng/g)、A1(0.395 ng/g)及 A2(0.410 ng/g)、澎湖列岛附近 A4(0.464 ng/g)和临近台湾岛的 E6(0.415 ng/g)沉积物样品中 AHTN 含量较高, 反映了大陆和台湾岛河流输入的影响。HHCB 高值点位于 A4(0.901 ng/g)、A3(0.743 ng/g)和 B4(0.792 ng/g), 体现了台湾岛径流输入对台湾海峡沉积物中 HHCB 分布的影响。

台湾海峡西北部(F1~F3)断面沉积物中 HHCB 和 AHTN 含量均较高, 但是该区域并没有河流入海口, 这说明该区域沉积物中 SMs 并非源于河流的直接输入。由于 HHCB 和 AHTN 疏水性较强(log  $K_{ow}$ =5.8~5.9),

表 2 国内外河口海岸带沉积物中合成麝香 SMs 含量与分布(ng/g)  
Table 2 Global concentration and distribution of SMs in coastal sediment (ng/g)

采样点	n	化合物						数据来源
		ADBI	AHMI	ATII	HHCB	AHTN	MK	
胶州湾	7	—	—	—	1.84~4.35	ND~10.9	6.90~10.9	王杰等, 2015
澳门沿海地区	3	2.49~2.90	LOD	LOD	3.67~44.5	3.56~17.3	—	Zeng et al., 2008
珠江入海口	16	LOD	LOD	—	4.55~27.1	1.89~13.6	0.35~2.42	Huang et al., 2016
珠江入海口渔港	6	0.480~4.11	0.20~2.87	—	39.1~273	21.8~125	1.16~9.06	Huang et al., 2016
韩国沿海	25	—	—	—	ND~2.70	ND~1.00	—	Lee et al., 2014
印度尼西亚雅加达海湾	16	—	—	—	ND~43800	ND~3500	—	Dsikowitzky et al., 2019
美国新贝德福德港	10	—	—	—	22.9	12.2	—	Subedi et al., 2014
澳大利亚泰玛谷海口	11	—	—	—	11~17	2~10	—	Sumner et al., 2010
美国旧金山海湾	14	ND~0.05±0.01	ND~0.09±0.01	—	ND~27±2	ND~3.1±0.1	ND~0.7±0.09	Homem et al., 2015
台湾海峡	32	LOD~0.0152	ND~LOD	ND	0.250~0.960	0.193~0.464	ND~LOD	本研究

注: ND. 未检出; LOD. 仪器检测限; n. 样本数量; “—”表示未报道。

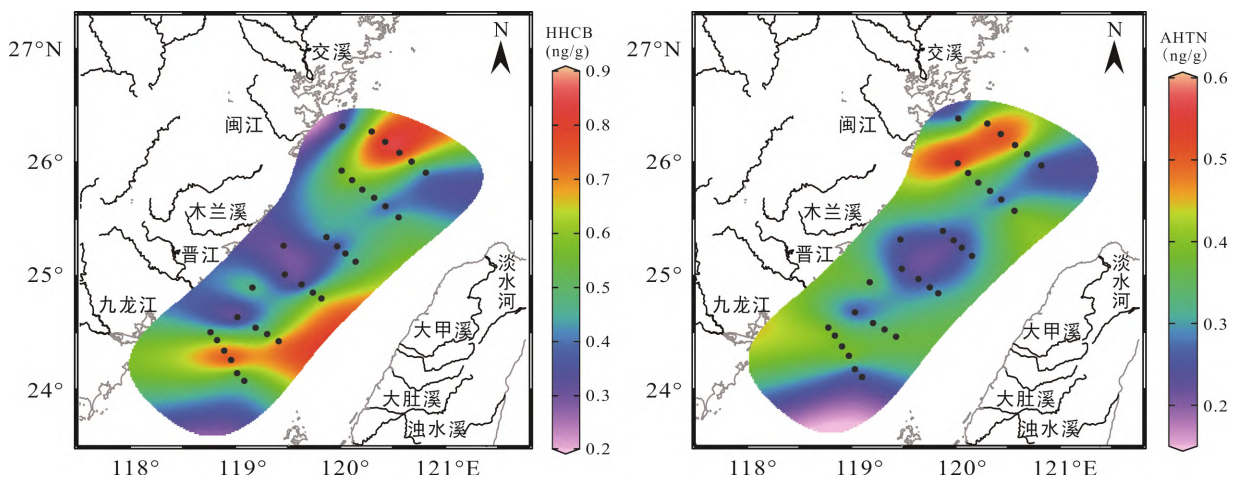


图2 台湾海峡沉积物中 HHCB 和 AHTN 的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of HHCB and AHTN in sediments from the Taiwan Strait

一般来说它们在河流传输以及水-颗粒物-沉积物间的分配主要受控于颗粒物和沉积物中的 TOC (Dsikowitzky et al., 2002; Huang et al., 2016)。但是, 与河流中分布特征明显不同的是, 本研究区域沉积物中 HHCB( $n=32$ ,  $r=-0.116$ ,  $p>0.5$ )和 AHTN( $n=32$ ,  $r=0.226$ ,  $p>0.1$ )含量水平与沉积物 TOC 没有明显相关性。这可能是由于本研究区域沉积物起源于不同来源的颗粒物输入。台湾海峡除了接收大陆和台湾岛的河流输入外, 还受多种洋流综合影响。由长江、钱塘江径流入海后形成的浙闽沿岸潮, 冬季受东北季风驱使南下, 途中接纳闽江等径流输入, 该水系影响可至平潭岛乃至泉州附近(王翠等, 2018), 携带的颗粒物、营养组分等多沉降于台湾海峡; 夏季受台湾暖流的顶托和偏南季风的影响, 黑潮分支和台湾暖流携带外海水途经台湾海峡北上, 在台湾海峡发生强烈混合(Liao et al., 2018; 王建丰等, 2020)。Liao et al. (2018)已经研究证实, 富含有机质的细颗粒物主要沉降在台湾海峡西北部。因此, 我们可以推断, 浙闽沿岸潮携带来自于长江(Zhang et al., 2008; Wang et al., 2018)、闽江(刘静, 2016)等径流颗粒物携带不同含量水平的合成麝香, 而黑潮分支和台湾暖流携带珠江口和南海(Zeng et al., 2008; Huang et al., 2016)的合成麝香进入台湾海峡后, 在复杂水动力条件作用下, 不同来源的颗粒物沉降于该区域北部, 导致沉积物中 HHCB 和 AHTN 富集和累积。

### 2.3 HHCB/AHTN 比值及指示意义

由于不同国家地区在香味物质使用模式上有差异, HHCB/AHTN 比值可以初步指示不同国家地区

使用合成麝香的模式(Zeng et al., 2018)。在本研究中, 沉积物 HHCB/AHTN 比值为 0.962~2.26, 与我国海河(0.600~3.60; Hu et al., 2011)、浑河(0.189~2.05; Zeng et al., 2018)、珠江三角洲(0.0200~1.25; Huang et al., 2016; Zeng et al., 2018)大致相当; 但与新加坡等国显著不同(Wang and Kelly, 2017)。有研究表明, 在微生物作用下, HHCB 较易发生降解转化, 且 AHTN 更容易吸附在颗粒相上(Zeng et al., 2008; Song et al., 2015)。因此, 在河流输运过程中, 沉积物中 HHCB/AHTN 比值会逐渐减小(Zeng et al., 2008, 2018; Huang et al., 2016)。但是, 在本研究区域, 随着离岸距离增加, 研究区域沉积物中 HHCB/AHTN 比值却呈上升趋势(图 3)。Liao et al. (2018)发现, 沉积物中细颗粒物主要分布在研究区域西北部, 此外, 随着离岸距离增加粗颗粒物的分布逐渐增加。这与本研究中 HHCB/AHTN 比值空间分布特征相似。研究结果揭示出不同来源的

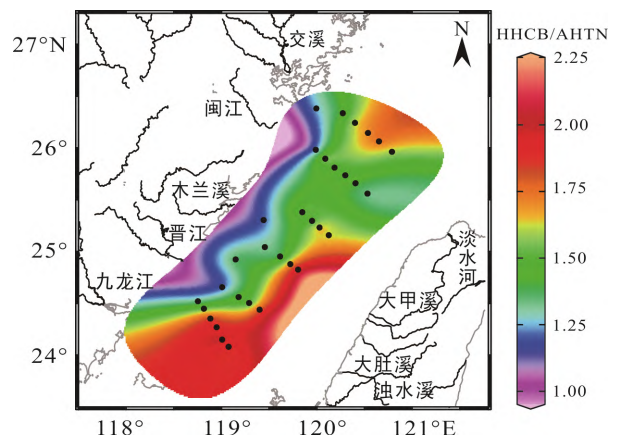


图3 台湾海峡沉积物中 HHCB/AHTN 比值空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of HHCB/AHTN ratio in sediments from the Taiwan Strait

颗粒物及其吸附的有机污染物在多种洋流作用下,在台湾海峡河口海岸带间的迁移、传输和归趋。

#### 2.4 研究区域沉积物中合成麝香的埋藏与潜在风险

为了评估台湾海峡沉积物中合成麝香污染状况,基于检测数据我们计算了 HHCB 和 AHTN 的质量负荷(Zeng et al., 2020)。研究面积约为  $1.90 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,根据采样点将此区域分为 32 个部分,每个部分由一个沉积物样品浓度表示,总理藏量( $I$ )通过以下公式计算:

$$I = \sum kC_i A_i d \rho$$

式中,  $C_i$  是第  $i$  个采样点中 HHCB 和 AHTN 的浓度 (ng/g),  $A_i$  是第  $i$  个采样点分摊面积 ( $\text{cm}^2$ ),  $k$  为换算系数,取值为 1,  $d$  是采样的沉积物厚度 (cm),在本研究中为 5 cm,  $\rho$  表示干沉积物的密度,以  $1.20 \text{ g/cm}^3$  计算(Zeng et al., 2020)。根据测得的 SMs 浓度,研究区域表层沉积物中富集 HHCB 和 AHTN 的质量分别为 6.15 t 和 3.76 t。

当水体环境中的 SMs 超过水体自我净化能力后,会导致水体生态平衡的破坏。据报道,在沉积物中 HHCB 与 AHTN 的预测无效应浓度(predicted no-effect concentration, PNEC)分别为  $8.40 \times 10^3 \text{ } \mu\text{g/kg}$  和  $5.20 \times 10^3 \text{ } \mu\text{g/kg}$ (干重)(Balk and Ford, 1999),研究区域沉积物中的 HHCB 与 AHTN 的浓度远小于该值,生态风险轻微。但考虑到该区域沉积物中多种污染物赋存现状(Zeng et al., 2020),且 HHCB 和 AHTN 能协同促进底栖生物摄入和富集其他污染物(Schnell et al., 2009),台湾海峡沉积物中多种污染物协同作用下底栖生物潜在生态风险值得关注。

### 3 结 论

(1) 台湾海峡沉积物中普遍存在合成麝香,揭示出两岸居民日常生活对海岸带水体沉积物的影响。本研究中  $\sum \text{SMs}$  范围为 0.448~1.43 ng/g,在国内外处于较低水平。

(2) 从空间分布上看,研究区域中部临近台湾岛、大陆河流入海口等断面发现了较高水平的合成麝香,研究结果直观揭示出大陆和台湾岛的河流输入对台湾海峡沉积物中合成麝香分布的贡献。此外,在多种洋流共同作用下,水体中细颗粒物被搬运至台湾海峡西北部并沉降于此,吸附于颗粒物的合成麝香也随之沉降并累积在沉积物中,这可能是该区域并无河流输入,但沉积物中具有较高浓度水平合成麝香的重要原因。

(3) 沉积物中 HHCB/AHTN 比值变化也体现出水体中合成麝香在研究区域中的迁移和搬运。经过初步估算,该区域沉积物中富集了 6.15 t HHCB 和 3.76 t AHTN,这些化合物对底栖生物的潜在风险以及对上覆水体的潜在影响需要继续关注。

致谢:感谢中国科学院广州地球化学研究所彭先芝研究员和另一位匿名审稿专家提出的建设性意见和建议。

#### 参考文献(References):

- 胡琼璞,徐亮,刘艺,曾祥英,于志强. 2020. 广州市不同微环境室内灰尘中合成麝香分布及健康风险初步评价. *环境化学*, 39(12): 3299-3305.
- 刘静. 2016. 不同特性水环境沉积物中有机磷酸酯与合成麝香分布初步研究. 广州:中国科学院广州地球化学研究所硕士学位论文: 113-116.
- 王翠,郭晓峰,方婧,李青生. 2018. 闽浙沿岸流扩展范围的季节特征及其对典型海湾的影响. *应用海洋学学报*, 37(1): 1-8.
- 王建丰,司广成,于非. 2020. 台湾暖流变化特征及机制研究进展. *海洋科学*, 44(5): 141-148.
- 王杰,楼迎华,王玲,赵燕燕,石磊,郑明刚. 2015. 胶州湾北岸潮间带沉积物中人工合成麝香的污染特征. *环境化学*, 34(2): 384-385.
- Balk F, Ford R A. 1999. Environmental risk assessment for the polycyclic musks, AHTN and HHCB: II. Effect assessment and risk characterisation. *Toxicology Letters*, 111(1-2): 81-94.
- Berset J D, Kupper T, Etter R, Tarradellas J. 2004. Considerations about the enantio selective transformation of polycyclic musks in wastewater, treated wastewater and sewage sludge and analysis of their fate in a sequencing batch reactor plant. *Chemosphere*, 57(8): 987-996.
- Buerge I J, Buser H R, Muller M D, Poiger T. 2003. Behavior of the polycyclic musks HHCB and AHTN in lakes, two potential anthropogenic markers for domestic wastewater in surface waters. *Environmental Science & Technology*, 37(24): 5636-5644.
- Dsikowitzky L, Crawford S E, Nordhaus I, Lindner F, Dwiytino, Irianto H E, Ariyani F, Schwarzbauer J. 2019. Analysis and environmental risk assessment of priority and emerging organic pollutants in sediments from the tropical coastal megacity Jakarta, Indonesia. *Regional Studies in Marine Science*, 34, 101021.
- Dsikowitzky L, Schwarzbauer J, Littke R. 2002. Distribution of polycyclic musks in water and particulate matter of the Lippe River (Germany). *Organic Geochemistry*, 33(12): 1747-1758.

- Homem V, Magalhaes I, Alves A, Santos L. 2017. Assessing seasonal variation of synthetic musks in beach sands from Oporto coastal area: A case study. *Environmental Pollution*, 226: 190–197.
- Homem V, Silva J A, Ratola N, Santos L, Alves A. 2015. Long lasting perfume — A review of synthetic musks in WWTPs. *Journal of Environmental Management*, 149: 168–192.
- Hu Z J, Shi Y L, Cai Y Q. 2011. Concentrations, distribution, and bioaccumulation of synthetic musks in the Haihe River of China. *Chemosphere*, 84(11): 1630–1635.
- Huang W X, Xie Z Y, Yan W, Mi W Y, Xu W H. 2016. Occurrence and distribution of synthetic musks and organic UV filters from riverine and coastal sediments in the Pearl River estuary of China. *Marine Pollution Bulletin*, 111(1–2): 153–159.
- Kang C S, Lee J H, Kim S K, Lee K T, Lee J S, Park P S, Yun S H, Kannan K, Yoo Y W, Ha J Y, Lee S W. 2010. Polybrominated diphenyl ethers and synthetic musks in umbilical cord Serum, maternal serum, and breast milk from Seoul, South Korea. *Chemosphere*, 80(2): 116–122.
- Lee I S, Kim U J, Oh J E, Choi M, Hwang D W. 2014. Comprehensive monitoring of synthetic musk compounds from freshwater to coastal environments in Korea: With consideration of ecological concerns and bioaccumulation. *Science of the Total Environment*, 470: 1502–1508.
- Li X X, Chu Z H, Yang J W, Li M, Du M J, Zhao X H, Zhu Z W, Li Y. 2018. Synthetic musks: A class of commercial fragrance additives in personal care products (PCPs) causing concern as emerging contaminants. *Emerging Pollutants and Their Effects on Marine Ecosystems*, 81: 213–280.
- Liao W S, Hu J F, Peng P A. 2018. Burial of organic carbon in the Taiwan Strait. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(9): 6639–6652.
- Patel S. 2017. Fragrance compounds: The wolves in sheep's clothings. *Medical Hypotheses*, 102: 106–111.
- Schnell S, Bols N C, Barata C, Porte C. 2009. Single and combined toxicity of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) on the rainbow trout liver cell line RTL-W1. *Aquatic Toxicology*, 93(4): 244–252.
- Sommer C. 2004. The role of musk and musk compounds in the fragrance industry // Rimkus G G. Series Anthropogenic Compounds. The Handbook of Environmental Chemistry, vol 3X. Heidelberg, Berlin: Springer: 1–16.
- Song H, Zeng X Y, Yu Z Q, Zhang D L, Cao S X, Shao W L, Sheng G Y, Fu J M. 2015. Enantiomeric composition of polycyclic musks in sediments from the Pearl River and Suzhou Creek. *Environmental Science and Pollution Research*, 22: 1679–1686.
- Subedi B, Yun S, Jayaraman S, Bergen B J, Kannan K. 2014. Retrospective monitoring of persistent organic pollutants, including PCBs, PBDEs, and polycyclic musks in blue mussels (*Mytilus edulis*) and sediments from New Bedford Harbor, Massachusetts, USA: 1991–2005. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(8): 5273–5284.
- Sumner N R, Guitart C, Fuentes G, Readman J W. 2010. Inputs and distributions of synthetic musk fragrances in an estuarine and coastal environment: A case study. *Environmental Pollution*, 158(1): 215–222.
- Wang Q, Kelly B C. 2017. Occurrence and distribution of synthetic musks, triclosan and methyl triclosan in a tropical urban catchment: Influence of land-use proximity, rainfall and physicochemical properties. *Science of the Total Environment*, 574: 1439–1447.
- Wang X T, Hu B P, Cheng H X, Jia H H, Zhou Y. 2018. Spatial variations, source apportionment and potential ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons and synthetic musks in river sediments in Shanghai, China. *Chemosphere*, 193: 108–117.
- Ya M L, Xu L, Wu Y L, Li Y Y, Zhao S H, Wang X H. 2018. Fossil fuel-derived polycyclic aromatic hydrocarbons in the Taiwan Strait, China, and fluxes across the air-water interface. *Environmental Science & Technology*, 52(13): 7307–7316.
- Zeng X Y, Hu Q P, He L X, Liu Z Y, Gao S T, Yu Z Q. 2018. Occurrence, distribution and ecological risks of organophosphate esters and synthetic musks in sediments from the Hun River. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 160: 178–183.
- Zeng X Y, Mai B X, Sheng G Y, Luo X J, Shao W L, An T C, Fu J F. 2008. Distribution of polycyclic musks in surface sediments from the Pearl River Delta and Macao coastal region, South China. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(1): 18–23.
- Zeng X Y, Xu L, Hu Q P, Liu Y, Hu J F, Liao W S, Yu Z Q. 2020. Occurrence and distribution of organophosphorus flame retardants/plasticizers in coastal sediments from the Taiwan Strait in China. *Marine Pollution Bulletin*, 151, 110843.
- Zeng X Y, Xu L, Liu J, Wu Y, Yu Z Q. 2018. Occurrence and distribution of organophosphorus flame retardants/plasticizers and synthetic musks in sediments from source water in the Pearl River Delta, China. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 37(4): 975–982.
- Zhang X L, Yao Y, Zeng X Y, Qian G R, Guo Y, Wu M H, Sheng G Y, Fu J M. 2008. Synthetic musks in the aquatic environment and personal care products in Shanghai, China. *Chemosphere*, 72(10): 1553–1558.