

卵形鲳鲹网箱养殖过程主要生长阶段DDTs 残留特征及其来源分析

程波¹, 柯常亮², 李乐¹, 李刘冬²,
郑重¹, 邹婉虹¹, 刘巧荣^{1*}

(1. 中国水产科学研究院质量与标准研究中心, 北京 100141;

2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东广州 510300)

摘要: 为了解卵形鲳鲹养殖过程主要生长阶段DDTs残留特征及其来源途径, 针对卵形鲳鲹实际网箱养殖生产条件, 在放苗、养殖生产中期和收获3个主要时期, 分别采集网箱中养殖水体、养殖鱼体、所用饲料和网箱处海底表层沉积物底泥样品, 采用气相色谱法测定样品中DDTs及其同系物含量。结果显示, 苗种、成鱼、所用饲料及养殖水体和养殖环境表层沉积物底泥中, 均检测出DDTs, 其中苗种、养殖成鱼、所用饲料、养殖海水和表层沉积物底泥中DDTs平均含量分别为(3.15±0.42)、(4.49±0.39)、(3.95±0.33) μg/kg干重、(3.76±0.43) ng/L和(4.34±1.18) μg/kg干重。随着养殖过程的进行, 鱼体中DDTs含量逐渐增加, 收获上市时期鱼体肌肉中含量显著高于苗种时期的含量, 但远低于0.5 mg/kg湿重的国家食品安全限量标准。从DDTs同系物种类上看, 养殖海水、饲料和鱼体中o,p'-DDT、p,p'-DDD、p,p'-DDT和p,p'-DDE 4种同系物均能检出, 但沉积物中仅检测出前3种同系物。4类样品DDTs主要成分均为o,p'-DDT和p,p'-DDT, 其在鱼体中所占比例平均值分别为42.09%和37.07%; 在饲料中所占比例平均值分别为44.85%和34.62%; 在养殖海水中所占比例平均值分别为40.91%和37.99%; 在养殖环境沉积物底泥中所占比例平均值分别为33.03%和51.34%。从鱼体、饲料、养殖海水和沉积物底泥中DDTs同系物组成比例和含量特征判断, 饲料是鱼体后续生长中富集DDTs的主要来源途径之一。为保障卵形鲳鲹质量安全, 应着重加强饲料中有毒有害物质的控制和管理。

关键词: 卵形鲳鲹; 网箱养殖; DDTs; 残留特征; 污染源

中图分类号: S 965.331; X 592

文献标志码: A

持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)是指在环境中难降解、高脂溶性、可以在食物链中富集放大、能够通过各种传输途径而进行全球迁移的一类半挥发性且毒性极大的污染物^[1]。目前, 各种环境介质、生物体及人体中存在的持久性有机污染物已引起全球关注^[1-3]。其中有机氯农药滴滴涕(DDTs)是《斯德哥尔摩公约》中优先控制的12类持久性有机污染物之一。

中国曾是世界上DDTs生产和消费大国, 尽管早在1983年中国就禁止其在农业上的使用, 但由于DDTs的持久性和难降解性, 至今在环境中仍被普遍检出^[4-8]。人体暴露于持久性卤代烃主要通过食物摄入, 尤其是鱼类食物, 有研究表明鱼类食物的消费量与持久性有机物在人体内的浓度成正相关^[9-10]。鉴于此, 世界各国和地区对食用鱼类中DDTs等有机氯农药的浓度水平做了大

收稿日期: 2016-09-08 修回日期: 2016-12-12

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2014005; 2016C009); 农业部财政专项-水产品质量安全监管无公害农产品(渔业产品)认证专项(2060302); 水产品未知危害因子识别与已知危害因子安全性评估专项(GJFP2016009)

通信作者: 刘巧荣, E-mail: lqrong@gmail.com

量研究^[11-14]。孟祥周^[14]对我国南方罗非鱼(*Oreochromis* sp.)、美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)、卵形鲳鲆(*Trachinotus ovatus*)等典型鱼类样品进行了14种卤代烃的检测分析,结果表明,上述鱼类中主要污染物为六六六(HCHs)、DDTs、多氯联苯(PCBs)和多溴联苯醚(PBDEs),且鱼类中PCBs和PBDEs虽然居于全球低端,但部分水体和卵形鲳鲆等鱼类中DDTs污染严重,其风险评估结果还表明,所监测鱼类中卵形鲳鲆致癌风险最大,建议每月食用不超过1次。通过研究POPs同系物种类和分布特征是一种常用确定鱼体中危害物来源的手段和方法^[15-16]。

卵形鲳鲆,俗称金鲳,黄腊鲳,因其生长速率快、肉质细嫩、味道鲜美,备受广大消费者喜爱,是中国重要的海水养殖鱼类品种。据保守估计,2016年中国大陆卵形鲳鲆养殖产量可达21.25万t^[17]。基于上述现实情况,本实验针对卵形鲳鲆实际养殖生产条件,开展针对该品种养殖过程主要生长阶段DDTs残留特征及其来源的分析,以期了解该品种养殖过程中DDTs的污染特征,获得DDTs的来源途径,为养殖过程中进行污染物的控制提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 实验设计与对象

卵形鲳鲆主要在我国广东、广西、海南和福建省养殖,养殖模式以网箱养殖为主。本实验选择广东某大型养殖集团湛江卵形鲳鲆深水网箱养殖场,以其中一口实际养殖生产的深水网箱为对象进行研究。网箱直径为13 m,深5 m(图1)。2014年4月20号投放卵形鲳鲆苗,投放密度为60尾/m³,放养规格6~8 g/尾,投喂饲料为该集团生产的配合饲料。针对这口实际养殖生产的深水网箱,在养殖初始、中期和收获时,对鱼体、饲料、水体和网箱处海底沉积物表层底泥进行采集和分析。

1.2 样品采集

样品采集主要在投放苗种后1周、养殖前期(3个月)、收获(7个月)3个时期进行,分别采集卵形鲳鲆、对应养殖时期所用配合饲料和网箱所在位置水体、海底表层沉积物底泥4类样品,样品的采集和制备方法参照《海洋监测规范样品的采集与贮运》(GB17378.2-2007)^[18],其中苗种

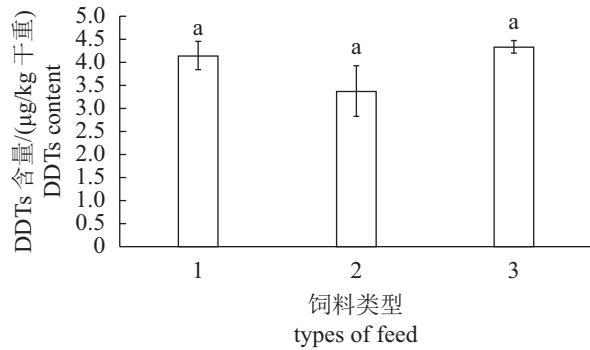


图1 卵形鲳鲆不同生长阶段所用饲料中DDTs含量

1. 苗种饲料; 2. 半成鱼饲料; 3. 成鱼饲料。柱状图数值以平均值±标准差表示; 柱状图上方相同字母表示差异不显著($P>0.05$), 不同字母表示差异显著($P<0.05$), 下同

Fig. 1 The concentration of DDTs in different stages of fish feeds

1. seed feed; 2. small fish feed; 3. adult fish feed. The data of histogram are presented as means ± SD; values on the bar sharing same superscript letters means no significantly different ($P>0.05$), different superscript letters means significantly different ($P<0.05$), the same below

采集30尾,养殖前期和收获上市时,各采集卵形鲳鲆10尾(表1);随机选取每袋20 kg的饲料一袋,从中采集1 kg颗粒饲料,保存在聚乙烯封口袋中,做好标记;沉积物底泥用抓斗式采泥器采集底部表层样品500 g左右,保存于聚乙烯封口袋中,做好标记;水样用采水器采集2 m深处海水样品2 L,装入玻璃瓶中,加入1 mL浓硫酸。样品采集后装入冷藏箱立即运回实验室,其中鱼类样品用纯净水冲洗干净,锡箔纸包好贴上标签,会同饲料样品和沉积物样品于-20 °C保存。

表1 卵形鲳鲆不同生长阶段采样规格

Tab. 1 The length and body weight of *T. ovatus* at the sample stages

不同生长阶段 different culture stages	数量/尾 number	平均体质量/g average weight	平均体长/cm average length
投放苗种 at the beginning of seeding	30	7.9±2.50	5.55±1.26
养殖中期 at the medium of culture	10	103.5±10.50	13.90±1.34
收获上市时期 at the harvest time	10	623.0±35.50	24.99±1.76

1.3 仪器与试剂

气相色谱(Agilent 6890N型),微电子捕获检测器,采用⁶³Ni放射源;色谱柱为HP-5型毛细管色谱柱(30 m×0.32 mm, 0.25 µm);均质机(德国IKAT15);超声清洗机(江苏昆山舒美KQ250E);

旋转蒸发仪(瑞典BUCHI R-215); 涡旋混合器(英国Stuart SA8); 离心机(上海Anke DL-6000B); 氮吹仪(美国OA-SYS N-EVAP-111); 电子天平(± 0.01 g, 常州万通WT5200); 马弗炉(yamato, FO510C)。

正己烷和二氯甲烷(色谱纯, Sigma-Aldrich), 以1:1的比例配成混合溶液; 浓硫酸(分析纯, 德国Merck); 中性氧化铝(分析纯, 广州化学试剂厂, 450 °C灼烧4 h); 弗罗里硅土(分析纯, 广州化学试剂厂, 450 °C灼烧4 h)。

DDTs标准物质: p,p' -滴滴滴(p,p' -DDD)、 p,p' -滴滴伊(p,p' -DDE)、 o,p' -滴滴涕(o,p' -DDT)和 p,p' -滴滴涕(p,p' -DDT)纯品均购自美国Accustandard公司。

1.4 样品分析

鱼类样品制备参照《海洋监测规范生物体分析》(GB17378.6-2007)^[19]: 鱼样经自然解冻后, 使用蒸馏水漂洗, 置于清洁的工作台上, 用不锈钢刀具从脊背处取肌肉组织, 多个体样品合并匀浆。样品分析时准确称取10.0 g匀浆组织于50 mL塑料离心管中, 依次加入25 mL 1:1正己烷/二氯甲烷混合溶液, 漩涡混合1 min, 超声提取20 min, 5000 r/min离心5 min, 取上清液于100 mL鸡心瓶中。重复提取1次, 合并提取液, 于40 °C旋转蒸发至干。2 mL正己烷清洗鸡心瓶, 重复2次, 将清洗液置于15 mL玻璃试管中。加入1 mL浓硫酸漩涡混合, 5000 r/min离心5 min, 吸除下层浓硫酸, 重复1次。上清液过混合固相萃取小柱, 10 mL混合溶液洗脱。将洗脱液氮气吹干, 1.00 mL正己烷定容, 气相色谱分析。

沉积物样品制备参照《海洋监测规范沉积物分析》(GB17378.5-2007)^[20]: 样品经避光自然风干后, 用玛瑙研钵粉碎研磨过80目筛; 饲料样品直接研磨过筛。取5 g样品, 其样品提取及样品净化过程与生物样品基本一致, 但经浓硫酸处理后, 上清液加入活化铜粉1.0 g, 漩涡混合1 min, 静置1 min, 过混合固相萃取小柱, 10 mL混合溶液洗脱。将洗脱液氮气吹干, 1.00 mL正己烷定容, 气相色谱分析。

海水中DDTs含量的测定参照《海洋监测规范海水分析》(GB 17378.4-2007)^[21]。移取500 mL 0.45 μ m玻璃纤维滤膜(450 °C高温灼烧4 h)过滤的水样置于分液漏斗中, 加入20 mL正己烷振荡萃取目标物, 静置分层, 收集上层液体。重复提

取1次。合并提取液, 过无水硫酸钠玻璃层析柱, 再用10 mL正己烷淋洗玻璃层析柱。将提取液和淋洗液收集于鸡心瓶中, 再浓缩至近干, 用正己烷溶解, 并定容至1 mL, 经净化后上机测定。

气相色谱分析升温程序: 初始柱温为120 °C, 以10 °C/min的速率升温到160 °C, 再以5 °C/min的速率升温到250 °C, 保持2 min, 最后以10 °C/min的速率升温到300 °C并保留1 min。进样口和检测器的温度分别为250和280 °C。

1.5 质量控制

为确保分析数据的准确性, 以15个样品为1批次, 每批次分析严格进行质量控制。质量控制包括1个全程试剂空白, 平行双样样品测定和3个空白样品加标等操作。各组分别采用多点校正曲线定量, 1~100 μ g/L浓度范围内, 4种滴滴涕同系物线性良好, 相关系数 $r > 0.9992$; 试剂空白均未检出滴滴涕残留; 重复性条件下获得的2次独立测定的平行样品测定结果相对相差 $\leq 20\%$; 空白样品加标量为2.0 μ g/kg时, 鱼体肌肉样品回收率为73.2%~98.7%, 相对标准偏差为2.32%~8.13%; 海水样品回收率为70.5%~115.0%, 相对标准偏差为1.05%~9.97%; 沉积物样品回收率为72.5%~102.0%, 相对标准偏差为2.48%~12.3%; 饲料样品回收率为70.9%~88.6%, 相对标准偏差为1.74%~8.87%。

1.6 数据处理

鱼类样品中DDTs含量以湿重归一化后的数据表示(μ g/kg)。不同样品中DDTs的含量差异用单因素方差进行分析, 显著性水平以 $P < 0.05$ 表示。数据处理分析软件为Office 2013和SPSS 16.0。

2 结果

2.1 卵形鲳鲆养殖生产用配合饲料及养殖水体和表层沉积物中DDTs含量

不同生长阶段所用配合饲料中均存在DDTs, 苗种饲料、半成鱼饲料和成鱼饲料中含量分别为(4.14 \pm 0.31)、(3.37 \pm 0.54)和(4.33 \pm 0.14) μ g/kg干重, 但相互之间并无显著性差异(图1)。各类型配合饲料中DDTs同系物含量最高的成分均为 o,p' -DDT, 苗种、半成鱼和成鱼3个阶段所用饲料中该物质含量分别为(1.87 \pm 0.31)、(1.46 \pm 0.06)和

(2.00±0.33) µg/kg干重; 含量最低的成分均为ρ,ρ'-DDE, 3个阶段所用饲料中该物质含量分别为(0.32±0.04)、(0.31±0.14)和(0.32±0.05) µg/kg干重(表2)。

表2 卵形鲳鲆不同生长阶段所用饲料中DDTs不同组分含量
Tab. 2 The concentration of DDT congeners in different stages of fish feeds

饲料类型	type of feed	ρ, ρ'-DDE	o, ρ'-DDT	ρ, ρ'-DDD	ρ, ρ'-DDT
苗种饲料	seed feed	0.32±0.04	1.87±0.31	0.51±0.08	1.45±0.19
半成鱼饲料	small fish feed	0.31±0.14	1.46±0.06	0.43±0.26	1.16±0.04
成鱼饲料	adult fish feed	0.32±0.05	2.00±0.33	0.52±0.24	1.49±0.43

不同生长阶段网箱水体中均存在DDTs, 投放苗种时期、养殖中期、养殖收获时期, 养殖水体中含量分别为(3.03±0.53)、(3.91±0.75)、(4.34±1.02) ng/L, 随着养殖生产过程的进行, 养殖水体中DDTs逐渐增加, 但相互之间并无显著差异(图2)。不同时期养殖水体中DDTs含量最高的均为o,ρ'-DDT, 3个阶段含量分别为(1.24±0.51)、(1.50±0.67)和(1.88±0.58) ng/L, 含量最低的为ρ,ρ'-DDE, 3个阶段含量分别为(0.20±0.12)、(0.42±0.18)和(0.31±0.13) ng/L(表3)。

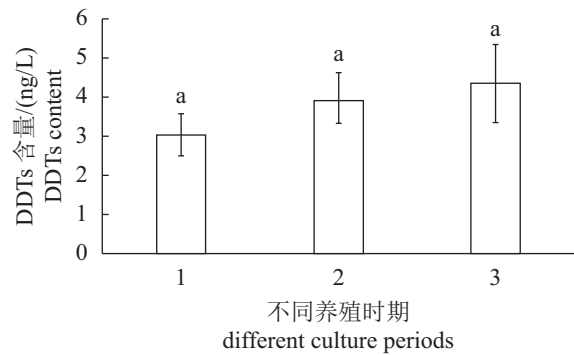


图2 不同养殖时期养殖水体中DDTs含量
1. 投放苗种时期; 2. 养殖中期; 3. 收获上市时期
Fig. 2 The concentration of DDTs in different stages of seawater
1. at the beginning of seeding; 2. at the medium of culture; 3. at the harvest time

不同生长阶段网箱所在区域沉积物中均存在DDTs, 投放苗种时期、养殖中期、养殖收获上市时期, 沉积物中含量分别为(6.45±1.89)、(2.81±0.67)和(3.76±0.98) µg/kg干重, 其中投放苗种时期沉积物底泥中DDTs含量显著高于其他2个

表3 卵形鲳鲆不同生长阶段养殖水体中DDTs不同组分含量
Tab. 3 The concentration of DDT congeners in seawater at different stages

养殖水体	water samples	ρ, ρ'-DDE	o, ρ'-DDT	ρ, ρ'-DDD	ρ, ρ'-DDT
投放苗种时期	at the beginning of seeding	0.20±0.12	1.24±0.51	0.41±0.20	1.17±0.55
养殖中期	at the medium of culture	0.42±0.18	1.50±0.67	0.49±0.24	1.50±0.79
收获上市时期	at the harvest time	0.31±0.13	1.88±0.58	0.56±0.14	1.60±0.39

阶段(图3)。养殖卵形鲳鲆不同生长阶段网箱所在区域沉积物中均只检测到o,ρ'-DDT、ρ,ρ'-DDD和ρ,ρ'-DDT 3种同系物组分, 且含量最高的组分均为ρ,ρ'-DDT, 3个阶段含量分别为(3.31±1.01)、(1.33±0.32)和(1.68±0.64) µg/kg干重。含量最低的组分均为ρ,ρ'-DDD, 3个阶段含量分别为(1.27±0.61)、(0.54±0.78)和(0.70±0.47) µg/kg干重(表4)。

2.2 卵形鲳鲆不同生长阶段肌肉中DDTs含量变化特征

随着养殖时间的延长, 鱼体肌肉中DDTs的

含量逐渐增加, 苗种时期、养殖中期、收获上市时期鱼体肌肉中含量分别为(3.15±0.42)、(3.37±0.26)和(4.49±0.39) µg/kg湿重, 其中收获上市时期的含量显著高于苗种时期的含量, 但远低于0.5mg/kg湿重的国家食品安全限量标准^[22](图4)。不同生长阶段鱼体肌肉中DDTs同系物组分中, 含量最高的成分均为o,ρ'-DDT, 3种阶段含量分别为(1.45±0.08)、(1.34±0.17)和(1.83±0.16) µg/kg湿重; 含量最低的成分均为ρ,ρ'-DDE, 3种阶段含量分别为:(0.23±0.11)、(0.22±0.13)和(0.366±0.20) µg/kg湿重(表5)。

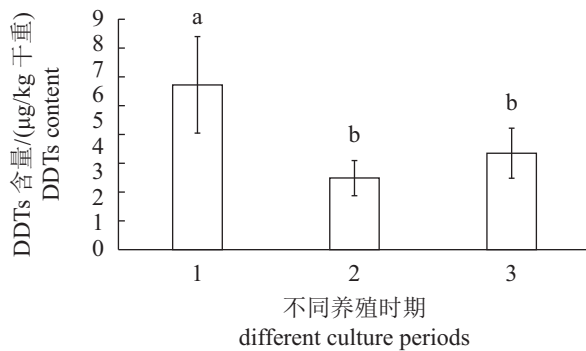


图3 不同养殖时期沉积物中DDTs含量

1. 投放苗种时期; 2. 养殖中期; 3. 收获上市时期

Fig. 3 The concentration of DDTs in different stages of sediments

1. at the beginning of seeding; 2. at the medium of culture; 3. at the harvest time

表4 卵形鲳鲹不同生长阶段沉积物中DDTs不同组分含量

Tab. 4 The concentration of DDT congeners in different stages of sediments

沉积物 sediment samples	ρ, ρ' -DDE	o, ρ' -DDT	ρ, ρ' -DDD	ρ, ρ' -DDT
投放苗种 at the beginning of seeding	ND	1.87±0.91	1.27±0.61	3.31±1.01
养殖中期 at the medium of culture	ND	0.94±0.41	0.54±0.78	1.33±0.32
收获上市时期 at the harvest time	ND	1.38±0.38	0.70±0.47	1.68±0.64

注: ND表示未检出, 下同

Notes: ND means no detection, the same below

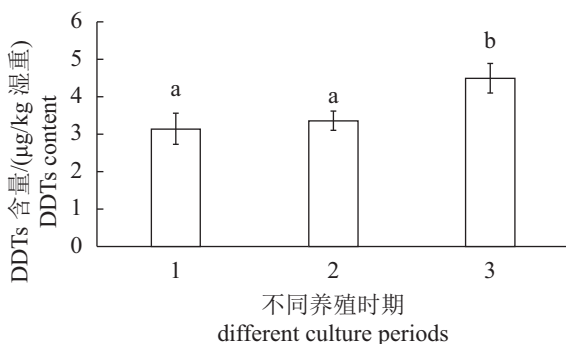


图4 卵形鲳鲹不同生长阶段肌肉中DDTs含量

1. 投放苗种时期; 2. 养殖中期; 3. 收获上市时期

Fig. 4 The concentration of DDTs in muscle of fish at different stages

1. at the beginning of seeding; 2. at the medium of culture; 3. at the harvest time

化, 平均值为37.99%(图6)。

卵形鲳鲹不同生长阶段养殖环境沉积物底泥中DDTs均只有 o, ρ' -DDT、 ρ, ρ' -DDD和 ρ, ρ' -DDT 3种同系物, 最主要的同系物均为 ρ, ρ' -DDT,

2.3 卵形鲳鲹不同生长阶段所用饲料及养殖环境水体和表层沉积物中DDTs同系物组成特征

卵形鲳鲹不同生长阶段所用饲料中最主要的同系物均为 o, ρ' -DDT和 ρ, ρ' -DDT, 3个不同阶段所用饲料中 o, ρ' -DDT所占比重分别为45.09%、43.38%和46.07%, 相互之间无显著变化, 平均值为44.85%; ρ, ρ' -DDT所占比重分别为34.92%、34.44%和34.49%, 相互之间无显著变化, 平均值为34.62%(图5)。

卵形鲳鲹不同生长阶段网箱养殖用水中最主要的同系物均为 o, ρ' -DDT和 ρ, ρ' -DDT, 3个不同阶段网箱养殖用水中 o, ρ' -DDT所占比重分别为40.98%、38.49%和43.27%, 相互之间无显著变化, 平均值为40.91%; ρ, ρ' -DDT所占比重分别为38.76%、38.33%和36.89%, 相互之间无显著变

3个不同阶段养殖环境沉积物底泥中 ρ, ρ' -DDT所占比重分别为51.34%、47.54%和44.59%, 苗种期间含量百分比显著高于另外2个时期, 平均值为47.83%(图7)。

2.4 卵形鲳鲹不同生长阶段肌肉中DDTs同系物组成特征

卵形鲳鲹不同生长阶段肌肉中4种DDTs均存在, 其中最主要的同系物均为 o, ρ' -DDT和 ρ, ρ' -DDT, 3个不同阶段 o, ρ' -DDT所占比重分别为45.94%、39.56%和40.77%, 平均值为42.09%; ρ, ρ' -DDT所占比重分别为34.05%、39.37%和37.77%, 平均值为37.07%(图8)。

3 讨论

3.1 养殖环境及饲料中DDTs的残留水平

表层养殖水体和表层沉积物中DDTs污染程度分别用《海水水质标准》(GB3097-1997)^[23]第二类标准(水产养殖区100 ng/L)和《海洋沉积物物质

表 5 卵形鲳鲹不同生长阶段 DDTs 不同同系物组分含量
Tab. 5 The concentration of DDT congeners in different stages of fish

鱼体肌肉	fish samples	p, p' -DDE	o, p' -DDT	p, p' -DDD	p, p' -DDT
投放苗种	at the beginning of seeding	0.23±0.11	1.45±0.08	0.40±0.19	1.07±0.05
养殖中期	at the medium of culture	0.22±0.13	1.34±0.17	0.49±0.21	1.33±0.06
收获上市时期	at the harvest time	0.36±0.20	1.83±0.16	0.60±0.22	1.70±0.41

μg/kg 湿重

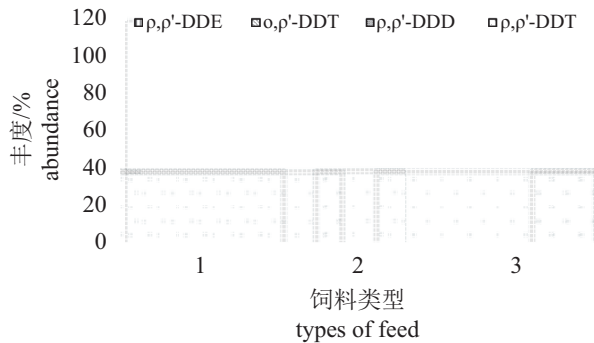


图 5 卵形鲳鲹不同生长阶段所用饲料中 DDTs 同系物丰度特征

1. 苗种饲料; 2. 半成鱼饲料; 3. 成鱼饲料

Fig. 5 The abundance of DDTs congeners in different stages of fish feeds

1. seed feed; 2. small fish feed; 3. adult fish feed

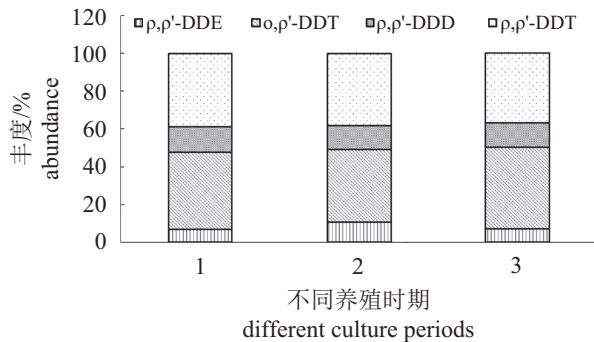


图 6 不同养殖时期养殖水体中 DDTs 同系物丰度

1. 投放苗种时期; 2. 养殖中期; 3. 收获上市时期

Fig. 6 The abundance of DDTs congeners in different stages of seawater

1. at the beginning of seeding; 2. at the medium of culture; 3. at the harvest time

量》(GB18668-2002)^[24]第一类标准(海洋渔业水域 20 μg/kg 干重)评价, 该养殖网箱水体中 DDTs 平均含量为(3.76±0.76) ng/L, 与福建东山湾^[6]和厦门海域^[25]水体中 DDTs 含量同处于一个数量级水平, 低于九龙江^[26]、大亚湾水域^[27]和珠江入海口水域^[28]含量, 高于烟台金城湾^[29]养殖区、海河和

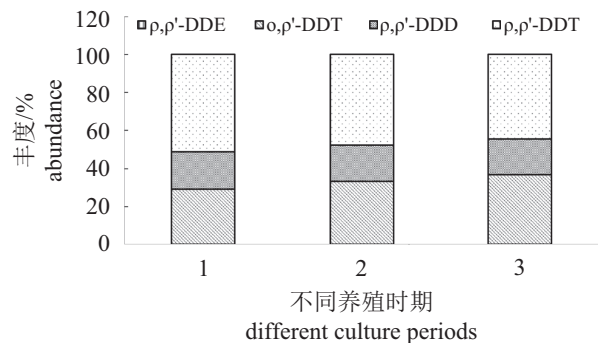


图 7 卵形鲳鲹不同生长阶段养殖环境沉积物中 DDT 不同同系物丰度特征

1. 投放苗种时期; 2. 养殖中期; 3. 收获上市时期

Fig. 7 The abundance of DDTs congeners in different stages of sediments

1. at the beginning of seeding; 2. at the medium of culture; 3. At the harvest time

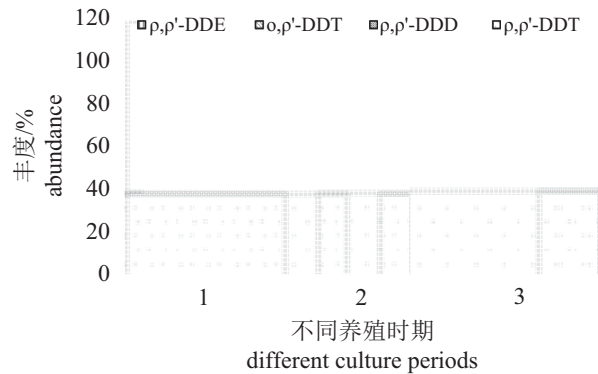


图 8 卵形鲳鲹不同生长阶段肌肉中 DDTs 同系物组成特征

1. 投放苗种时期; 2. 养殖中期; 3. 收获上市时期

Fig. 8 The abundance of DDTs congeners in muscle of fish at different stages

1. at the beginning of seeding; 2. at the medium of culture; 3. at the harvest time

渤海湾区域^[30]水体中 DDTs 含量水平, 但均远低于第二类水产养殖区标准, 处于低污染水平(表6)。

养殖环境沉积物3个阶段均能检测出 DDTs, 平均值为(4.34±1.88) μg/kg 干重, 按照《海洋沉积

物质量》(GB18668-2002)第一类标准(20 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 干重)评价,该养殖区域表层沉积物DDTs污染相对较轻,符合一类标准。与国内主要水产养殖区域沉积物污染情况相比,该养殖区域DDTs含量平均值水平除略高于东海泥质区^[31]外,与珠江口鱼虾养殖区域^[28]水平几乎相当,但与福建东山湾^[6]、宁德、泉州、福州、莆田海域^[5]及厦门海域^[25]、雷州半岛^[32]、渤海湾^[33]、山东半岛南区^[34]等相比,含量均较低,污染处于较低水平(表7)。

工业上DDTs主要由 p,p' -DDT(75%)、 o,p' -DDT(15%)和 p,p' -DDE(5%)3种化合物组成^[35]。DDTs主要以 p,p' -DDT的形式进入环境,随着时间和环境条件的变化,DDT可以降解形成 p,p' -DDD或 p,p' -DDE,前者是在厌氧条件下经过还

原脱氯生成,后者则是在有氧条件下转化而来^[36]。如果环境介质中 $(\text{DDE}+\text{DDD})/\Sigma\text{DDTs}>0.5$,表明环境中DDT没有新的输入;反之,若 $(\text{DDE}+\text{DDD})/\Sigma\text{DDTs}<0.5$,则表示环境中DDT含量较高,即有新的DDT输入^[11]。DDD/DDE值反映了DDT的降解环境条件,大于1则主要在厌氧条件下降解,小于1则表示主要在有氧条件下进行^[36]。

本实验中,养殖水体中 $(\text{DDE}+\text{DDD})/\Sigma\text{DDTs}$ 比值为0.20~0.23,沉积物中 $(\text{DDE}+\text{DDD})/\Sigma\text{DDTs}$ 比值为0.18~0.20,由此可见,该养殖环境中有了新的DDTs输入。养殖水体中DDD/DDE为1.15~2.00,沉积物中无DDE检出,由此可见,该养殖场环境中,DDT以厌氧方式降解为主。该研究结果与福建东山湾^[6]、福建宁德、泉州、福州、莆田等贝

表6 国内其他海湾海水中DDTs含量
Tab. 6 DDTs residues of seawater in other area of China

海水来源 sea water	DDTs含量范围 DDTS content	DDTs含量平均值 DDTS average content	参考文献 reference
湛江沿海养殖区 mariculture area of Zhanjiang coast	3.03~4.34	3.76±0.76	本研究 this study
福建东山湾 Fujian Dongshan Bay	ND~25.7	6.08±3.02	[6]
厦门海域 Xiamen coast	ND~12.9	6.64	[25]
九龙江口 Jiulong River estuary	0.16~63.2	31.6	[26]
大亚湾 Daya Bay	8.6~29.8	19.2	[27]
珠江入海口 Pearl River estuary	2.61~16.86	7.66	[28]
烟台金城湾养殖区 mariculture area of Jincheng Bay	ND	ND	[29]
海河和渤海湾 Haihe River and Bohai Bay	0.01~0.15	0.076	[30]
海水第二类标准 second class standard of seawater	100	100	[23]

表7 不同海区沉积物中DDTs含量范围
Tab. 7 DDTs residues of surface sediment in other sea areas of China

沉积物来源 sediments	DDTs含量范围 DDTS content	DDTs含量平均值 DDTS average content	参考文献 reference
湛江沿海养殖场 aquaculture area of Zhanjiang coast	(2.81±0.67)~(6.45±1.89)	4.34	本研究 this study
东海泥质区 mud areas in the East China Sea	1.14~5.03	3.07	[31]
珠江口 Pearl River estuary	3.01~6.24	4.33	[28]
福建东山湾 Fujian Dongshan Bay	5.56~12.8	9.00±5.34	[6]
福建(宁德、泉州、福州、莆田) Fujian coast	1.93~56.6	15.8	[5]
厦门海域 Xiamen coast	3.53~74.7	17.8	[25]
雷州半岛 Leizhou Peninsula	6.18~13.4	9.06	[32]
渤海湾 Bohai Bay	5.18~45.02	28.25	[33]
山东半岛南部近海 southern coastal area of Shandong peninsula	ND~15.57	7.6	[34]
海洋沉积物质量一类标准 first class standard of sediment	20		[24]

类养殖区^[5]、厦门海域^[25]、珠江入海口^[28]、渤海湾潮间带^[33]等结果一致。

本实验各阶段饲料中(DDE+DDD)/ Σ DDTs比值为0.19~0.22, DDD/DDE为1.39~1.61,由此可见,该养殖企业生产配合饲料所用原材料所处环境条件中均存在新的DDTs的输入情况,且DDT以厌氧方式降解为主。饲料中的鱼粉和鱼油被研究证实是渔饲料中POPs的主要污染源^[3],控制渔饲料中DDTs等有机污染,减少在食物链中的富集,使养殖水产品成为安全的食用商品,就必须对渔饲料中DDTs含量给予一个最高限值,我国无公害食品—渔用配合饲料安全限量(NY 5072-2002)^[37]中规定,渔用饲料中DDTs限量标准为0.3 mg/kg,按此标准,本研究养殖企业3个养殖阶段所使用饲料中DDTs范围均值为(3.94 \pm 0.33) μ g/kg干重,符合无公害安全限量标准要求。

3.2 鱼体不同阶段DDTs残留水平与变化特征

DDTs能通过食物链在生物体(包括人体)中富集,富集倍数可高达数万倍,对生态系统和人类健康造成威胁。孟祥周^[14]对我国广东市场上销售罗非鱼、美国红鱼、卵形鲳鲹等典型鱼类样品进行DDTs类农药的残留研究,得出鱼体中DDTs含量为0.1~698.9 μ g/kg湿重,其中卵形鲳鲹中DDTs的含量范围为15.2~698.9 μ g/kg湿重,结合我国膳食结构,进行人体暴露评价,发现我国本区域人体通过鱼类消费摄入的DDTs量处于一个高端水平,甚至高于美国和日本人体每天从食物中摄入DDTs的量。本实验中养殖卵形鲳鲹肌肉中DDTs平均含量为(3.26 \pm 0.34) μ g/kg湿重,处于广东省主要食用鱼类DDTs污染水平范围之内,但远低于其研究的卵形鲳鲹DDTs污染水平,符合国家食品安全国际标准0.5 mg/kg湿重限量要求。

福建东山湾养殖水体DDTs污染平均浓度与本实验处于相同水平,但该区域养殖的僧帽牡蛎(*Ostrea cucullata*)和缢蛏(*Sinonovacula constricta*)等7种贝类DDTs含量范围为1.68~26.6 μ g/kg湿重,平均值为15.7 μ g/kg湿重^[6];福建宁德、泉州、福州、莆田等5个贝类养殖区僧帽牡蛎和缢蛏4种养殖贝类DDTs含量范围为2.04~107 μ g/kg湿重,平均值为21.7 μ g/kg湿重^[5]。类似的环境污染状况下,贝类中DDTs的污染水平高

于卵形鲳鲹污染水平。生物体中DDTs的富集含量与其生活环境、生长周期、养殖模式等因素密切相关,研究表明,环境中的DDTs等持久性有机污染物都具有疏水性,大多数进入水体后与悬浮颗粒物结合而进入水体沉积物中^[38]。软体双壳类为非选择性滤食习性,生长位置固定,通过滤食水体中悬浮物和藻类获取食物,且养殖生产周期相对较长,一般情况下,僧帽牡蛎、菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)、缢蛏、泥蚶(*Tegillarca granosa*)等养殖周期为1~2年,而本研究中养殖卵形鲳鲹为游泳性鱼类,且在收获上市时,养殖时间不足1年。两方面原因综合,导致卵形鲳鲹DDTs污染水平相对较低。本实验中,随着养殖生产的进行,鱼体中DDTs污染水平显著增加,与养殖时间呈现显著正相关性,显示较强的富集作用,与孟祥周^[14]亲脂性研究结果一致。

3.3 卵形鲳鲹鱼体中DDTs的来源分析

通过研究持久性有机污染物同系物种类和分布特征是一种常用确定鱼体中危害物来源的手段和方法。Vizzini等^[15]对地中海野生和养殖蓝鳍金枪鱼(*Thunnus thynnus*)的肌肉和肝脏分别进行了有机物的测定,探讨养殖鱼体中污染物来源,发现野生蓝鳍金枪鱼中PCBs同系物中PCB118、153、138和180的含量最多,这是与天然鱼类中PCBs同系物分布特征不同之处,说明养殖鱼体组织中已明显摄入来自饲料中的PCBs。Zhang等^[16]为了确定、分析鱼塘中养殖鱼类PBDEs的输入源,得出受污染的饲料是养殖鱼体中PBDE-99和PBDE-209的主要来源。Raldúa等^[39]通过水域环境和鱼体中PBDEs同系物种类和分布进行监测也得出了同样的结论。对于本研究中从鱼体、饲料、养殖水体和沉积物底泥中DDTs同系物组成情况可以看出,从同系物种类上看,沉积物底泥中仅有3种同系物,但鱼体、养殖水体和饲料中 ρ,ρ' -DDE、 o,ρ' -DDT、 ρ,ρ' -DDD和 ρ,ρ' -DDT 4种同系物均存在;从同系物丰度看,3种物质中DDTs均以 o,ρ' -DDT和 ρ,ρ' -DDT为主, ρ,ρ' -DDE和 ρ,ρ' -DDD为辅,且相互比例非常接近,由此可以初步判断,养殖水体和饲料是卵形鲳鲹养殖生长过程中富集DDTs的来源之一。饲料通常由鱼粉和鱼油等物质组成,生物体中持久性有机污染物是水体中污染物水平的数百至上

千倍。本实验饲料中DDTs平均浓度是养殖水体平均浓度的约1000倍,对于养殖卵形鲳鲹而言,相较于养殖水体,饲料应是其DDTs的主要来源。但有关饲料和养殖水体对鱼体中DDTs积累的贡献率,还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 王亚伟, 蔡亚岐, 江桂斌. 斯德哥尔摩公约新增持久性有机污染物的一些研究进展[J]. 中国科学: 化学, 2010, 40(2): 99-123.
Wang Y W, Cai Y Q, Jiang G B. Research processes of persistent organic pollutants (POPs) newly listed and candidate POPs in Stockholm Convention[J]. Scientia Sinica Chimica, 2010, 40(2): 99-123(in Chinese).
- [2] 刘征涛. 持久性有机污染物的主要特征和研究进展[J]. 环境科学研究, 2005, 18(3): 93-102.
Liu Z T. Environmental behavior characteristics and research progress of persistent organic pollutants[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(3): 93-102(in Chinese).
- [3] 苏珊珊, 惠阳. 天然和人工饲养水生生物及渔饲料中多氯联苯和多溴联苯醚的研究现状[J]. 水生生物学报, 2011, 35(6): 1012-1018.
Su S S, Yang H. Review of present condition of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) levels in the aquatic/artificial breeding organisms and aquafeeds[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(6): 1012-1018(in Chinese).
- [4] Jia H L, Chang Y Q, Sun Y Q, *et al.* Distribution and potential human risk of organochlorine pesticides in market mollusks from Dalian, China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 84(3): 278-284.
- [5] 叶玫, 阮金山, 钟硕良, 等. 福建省海水贝类养殖区表层沉积物及贝类滴滴涕的残留与风险评价[J]. 中国水产科学, 2012, 19(3): 482-490.
Ye M, Ruan J S, Zhong S L, *et al.* Residue and risk assessment of DDTs in surface sediment and cultured shellfish along the Fujian coast, China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(3): 482-490(in Chinese).
- [6] 姜琳琳, 余颖, 苏捷, 等. 福建省东山湾生态环境中滴滴涕(DDTs)的分布特征及风险评价[J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 1057-1065.
Jiang L L, Yu Y, Su J, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of dichloro-diphenyl-tricloroethanes in Dongshan Bay, China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(5): 1057-1065(in Chinese).
- [7] 孟祥周, 余莉萍, 郭英, 等. 滴滴涕类农药在广东省鱼类中的残留及人体暴露水平初步评价[J]. 生态毒理学报, 2006, 1(2): 116-122.
Meng X Z, Yu L P, Guo Y, *et al.* DDT residues in typical fishes of Guangdong province and human exposure via fish consumption[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2006, 1(2): 116-122(in Chinese).
- [8] Zhang G, Parker A, House A, *et al.* Sedimentary records of DDT and HCH in the Pearl River Delta, South China[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(17): 3671-3677.
- [9] Sapkota A, Sapkota A R, Kucharski M, *et al.* Aquaculture practices and potential human health risks: current knowledge and future priorities[J]. Environment International, 2008, 34(8): 1215-1226.
- [10] Sun F, Wong S S, Li G C, *et al.* A preliminary assessment of consumer's exposure to pesticide residues in fisheries products[J]. Chemosphere, 2006, 62(4): 674-680.
- [11] Sun Y X, Hao Q, Xu X R, *et al.* Persistent organic pollutants in marine fish from Yongxing Island, South China Sea: levels, composition profiles and human dietary exposure assessment[J]. Chemosphere, 2014, 98: 84-90.
- [12] Yim U H, Hong S H, Shim W J, *et al.* Levels of persistent organochlorine fine contaminants in fish from Korea and their potential health risk[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2005, 48(3): 358-366.
- [13] Kumblad L, Olsson A, Koutny V, *et al.* Distribution of DDT residues in fish from the Songkhla Lake, Thailand[J]. Environmental Pollution, 2001, 112(2): 193-200.
- [14] 孟祥周. 中国南方典型食用鱼类中持久性卤代烃的浓度分布及人体暴露的初步研究[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2007.
Meng X Z. Persistent halogenated hydrocarbons in typical consumer fish of south China and human exposure via fish consumption[D]. Guangzhou: The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry), 2007 (in

- Chinese).
- [15] Vizzini S, Tramati C, Mazzola A. Comparison of stable isotope composition and inorganic and organic contaminant levels in wild and farmed bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, in the Mediterranean Sea[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(10): 1236-1243.
- [16] Zhang B Z, Ni H G, Guan Y F, *et al.* Occurrence, bioaccumulation and potential sources of polybrominated diphenyl ethers in typical freshwater cultured fish ponds of South China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1876-1882.
- [17] 程大川, 郭华阳, 马振华, 等. 3月龄卵形鲳鲹形态性状对体质量的影响分析[J]. *海洋渔业*, 2016, 38(1): 26-34.
- Cheng D C, Guo H Y, Ma Z H, *et al.* Mathematical analysis of morphometric attribute effects on body weight for three-month-old *Trachinotus ovatus*[J]. *Marine fisheries*, 2016, 38(1): 26-34(in Chinese).
- [18] 国家海洋局. GB 17378.2-2007 海洋监测规范 第2部分: 数据处理与分析质量控制[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-13.
- State Oceanic Administration. GB 17378.2-2007 The specification for marine monitoring-part 2: Data processing and quality control of analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-13 (in Chinese).
- [19] 国家海洋局. GB 17378.6-2007 海洋监测规范 第6部分: 生物体分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 43-47.
- State Oceanic Administration. GB 17378.6-2007 The specification for marine monitoring-part 6: Organism analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 43-47 (in Chinese).
- [20] 国家海洋局. GB 17378.5-2007 海洋监测规范 第5部分: 沉积物分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 37-41.
- State Oceanic Administration. GB 17378.5-2007 The specification for marine monitoring-part 5: Sediment analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 37-41 (in Chinese).
- [21] 国家海洋局. GB17378.4-2007 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 47-50.
- State Oceanic Administration. GB17378.4-2007 The specification for marine monitoring-part 4: Seawater analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 47-50 (in Chinese).
- [22] 中华人民共和国农业部. GB 2763-2014 食品中农药最大残留限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 192-193.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. GB 2763-2014 National food safety standard-Maximum residue limits for pesticides in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014: 192-193 (in Chinese).
- [23] 国家环境保护总局. GB 3097-1997 海水水质标准[S]. 北京: 环境科学出版社, 2004: 1-3.
- State Environmental Protection Administration. GB 3097-1997 Marine water quality standard[S]. Beijing: Environmental Science Press, 2004: 1-3 (in Chinese).
- [24] 国家海洋局. GB 18668-2002 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004: 1-3.
- State Oceanic Administration. GB 18668-2002 Marine sediment quality[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004: 1-3 (in Chinese).
- [25] 钟硕良, 董黎明. 厦门海域贝类养殖环境中有机氯农药的积累和降解[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2447-2456.
- Zhong S L, Dong L M. Accumulation and degradation of organochlorine pesticides in shellfish culture environment in Xiamen sea area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2447-2456(in Chinese).
- [26] 张祖麟, 陈伟琪, 哈里德, 等. 九龙江口水体中有机氯农药分布特征及归宿[J]. *环境科学*, 2001, 22(3): 88-92.
- Zhang Z L, Chen W Q, Maskaoui K, *et al.* Evaluation and fate of the organic chlorine pesticides at the waters in Jiulong River estuary[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(3): 88-92(in Chinese).
- [27] Zhou J L, Maskaoui K, Qiu Y W, *et al.* Polychlorinated biphenyl congeners and organochlorine insecticides in the water column and sediments of Daya Bay, China[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 113(3): 373-384.
- [28] 谢文平, 朱新平, 陈昆慈, 等. 珠江口水体、沉积物及水生动物中HCHs和DDTs的含量与生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(9): 1984-1994.
- Xie W P, Zhu X P, Chen K C, *et al.* Risk assessment and investigation of HCH and DDTs in the water, sediment and aquatic animals from the Pearl River Estuary in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(9): 1984-1994(in Chinese).
- [29] Hu Y B, Sun S, Song X K, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of HCHs and DDTs in surface

- seawater and sediment of the mariculture area of Jincheng Bay, China[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, 14(2): 301-308.
- [30] 王泰, 张祖麟, 黄俊, 等. 海河与渤海湾水体中溶解态多氯联苯和有机氯农药污染状况调查[J]. *环境科学*, 2007, 28(4): 730-735.
- Wang T, Zhang Z L, Huang J, *et al.* Occurrence of dissolved polychlorinated biphenyls and organic chlorinated pesticides in the surface water of Haihe River and Bohai Bay, China[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4): 730-735(in Chinese).
- [31] 张宗雁, 郭志刚, 张干, 等. 东海泥质区表层沉积物中有机氯农药的分布[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(6): 724-728.
- Zhang Z Y, Guo Z G, Zhang G, *et al.* Distribution of organochlorine pesticide in the surface sediments of the mud areas in the East China Sea[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(6): 724-728(in Chinese).
- [32] 施震, 张大文, 黄小平, 等. 有机氯农药在粤西海域沉积物和生物体中的累积研究[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(3): 114-119.
- Shi Z, Zhang D W, Huang X P, *et al.* Bioaccumulation of organochlorine pesticides in organisms and sediments in the western coastal waters of Guangdong province[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(3): 114-119(in Chinese).
- [33] 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 渤海湾潮间带表层和柱状沉积物中有机氯农药的沉积记录[J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(10): 9-14.
- Qin Y W, Zhang L, Zheng B H, *et al.* Sedimentary record of organochlorine pesticides in the surface and column sediments from inter-tidal zone in Bohai Bay[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2010, 32(10): 9-14(in Chinese).
- [34] 王江涛, 谭丽菊, 张文浩, 等. 青岛近海沉积物中多环芳烃、多氯联苯和有机氯农药的含量和分布特征[J]. *环境科学*, 2010, 31(11): 2713-2722.
- Wang J T, Tan J, Zhang W H, *et al.* Concentrations and distribution characteristic of PAHs, PCBs and OCPs in the surface sediments of Qingdao coastal area[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(11): 2713-2722(in Chinese).
- [35] 夏重欢. 中国沿海地区海鱼体内持久性有机污染物痕量元素的污染水平以及对人类健康的风险评估[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011: 10.
- Xia C H. Persistent organic pollutants and trace elements in marine fish from Chinese coastal waters: levels, distribution and human health risk assessment[D]. Hefei: University of Sciences and Technology of China, 2011: 10 (in Chinese).
- [36] Wu X G, Lam J C W, Xia C H, *et al.* Atmospheric concentrations of DDTs and chlordanes measured from Shanghai, China to the arctic ocean during the third China arctic research expedition in 2008[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(22): 3750-3757.
- [37] 中华人民共和国农业部. NY 5072-2002无公害食品 渔用配合饲料安全限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 170.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY 5072-2002 Safety limits of non-pollution food and fishery feed[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002: 170 (in Chinese).
- [38] Chopra A K, Sharma M K, Chamoli S. Bioaccumulation of organochlorine pesticides in aquatic system-an overview[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 173(1-4): 905-916.
- [39] Raldúa D, Padrós F, Solé M, *et al.* First evidence of polybrominated diphenyl ether (flame retardants) effects in feral barbel from the Ebro River basin (NE, Spain)[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(1): 56-64.

Bioaccumulation and potential sources of DDTs in *Trachinotus ovatus* during typical cage cultured periods

CHENG Bo¹, KE Changliang², LI Le¹, LI Liudong²,
ZHENG Zhong¹, ZOU Wanhong¹, LIU Qiaorong^{1*}

(1. Quality and Standard Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100141, China;

2. South China Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: In the 12th Stockholm Convention, DDTs is one of the nine organic chlorine pesticides, which were proposed to be controlled as persistent organic pollutants (POPs), because of its harmful effects to the environment and the ecosystem. In China, a large amounts of DDTs have been used in the past few years, and it still can be generally detected in the environment although it was banned for using in agriculture in 1983. Many studies showed that fish consumption is a significant route for human exposure to POPs in the world. China is the largest fishery producer in the world with nearly 60 million metric tons in 2015, accounting for 70.0% of the total global fishery production. Recent study showed that residues of the DDTs have been widely identified and reported in some aquaculture fishes in China, especially in *Trachinotus ovatus*. To determine the bioaccumulation and the potential input sources of DDTs to cage farmed *T. ovatus*, samples of seed, feeds, adult fish, seawater and the sediments were collected at the beginning, medium and the end of aquaculture practice. DDTs were detected in all samples analyzed, with mean concentrations (\pm standard deviations) at (3.15 \pm 0.42) $\mu\text{g}/\text{kg}$ wet weight in seed, (4.49 \pm 0.39) $\mu\text{g}/\text{kg}$ wet weight in adult fish, (3.95 \pm 0.33) $\mu\text{g}/\text{kg}$ dry weight in fish feeds, (3.76 \pm 0.43) ng/L in cage water and (4.34 \pm 1.18) $\mu\text{g}/\text{kg}$ dry weight in sediment. The concentration of DDTs in the fish increased during the culture period and significantly higher when harvesting compared to the beginning and the medium, but well below the 0.5 mg/kg wet weight of national standards for food safety level. In addition, only o,p'-DDT, p,p'-DDD and p,p'-DDT were detected in the sediments, but those three and p,p'-DDE were detected in the seeds, fish feeds and seawater. o,p'-DDT and p,p'-DDT were the major constituents in all samples, with respectively average percentage at 42.09% and 37.07% in fish, 44.85% and 34.62% in fish feeds, 40.91% and 37.99% in cage water, 33.03% and 51.34% in sediment. Finally, statistical analyses suggested that fish feed, as well as pond water at a lesser degree, may have been the major source of DDTs in cage farmed fish of *T. ovatus*. In order to ensure the quality and safety of *T. ovatus*, we should focus on strengthening the control and management of toxic and harmful substances in the feed.

Key words: *Trachinotus ovatus*; cage culture; DDTs; bioaccumulation; contaminant source

Corresponding author: LIU Qiaorong. E-mail: lqrong@gmail.com

Funding projects: Special Fund of Chinese Central Government for Basic Scientific Research Operations in Commonweal Research Institutes (2014005, 2016C009); Product Quality and Safety Supervision of Pollution-Free Agricultural (Fishery Products) Certified Special Funds (2060302); Aquatic Product Safety Evaluation of Unknown Risk Factors Identified with Known Risk Factors (GJFP2016009)