

戚原野, 王李宝, 万夕和, 等. 江苏沿岸四种贝类软体铅的含量特征及其风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2):253–260.

QI Yuan-ye, WANG Li-bao, WAN Xi-he, et al. Content and risk assessment of lead in four species of shellfish in Jiangsu coastal area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):253–260.

# 江苏沿岸四种贝类软体铅的含量特征及其风险评价

戚原野<sup>1</sup>, 王李宝<sup>2</sup>, 万夕和<sup>2\*</sup>, 凌云<sup>2</sup>, 乔毅<sup>2</sup>, 王长海<sup>1\*</sup>

(1.南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2.江苏省海洋水产研究所, 江苏 南通 226007)

**摘要:**于2012年9月—2013年8月和2015年3月采集江苏沿岸文蛤、青蛤、杂色蛤、四角蛤蜊4种主要滩涂贝类样品,分析贝类软体铅(Pb)含量及其时空变化特征,采用点估计法和靶标危害系数法评价贝类软体Pb含量对人体暴露的风险。结果表明,采集的江苏沿岸4种主要滩涂贝类软体Pb含量范围为0.05~0.56 mg·kg<sup>-1</sup>,均值为0.23 mg·kg<sup>-1</sup>,所有贝类软体Pb含量均低于GB 2762—2012(1.5 mg·kg<sup>-1</sup>)和NY 5073—2006(1.0 mg·kg<sup>-1</sup>)限值。茅家港站位4种贝类软体中Pb含量均在夏季达到最高值,分别为文蛤0.77 mg·kg<sup>-1</sup>、青蛤0.12 mg·kg<sup>-1</sup>、杂色蛤0.23 mg·kg<sup>-1</sup>、四角蛤蜊0.61 mg·kg<sup>-1</sup>,文蛤和四角蛤蜊月度波动变化较为显著,青蛤和杂色蛤月度变化不显著;空间分布特征为贝类软体Pb含量最高值在S3站位(陈家港,0.44 mg·kg<sup>-1</sup>),次高值位于S4站位(滨海港,0.32 mg·kg<sup>-1</sup>),最低值位于S11站位(洋口港,0.21 mg·kg<sup>-1</sup>),其余站位差异较小,基本在0.21~0.30 mg·kg<sup>-1</sup>之间。江苏沿岸居民在正常消费水平下,摄入地产经济贝类后,靶标危害系数(THQ)值均未超过1。风险评价结果显示,正常消费水平下,江苏沿岸4种滩涂贝类软体Pb暴露对目标人群的健康风险较低。

**关键词:**江苏沿岸;贝类;铅;含量特征;风险评价

**中图分类号:**X503.225 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2016)02-0253-08 **doi:**10.11654/jaes.2016.02.007

## Content and risk assessment of lead in four species of shellfish in Jiangsu coastal area

QI Yuan-ye<sup>1</sup>, WANG Li-bao<sup>2</sup>, WAN Xi-he<sup>2\*</sup>, LING Yun<sup>2</sup>, QIAO Yi<sup>2</sup>, WANG Chang-hai<sup>1\*</sup>

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Jiangsu Institute of Oceanography & Marine Fisheries, Nantong 226007, China)

**Abstract:**Lead(Pb) accumulation in bivalves poses a potential risk to human health. In this investigation, *Meretrix meretrix*, *Cyclina sineusis*, *Ruditapes variegata* and *Macra veneriformis* were collected from September 2012 to August 2013, and March 2015 from Jiangsu coastal area, to evaluate Pb risk to local inhabitants through food chain. Concentrations of Pb in bivalves were determined using atomic absorption spectrophotometry(AAS). Point estimate and target hazard quotient were employed to assess the health risk of Pb. The concentrations of Pb in four species of bivalves ranged from 0.05 mg·kg<sup>-1</sup> to 0.56 mg·kg<sup>-1</sup>, with the mean concentration of 0.23 mg·kg<sup>-1</sup>, lower than the limits(1.5 mg·kg<sup>-1</sup>) of national standard(GB 2762—2012) and of industrial standard(1.0 mg·kg<sup>-1</sup>, NY 5073—2006) set in China. The highest concentrations of Pb in four species of bivalves generally occurred in summer, which was 0.77 mg·kg<sup>-1</sup>, 0.12 mg·kg<sup>-1</sup>, 0.23 mg·kg<sup>-1</sup> and 0.61 mg·kg<sup>-1</sup> for *M. meretrix*, *C. sineusis*, *M. veneriformis* and *R. variegata*, respectively. The seasonal fluctuation of Pb concentrations was obvious in *M. meretrix* and *M. veneriformis*, but not in *C. sineusis* and *R. variegata*. The Pb concentrations had spatial distribution, with high Pb(0.44 mg·kg<sup>-1</sup>) occurred in station 3, followed by station 4(0.32 mg·kg<sup>-1</sup>), and low in station 11(0.21 mg·kg<sup>-1</sup>). There was no significant difference in Pb concentrations among other stations, ranging from 0.21 mg·kg<sup>-1</sup> to 0.30 mg·kg<sup>-1</sup>. THQ values of local economical shellfish

收稿日期:2015-09-08

基金项目:国家海洋公益性行业科研专项(2013418007-1);国家科技支撑计划(2012BAC07B03);省属公益院所科研条件与能力建设(BM2014040);南通市应用研究计划(BK2013056);南通市科技项目(HL2014014)

作者简介:戚原野(1991—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为贝类的食用安全性评价。E-mail:iamqiyuanye@126.com

\*通信作者:万夕和 E-mail:wxxh1708@163.com;王长海 E-mail:chwang@njau.edu.cn

did not exceed 1 under the normal consumption level of residents in Jiangsu coastal area. The exposure to Pb in four species of bivalves from Jiangsu coastal area would not endanger human health in normal consumption.

**Keywords:** Jiangsu coastal area; bivalve; lead; content; risk assessment

随着沿海城市的发展和工业化进程的加快,工农业废水和生活污水不断排放,给海洋环境带来了一定的污染。重金属作为环境污染物之一,多为非降解型有毒物质,一旦进入环境中就很难去除,相关研究倍受科研人员的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。铅(Pb)是污染物中毒性较大的一种重金属元素,易在贝类体内蓄积,并通过食物链转移至人体,危害人体的神经、消化、排泄、心血管和内分泌等系统。

贝类是江苏沿岸居民的传统食材,口味鲜美,营养价值高,深受消费者的青睐,是我国水产品出口创汇的重要来源之一。江苏沿岸滩涂面积广阔,约为10 440 km<sup>2</sup>,占全国潮间带面积的30%,其中滩涂贝类资源十分丰富,主要有文蛤(*Meretrix meretrix*)、青蛤(*Cyclina sineusis*)、杂色蛤(*Ruditapes variegata*)、四角蛤蜊(*Macra veneriformis*)等10多种。因贝类迁移能力弱,对水环境中重金属的累积是净累积型,从体内排除重金属的生物学半衰期长<sup>[4]</sup>,常作为海洋环境污染监测的重要指标<sup>[5-7]</sup>。贝类质量安全与消费者的健康密切相关,贝类软体Pb含量特征及其风险评价一直是该领域的研究热点<sup>[8-10]</sup>。因此,研究江苏沿岸贝类软体Pb的含量特征,分析江苏沿岸不同地区及不同品种贝类软体Pb的风险评价,对确保消费者食用安全、促

进该区域经济发展具有积极意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

在江苏沿岸地区采集文蛤、青蛤、杂色蛤、四角蛤蜊等4种主要滩涂贝类样品,站位分布见图1。S1至S11为2015年3月的采集站位,依次位于赣榆、墟沟、陈家港、滨海港、射阳港、东沙、王港、条子泥、弶港、长沙港、洋口港的沿岸。各站位海水盐度为30.5~33.8、pH为7.34~8.56、温度为4.2~7.1℃。S12为2012年9月至2013年8月每月连续采集贝类的站位,位于茅家港沿岸。各站位的坐标、样品采集日期和样品体重见表1,样品平均规格和出肉率见表2。现场用海水冲洗样品外壳,保鲜运回实验室,取出软体于-20℃保存<sup>[11]</sup>。

### 1.2 Pb含量分析和数据处理

样品解冻并沥干表面水分后制成匀浆,湿法消解,采用美国热电M6型塞曼效应原子吸收分光光度计测定Pb含量<sup>[12]</sup>,质控采用中国地质科学院地球物理地球化学勘察研究所研制的标准物质(GBW 10024),同时设立空白对照。样品一式三份进行检测,质控样的回收率在95.2%~108.7%之间。所有检测均

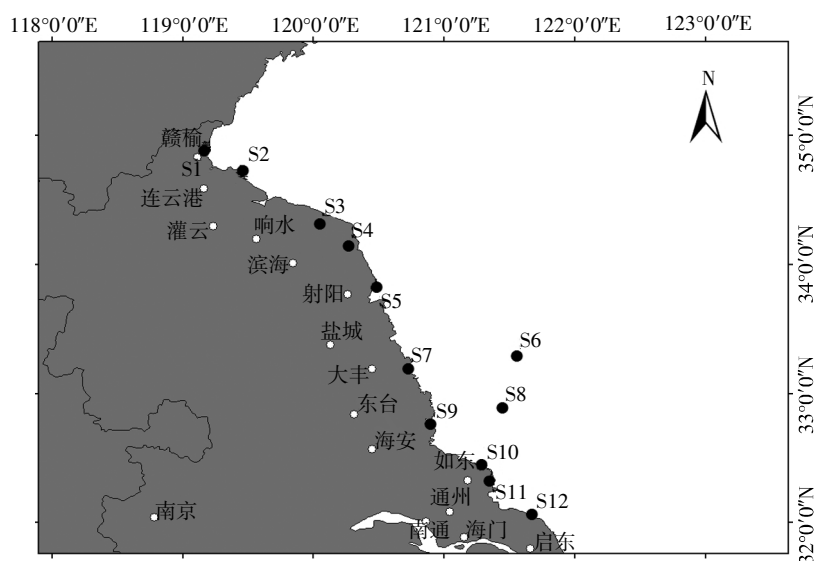


图1 江苏沿岸贝类样品采样站位图

Figure 1 Sampling location of shellfish in Jiangsu coastal area

表1 江苏沿岸贝类样品采样站位、地理坐标、采样日期和样品体重

Table 1 Sampling sites, geographic coordinates, species and sampling dates of shellfish samples from Jiangsu coastal area

| 采样站位<br>Sampling site | 地理坐标<br>Geographic coordinate | 采样日期<br>Sampling date | 样品体重 Sample weights/g |                      |                        |                           |
|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|
|                       |                               |                       | 文蛤 <i>M.meretrix</i>  | 青蛤 <i>C.sineusis</i> | 杂色蛤 <i>R.variegata</i> | 四角蛤蜊 <i>M.venerformis</i> |
| S1                    | Φ119°09.486'N λ34°52.988'E    | 2015.03               | 46.7±2.5              | 21.6±1.2             | 12.8±1.2               | 16.2±0.8                  |
| S2                    | Φ119°27.681'N λ34°43.818'E    | 2015.03               | 51.3±3.1              | 23.5±1.7             | 14.5±1.3               | 16.8±1.2                  |
| S3                    | Φ120°02.567'N λ34°19.023'E    | 2015.03               | 43.9±1.7              | 25.6±1.8             | 15.3±0.7               | 15.2±0.8                  |
| S4                    | Φ120°16.456'N λ34°08.768'E    | 2015.03               | 45.2±1.2              | 22.9±0.5             | 14.7±0.9               | 14.3±0.5                  |
| S5                    | Φ120°29.075'N λ33°49.442'E    | 2015.03               | 39.2±0.8              | 18.7±0.5             | 13.8±0.6               | 15.5±0.5                  |
| S6                    | Φ121°33.679'N λ33°17.480'E    | 2015.03               | 48.3±1.1              | 25.6±0.4             | 15.8±0.6               | 18.7±0.9                  |
| S7                    | Φ120°43.791'N λ33°11.414'E    | 2015.03               | 45.2±0.8              | 22.3±0.3             | 15.6±0.4               | 16.8±0.2                  |
| S8                    | Φ121°27.079'N λ32°53.480'E    | 2015.03               | 42.6±1.2              | 21.6±0.4             | 16.2±0.6               | 14.9±0.3                  |
| S9                    | Φ120°53.911'N λ32°45.680'E    | 2015.03               | 43.7±0.9              | 23.4±0.2             | 15.3±0.5               | 15.8±0.6                  |
| S10                   | Φ121°17.390'N λ32°27.079'E    | 2015.03               | 45.6±1.4              | 25.6±1.2             | 13.8±0.2               | 16.4±0.4                  |
| S11                   | Φ121°21.079'N λ32°19.478'E    | 2015.03               | 40.8±1.6              | 24.7±0.9             | 14.7±0.9               | 15.2±0.8                  |
| S12                   | Φ121°40.387'N λ32°03.832'E    | 2012.09—2013.08       | 42.3±0.7              | 23.4±0.6             | 13.4±0.2               | 16.3±0.5                  |

表2 江苏沿岸贝类样品的平均规格和出肉率

Table 2 Average specification and dressing percentages of shellfish samples from Jiangsu coastal area

| 品种 Species                | 长 Length/mm | 宽 Width/mm | 高 Depth/mm | 出肉率 Dressing percentage/% |
|---------------------------|-------------|------------|------------|---------------------------|
| 文蛤 <i>M.meretrix</i>      | 43.1±3.5    | 36.5±2.1   | 23.1±2.2   | 15.16±0.62                |
| 青蛤 <i>C.sineusis</i>      | 34.6±2.6    | 27.5±2.7   | 18.4±1.4   | 14.59±0.83                |
| 杂色蛤 <i>R.variegata</i>    | 35.3±2.5    | 21.8±2.2   | 16.3±1.7   | 18.83±0.51                |
| 四角蛤蜊 <i>M.venerformis</i> | 31.6±1.2    | 25.9±1.3   | 21.1±1.5   | 15.96±0.48                |

重复三次,最终检测结果以平均值±标准差表示。采用 Excel 2013 软件进行数据的统计分析和图形绘制。

### 1.3 Pb 的膳食暴露量计算

周膳食暴露量<sup>[13]</sup>的计算公式为:

$$EWI = \frac{7 \times F_{IR} \times C}{B_w} \quad (1)$$

式中:EWI 表示 Pb 的周膳食暴露量,  $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; C 表示贝类软体的 Pb 含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $F_{IR}$  表示目标人群贝类软体的摄入率,  $38.9 \text{ g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ <sup>[14]</sup>;  $B_w$  表示目标人群的平均体重,  $63 \text{ kg}$ <sup>[15]</sup>。

### 1.4 Pb 暴露的风险评价

贝类 Pb 摄入的风险评价采用靶标危害系数 (THQ)<sup>[16]</sup>法。根据贝类软体 Pb 含量及贝类软体的消费量计算 Pb 的 THQ 值。若  $\text{THQ} < 1$ , 表示摄入 Pb 含量处于安全范围内, 消费者是安全的<sup>[17-18]</sup>; 若  $\text{THQ} \geq 1$ , 则表示消费者 Pb 摄入量过高, 已处于或即将处于风险中。

THQ 法的计算公式为:

$$\text{THQ} = \frac{E_F \times E_D \times F_{IR} \times C}{R_{FD} \times W_{AB} \times T_A} \quad (2)$$

式中:  $E_F$  为接触频率,  $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $E_D$  为人的平均寿命, 70

a;  $F_{IR}$  为贝类软体的摄入率,  $38.9 \text{ g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ <sup>[14]</sup>;  $W_{AB}$  为目标人群的平均体重, 成人  $63 \text{ kg}$ <sup>[15]</sup>; 平均接触时间  $T_A = E_F \times E_D$ , d; C 为贝类中重金属含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $R_{FD}$  为口服参考剂量,  $4 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ <sup>[19-20]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 江苏沿岸 4 种贝类软体 Pb 含量水平

2012 年 9 月—2013 年 8 月和 2015 年 3 月采集的江苏沿岸文蛤、青蛤、杂色蛤、四角蛤蜊 4 种主要滩涂贝类样品软体 Pb 含量范围为  $0.05 \sim 0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 均值为  $0.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 文蛤、青蛤、杂色蛤、四角蛤蜊的最高值均出现 S3 站位, 分别为  $0.56$ 、 $0.28$ 、 $0.32$ 、 $0.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 详见表 3。根据 GB 2762—2012<sup>[21]</sup>及 NY 5073—2006<sup>[22]</sup>, 我国国家标准和无公害食品标准贝类中 Pb 的限量分别为  $1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 所采集的江苏沿岸 4 种主要贝类软体 Pb 含量的合格率为 100%。

参考相关海洋环境质量公报数据, 表 3 列出了 2013 年所采集样品的 12 个站位的海水和表层沉积物 Pb 含量。其中, 海水 Pb 平均含量均低于 GB 11607—1989<sup>[23]</sup>和 NY 5052—2001<sup>[24]</sup>的限量, 符合 GB 3097—

表 3 江苏沿岸不同站位 4 种贝类软体 Pb 含量测定结果和各站位海水、表层沉积物 Pb 含量

Table 3 Pb content in sea water, surface sediment and four species of shellfish from different stations in Jiangsu coastal area

| 站位<br>Station | 文蛤 <i>M.meretrix</i> /<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 青蛤 <i>C.sineusis</i> /<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 杂色蛤 <i>R.variegata</i> /<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 四角蛤蜊<br><i>M.venerformis</i> /mg·kg <sup>-1</sup> | 海水 Sea water/<br>μg·L <sup>-1</sup> | 表层沉积物 Surface<br>sediment/mg·kg <sup>-1</sup> |
|---------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|
| S1            | 0.31±0.01                                     | 0.18±0.02                                     | 0.21±0.03                                       | 0.25±0.03                                         | 0.89±0.13                           | 15.62±1.34                                    |
| S2            | 0.29±0.05                                     | 0.15±0.01                                     | 0.19±0.01                                       | 0.22±0.02                                         | 0.92±0.16                           | 16.23±1.17                                    |
| S3            | 0.56±0.04                                     | 0.28±0.02                                     | 0.32±0.02                                       | 0.48±0.06                                         | 2.01±0.17                           | 25.47±2.15                                    |
| S4            | 0.32±0.04                                     | 0.17±0.03                                     | 0.22±0.02                                       | 0.20±0.02                                         | 1.24±0.12                           | 18.34±1.56                                    |
| S5            | 0.23±0.01                                     | 0.16±0.02                                     | 0.18±0.04                                       | 0.19±0.05                                         | 0.96±0.08                           | 13.57±1.23                                    |
| S6            | 0.31±0.03                                     | 0.12±0.02                                     | 0.15±0.03                                       | 0.17±0.01                                         | 1.05±0.07                           | 10.34±1.42                                    |
| S7            | 0.27±0.05                                     | 0.16±0.02                                     | 0.21±0.05                                       | 0.24±0.02                                         | 0.72±0.12                           | 15.96±1.82                                    |
| S8            | 0.25±0.03                                     | 0.14±0.02                                     | 0.17±0.03                                       | 0.21±0.03                                         | 0.68±0.06                           | 12.34±1.06                                    |
| S9            | 0.28±0.04                                     | 0.17±0.03                                     | 0.16±0.02                                       | 0.19±0.01                                         | 0.85±0.13                           | 17.62±2.04                                    |
| S10           | 0.35±0.03                                     | 0.15±0.01                                     | 0.22±0.04                                       | 0.26±0.04                                         | 0.96±0.14                           | 14.91±1.35                                    |
| S11           | 0.29±0.01                                     | 0.18±0.02                                     | 0.13±0.01                                       | 0.22±0.02                                         | 0.65±0.07                           | 11.83±1.27                                    |
| S12           | 0.31±0.03                                     | 0.05±0.01                                     | 0.12±0.02                                       | 0.44±0.06                                         | 1.08±0.12                           | 13.58±1.62                                    |

注:海水和表层沉积物 Pb 含量均摘自《2013 年江苏省海洋环境质量公报》<sup>[27]</sup>。

1997<sup>[25]</sup>的二类标准;沉积物 Pb 平均含量均符合 GB 18668—2002<sup>[26]</sup>一类标准,适用于贝类养殖。

研究发现,江苏沿岸文蛤和四角蛤蜊软体 Pb 含量始终高于青蛤和杂色蛤。贝类软体对重金属的富集量取决于贝类体对重金属元素的吸收和排泄速率,相对速率决定了生物对特定重金属的富集程度,富集类型包括调节型和净积累型,各类型之间存在过渡形式<sup>[28]</sup>。某些贝类能够根据所在海水和沉积物的污染程度改变其生理生化状况,从而引起对重金属吸收率和累积量的改变<sup>[29]</sup>。表 3 数据表明,贝类软体 Pb 含量与所处的海水和表层沉积物环境中 Pb 含量存在相关性,S3 站位海水和沉积物 Pb 含量较高,该站位的贝类软体 Pb 含量也相对较高。不同贝类品种对 Pb 的累积特性不同,存在种间差异<sup>[30]</sup>,导致其软体 Pb 含量的差异。贝类对 Pb 累积的非生物影响因子主要包括海水温度、盐度以及海水和沉积物中的 Pb 含量<sup>[31]</sup>。贝类对 Pb 的

吸收率受温度的影响,其代谢机制会随着温度的变化而改变;海水盐度随季节的更替而变化,水体盐度的变化会改变水体中 Pb 的存在形态,从而间接影响贝类软体 Pb 的含量<sup>[31]</sup>。此外,本实验中文蛤的个体明显大于其他 3 种贝类,个体大小差异可能是文蛤与其他 3 种贝类 Pb 含量差异的重要因素。

2.2 茅家港沿岸 4 种贝类软体 Pb 含量的月度变化

2012 年 9 月至 2013 年 8 月一年时间内,茅家港站位文蛤、青蛤、杂色蛤、四角蛤蜊 4 种贝类软体 Pb 含量的月度变化趋势如图 2 所示。在所有月份中,文蛤和四角蛤蜊软体 Pb 含量始终高于青蛤和杂色蛤;在不同月份中,文蛤和四角蛤蜊软体 Pb 含量各有高低。文蛤和四角蛤蜊月度波动变化较为显著,青蛤和杂色蛤月度变化不显著。

由图 2 可以看出,文蛤、青蛤、杂色蛤和四角蛤蜊软体 Pb 含量最高值均出现在 2013 年 8 月,依次为文

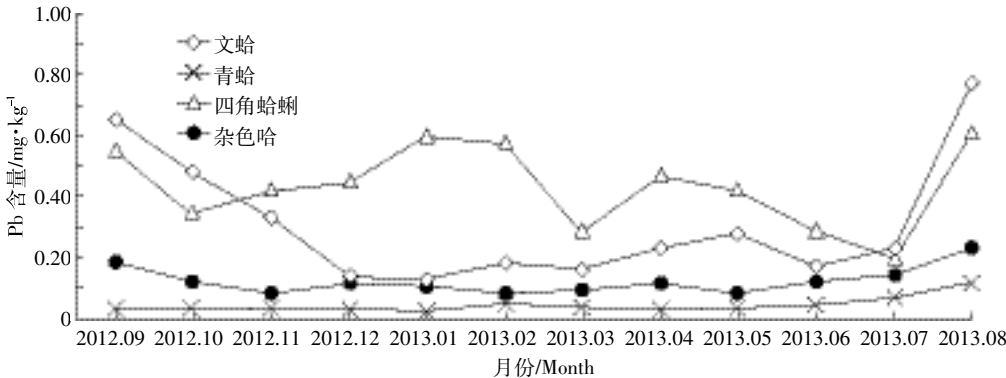


图 2 2012 年 9 月—2013 年 8 月茅家港沿岸(S12 站位)4 种贝类软体 Pb 含量的月度变化

Figure 2 Temporal features of Pb in four species of shellfish collected from Maojiagang during September 2012 to August 2013

蛤>四角蛤蜊>杂色蛤>青蛤,这可能与8月份海水温度较高有关。有数据表明<sup>[32]</sup>,黄海月均海洋水温2月最低,8月最高,近岸沉积物综合质量良好。较高的水温能够使海洋生物的新陈代谢旺盛<sup>[33]</sup>,贝类的生长发育、新陈代谢的速度随温度的升高而加快;超过一定的温度,贝类的生活就将受到影响,甚至死亡。2012年9—12月,茅家港站位文蛤软体Pb含量呈下降趋势,从 $0.77\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降至 $0.14\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;随后维持在 $0.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右。四角蛤蜊软体Pb含量有2个峰值,分别是2013年1月( $0.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和2013年4月( $0.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),其他月度呈无规则波动,变化范围在 $0.21\sim 0.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。青蛤和杂色蛤软体Pb含量普遍较低,分别在 $0.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 上下波动。

按照季节对江苏沿岸4种贝类软体Pb含量比较发现:文蛤和杂色蛤在夏季最高,秋季次之,冬季最低,春季回升;青蛤和四角蛤蜊的季节变化略显不同,夏季最高,冬季次之。海水的温度、盐度和溶解氧等会随着季节的更替而变化,影响贝类的生理活动和代谢机制<sup>[31]</sup>,进而改变茅家港地区4种贝类软体对Pb元素的吸收和累积。

### 2.3 江苏沿岸4种贝类软体Pb含量的空间分布

图3为江苏沿岸11个站位贝类软体Pb含量总平均值的空间分布情况。可以看出,各站位贝类软体Pb含量的差异不大,最高值在陈家港的S3站位( $0.44\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),次高值位于滨海港的S4站位( $0.32\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),最低值位于洋口港的S11站位( $0.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),其余站位在 $0.21\sim 0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围之间。

贝类软体Pb含量受区域内污染源种类、沉积物性质等因素的影响较大<sup>[34]</sup>,其含量随着海域环境的变化而改变。总体上看,贝类软体Pb含量高值区出现在S3站位,该站位地处响水县境内。随着响水县政府招

商引资政策的推进,很多工厂定址在陈家港沿岸,其中包括一些含铅油漆厂,这些工厂排放的废水可能对当地贝类软体Pb含量存在影响。S4与S3海流相通且距离较近,可能受陈家港沿岸工厂影响,导致贝类软体Pb含量略高;S1和S2两个站位位于连云港沿岸,现场调查发现,当地环境良好,含Pb废水的工厂较少,可能是该地区贝类软体Pb含量较低的主要原因;S5站位位于射阳境内,该县沿岸产业主要包括能源、纸浆、机电、轻工、食品、饲料等,相关产业排放Pb污染物的能力较弱<sup>[35]</sup>;S6和S8两个站位距离海岸较远,污染物进入黄海后,随海流逐步稀释降解,可能是这两个站位贝类软体Pb含量较低的原因;S9和S11站位的贝类软体Pb含量也比较低,表明其周围缺少相应的污染源。

Pb污染的主要来源是铅蓄电池厂、含铅油漆和涂料厂、电镀厂、烷基铅厂、冶炼厂排放的废水和废气<sup>[36]</sup>,这些污染源在江苏沿岸分布较少,可能是江苏沿岸4种贝类软体Pb含量较低的主要原因。

### 2.4 江苏沿岸4种贝类软体Pb的暴露评估

按照化学污染物膳食摄入量及每周耐受摄入量的点评估方法,根据表3中贝类软体Pb含量的平均值,由式1可计算得到通过食用贝类软体的每周膳食摄入量(表4),并与世界卫生组织/联合国粮农组织的食品添加剂联合专家委员会(JECFA)推荐的暂定每周可耐受摄入量( $\text{PTWI}: 25\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[37]</sup>进行比较。

由表4可以看出,江苏沿岸4种主要贝类软体Pb的周膳食暴露量均远低于PTWI的推荐值,消费者通过贝类膳食摄入的Pb含量处于安全范围。贝类软体Pb的周膳食暴露量最大值出现在陈家港站位的文蛤样品( $2.42\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),最低值出现在茅家港站位的青蛤样品( $0.22\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。尽管江苏沿岸居民经各种贝类摄入的Pb含量均低于暴露量的限值,但综合评价

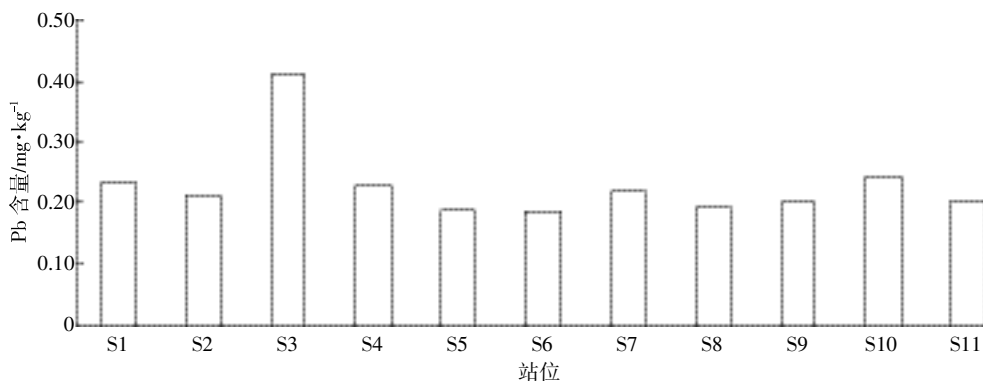


图3 2015年3月江苏沿岸各站位贝类软体Pb含量的空间分布

Figure 3 Spatial distribution of Pb content in shellfish collected from Jiangsu coastal area in March 2015

表4 江苏沿岸贝类软体 Pb 含量的估计每周摄入量和 THQ 值( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )Table 4 Estimated weekly intake(EWI) of Pb and THQ values of shellfish from Jiangsu coastal area( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 种类                   | 参数  | S1   | S2   | S3   | S4   | S5   | S6   | S7   | S8   | S9   | S10  | S11  | S12  |
|----------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 文蛤                   | EWI | 1.34 | 1.25 | 2.42 | 1.38 | 0.99 | 1.34 | 1.17 | 1.08 | 1.21 | 1.51 | 1.25 | 1.34 |
| <i>M.meretrix</i>    | THQ | 0.05 | 0.04 | 0.09 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.05 |
| 青蛤                   | EWI | 0.78 | 0.65 | 1.21 | 0.73 | 0.69 | 0.52 | 0.69 | 0.61 | 0.73 | 0.65 | 0.78 | 0.22 |
| <i>C.sineusis</i>    | THQ | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.01 |
| 杂色蛤                  | EWI | 0.91 | 0.82 | 1.38 | 0.95 | 0.78 | 0.65 | 0.91 | 0.73 | 0.69 | 0.95 | 0.56 | 0.52 |
| <i>R.variegata</i>   | THQ | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| 四角蛤蜊                 | EWI | 1.08 | 0.95 | 2.07 | 0.86 | 0.82 | 0.73 | 1.04 | 0.91 | 0.82 | 1.12 | 0.95 | 1.90 |
| <i>M.venerformis</i> | THQ | 0.04 | 0.03 | 0.07 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.07 |

时需结合膳食结构,即贝类在总膳食中所占的比例。本研究中仅评估贝类软体 Pb 含量,其暴露途径只有膳食摄入,通过其他途径的暴露量本文不作评估,且重点针对目标人群(即成年人)进行暴露评估。

表5列出了已报道的国内外不同地区人群贝类消费中 Pb 的膳食暴露量。从国内外贝类软体 Pb 的膳食摄入量来看,国内的摄入水平明显低于国外摄入水平。由表5可以看出,江苏沿岸贝类软体 Pb 暴露量( $0.142 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )约占 PTDI 的 3.36%,与我国晋江、厦门、珠江三角洲地区的暴露水平相差不大,但远低于国外部分地区贝类软体 Pb 的暴露水平。

## 2.5 江苏沿岸4种贝类软体 Pb 暴露的风险评价

通过食用江苏沿岸4种贝类软体摄入 Pb 含量的 THQ 结果详见表4。江苏沿岸居民在正常消费水平下,摄入当地的4种经济贝类后,其 THQ 值均未超过1。其中,陈家港文蛤和四角蛤蜊消费引起 Pb 的 THQ 值相对较高,分别为0.09和0.07,但也远远小于1。由此可见,在江苏沿岸居民正常的消费水平下,食用当地贝类软体所造成的健康风险是可以接受的,目标人群的健康风险也比较低。

假设江苏沿岸贝类软体 Pb 含量为 NY 5073 的限量值( $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),按照目标人群的平均体重和贝

类的摄入率进行计算,其 THQ 值为0.15,表明目标人群的健康风险较低。如果目标人群的贝类摄入率长期维持在  $252 \text{ g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$  的水平,那么目标人群的健康将会产生风险。此外,由于4种贝类软体 Pb 含量在夏季达到最大值,建议消费者合理消费贝类食材,降低自身的健康风险。

## 3 结论

2012年9月—2013年8月和2015年3月江苏沿岸文蛤、青蛤、杂色蛤、四角蛤蜊4种主要滩涂贝类软体 Pb 含量范围为  $0.05\sim 0.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均值为  $0.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,低于 GB 2762—2012 和 NY 5073—2006 限量。与国内外已报道贝类软体 Pb 的膳食参考摄入量相比,江苏沿岸贝类软体 Pb 摄入量处于较低水平。参考 JECFA 推荐的暂定每周耐受摄入量,江苏沿岸贝类软体 Pb 的膳食暴露量处于安全范围内。根据 Pb 的参考剂量计算的 THQ 值,在正常消费水平下,江苏沿岸贝类软体 Pb 暴露对目标人群的健康风险较低。

## 参考文献:

- [1] Cooper R J, Langlois D, Olley J. Heavy metals in Tasmanian shellfish 1—monitoring heavy metal contamination in the Derwent estuary: Use of oysters and mussels[J]. *Journal of Applied Toxicology*, 1982, 2(2):99–109.
- [2] 孙 耀, 杨琴芳, 张友簏. 胶州湾生物经济体体内的重金属含量[J]. *海洋科学*, 1992, 7(4):61–65.  
SUN Yao, YANG Qin-fang, ZHANG You-chi. Heavy metal contents in economically important organisms of Jiaozhou Bay[J]. *Marine Sciences*, 1992, 7(4):61–65.
- [3] 陈 蓉, 徐忠贤, 赖家平, 等. 湛江港海域经济水产品重金属含量及评价[J]. *黄渤海海洋学报*, 1998, 16(4):55–59.  
CHEN Rong, XU Zhong-xian, LAI Jia-ping, et al. Risk assessment and heavy metal concentrations in some commercially seafood of Zhanjiang Bay[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas*, 1998, 16(4):55–59.

表5 不同国家和地区贝类软体 Pb 的日膳食暴露量比较( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )Table 5 Comparison of estimated dietary intakes(EDI) of Pb by consuming shellfish collected from different countries and areas based on literature( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )

| 地区 Areas              | EDI   | 地区 Areas              | EDI   |
|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
| 江苏沿岸(本文)              | 0.142 | 巴斯克沿岸 <sup>[40]</sup> | 0.383 |
| 珠江三角洲 <sup>[40]</sup> | 0.154 | 地中海 <sup>[40]</sup>   | 0.556 |
| 摩洛哥 <sup>[43]</sup>   | 1.186 | 厦门 <sup>[39]</sup>    | 0.122 |
| PTDI <sup>[37]</sup>  | 3.57  | 阿拉伯湾 <sup>[42]</sup>  | 0.758 |
| 晋江 <sup>[38]</sup>    | 0.114 | 马来西亚 <sup>[45]</sup>  | 0.584 |

- [4] Wang W X, Stupakoff I, Gagnon C, et al. Bioavailability of inorganic and methyl mercury to a marine deposit-feeding polychaete[J]. *Environmental Science and Technology*, 1998, 32(17):2564-2571.
- [5] 宋德宏. 大连近海域贝类与海水重金属含量的相关性研究[D]. 大连:大连海事大学, 2007.
- SONG De-hong. Study on heavy metal content in oyster shell from Dalian and its relevance to sea water[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2007.
- [6] 李学鹏, 励建荣, 段青源, 等. 泥蚶对重金属铜、铅、镉的生物富集动力学[J]. 水产学报, 2008, 32(4):592-600.
- LI Xue-peng, LI Jian-rong, DUAN Qing-yuan, et al. Kinetic study on the bioconcentration of three heavy metals (Cu, Pb, Cd) in *Tegillarca granosa* Linnaeus[J]. *Journal of fisheries of China*, 2008, 32(4):592-600.
- [7] 马胜伟, 林 钦, 陈海刚, 等. 混合重金属对翡翠贻贝的积累与排放规律研究[J]. 南方水产, 2008, 4(6):78-82.
- MA Sheng-wei, LIN Qin, CHEN Hai-gang, et al. Accumulation and elimination of mixed heavy metals in green mussel *Mytilus edulis* [J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(6):78-82.
- [8] 王增焕, 贾晓平, 林 钦, 等. 广东沿海近江牡蛎重金属含量特征及其风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3):607-612.
- WANG Zeng-huan, JIA Xia-ping, LIN Qin, et al. The content variation characteristics and risk analysis for heavy metal in *Crassostrea Rivularis* along the coast of Guangdong Province, China[J]. *Journal of Agro Environment Science*, 2012, 31(3):607-612.
- [9] 王增焕, 林 钦, 王许诺. 大亚湾海洋生物体内铅的含量与风险评估[J]. 南方水产, 2010, 6(1):54-57.
- WANG Zeng-huan, LIN Qin, WANG Xu-nuo. Analysis of lead content in marine organisms and risk assessment in Daya Bay[J]. *South China Fisheries Science*, 2010, 6(1):54-57.
- [10] 张铁涛, 徐云升, 武天明. 三亚市红沙海域海产品铅含量分析及评价[J]. 食品工业, 2012, 33(6):88-89.
- ZHANG Tie-tao, XU Yun-sheng, WU Tian-ming. Assessment of the content of lead in seafood from Hongsha Bay in Sanya[J]. *Food Industry*, 2012, 33(6):88-89.
- [11] 国家质量监督检验检疫总局. GB 17378—2007 海洋监测规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 17378—2007 Marine monitoring[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [12] 中华人民共和国卫生部. GB 5009. 12—2010 食品安全国家标准 食品中铅的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- People's Republic of China Ministry of Health, GB 5009. 12—2010 Standards of national food safety and determination of lead in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2010.
- [13] 王增焕, 王许诺. 华南沿海贝类产品重金属含量及其膳食暴露评估[J]. 中国渔业质量与标准, 2014, 4(1):14-20.
- WANG Zeng-huan, WANG Xu-nuo. The heavy metal contents in shellfish from South China Sea coast and its dietary exposure risk[J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2014, 4(1):14-20.
- [14] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[EB/OL]. [2009-09-24]. [Http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2009/indexch.htm](http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2009/indexch.htm).
- National Bureau of Statistics of China. China yearbook[EB/OL]. [2009-09-24]. [Http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2009/indexch.htm](http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2009/indexch.htm).
- [15] 国家体育总局. 2010 年国民体质监测公报[EB/OL]. [2011-09-02]. [Http://www.sport.gov.cn/n16/n1077/n297454/2052709.html](http://www.sport.gov.cn/n16/n1077/n297454/2052709.html).
- General Administration of Sport of China. Communique of national physical fitness monitoring in 2010[EB/OL]. [2011-09-02]. <http://www.sport.gov.cn/n16/n1077/n297454/2052709.html>.
- [16] Guidance manual for assessing human health risks from chemically contaminated, fish and shellfish[R]. US EPA, 1989. EPA-503/8-89-002.
- [17] Storelli M M. Potential human health risks from metals (Hg, Cd and Pb) and polychlorinated biphenyls (PCBs) via seafood consumption: Estimation of target hazard quotients (THQs) and toxic equivalents (TEQs)[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2008, 46(8):2782-2788.
- [18] Vieira C, Morais S, Ramos S, et al. Mercury, cadmium, lead and arsenic levels in three pelagic fish species from the Atlantic Ocean: Intra- and inter-specific variability and human health risks for consumption[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2011, 49(4):923-932.
- [19] Han B C, Jeng W L, Chen R Y, et al. Estimation of target hazard quotients and potential health risk for metals by consumption of seafood in Taiwan[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1998, 35(4):711-720.
- [20] 任 敏, 徐国峰, 孔定江, 等. 宁波海区经济贝类重金属污染现状及对人体健康风险分析[J]. 海洋开发与管理, 2010, 27(9):58-60.
- REN Min, XU Guo-feng, KONG Ding-jiang, et al. The pollution of heavy metal and analysis of human health risk in commercially shellfish of Ningbo Sea area[J]. *The Development and Management of Marine*, 2010, 27(9):58-60.
- [21] 中华人民共和国卫生部. GB 2762—2012 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.
- People's Republic of China Ministry of Health. GB 2762—2012 Standard of national food safety and contaminants limited on food[S]. Beijing: China Standards Press, 2013.
- [22] 中华人民共和国农业部. NY 5073—2006 无公害食品 水产品中有毒有害物质限量[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY 5073—2006 Non-environmental pollution food-limit of poisonous and harmful substance in aquatic products[S]. Beijing: China Standards Press, 2006.
- [23] 中华人民共和国环境保护部. GB 11607—1989 渔业水质标准[S]. 北京:中国标准出版社, 1989.
- Ministry of Environmental protection of the people's republic of China. GB 11607—1989 Water quality standard for fisheries[S]. Beijing: China Standards Press, 1989.
- [24] 中华人民共和国农业部. NY 5052—2001 无公害食品 海水养殖用水水质[S]. 北京:中国标准出版社, 2001.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY 5052—2001 Non-environmental pollution of sea water in aquatics[S]. Beijing: China Standards Press, 2001.
- [25] 中华人民共和国环境保护部. GB 3097—1997 海水水质标准[S]. 北京:中国标准出版社, 1997.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of Chi-

- na. GB 3097—1997 Sea water quality standard[S]. Beijing: China Standards Press, 1997.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 18668—2002 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 18668—2002 Marine sediment quality[S]. Beijing: China Standards Press, 2002.
- [27] 江苏省海洋与渔业局. 2013 年江苏省海洋环境质量公报[EB/OL]. [2014-02-10].
- Jiangsu Bureau of Ocean and Fishery. Marine environment quality bulletin in Jiangsu Province in 2013[EB/OL]. [2014-02-10].
- [28] Rainbow P S, Luoma S N. Metal toxicity, uptake and bioaccumulation in aquatic invertebrates—modelling zinc in crustaceans[J]. *Aquatic Toxicology*, 2001, 105(3):455–465.
- [29] Blackmore G, Wang W X. Uptake and efflux of Cd and Zn by the green mussel *Perna viridis* after metal pre-exposure[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(5):989–995.
- [30] Rainbow P S. Biomonitoring of heavy metal availability in the marine environment[J]. *Mar Pollut Bull*, 1995, 31(4–12):183–192.
- [31] 励建荣, 李学鹏, 王 丽, 等. 贝类对重金属的吸收转运与累积规律研究进展[J]. 水产科学, 2007, 26(1):21–55.
- LI Jian-rong, LI Xue-peng, WANG Li, et al. Advances in uptake, transportation and bioaccumulation of heavy metal ions in bivalves[J]. *Fisheries Science*, 2007, 26(1):21–55.
- [32] 国家海洋局. 2013 年中国海洋环境状况公报[EB/OL]. [2014-03-26]. [http://www.mlr.gov.cn/zwgk/tjxx/201403/t20140326\\_1309171.htm](http://www.mlr.gov.cn/zwgk/tjxx/201403/t20140326_1309171.htm).
- State Oceanic Administration People's Republic of China. China's marine environment bulletin in 2013[EB/OL]. [2014-03-26]. [http://www.mlr.gov.cn/zwgk/tjxx/201403/t20140326\\_1309171.htm](http://www.mlr.gov.cn/zwgk/tjxx/201403/t20140326_1309171.htm).
- [33] Cunningham P A. The use of bivalve molluscs in heavy metal pollution research[J]. *Marine Pollution*, 1979:183–221.
- [34] 杨菲菲, 孟范平, 王 群, 等. 北部湾潮间带波纹巴非蛤的重金属污染特征与食用风险研究[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(2):60–67.
- YANG Fei-fei, MENG Fan-ping, WANG Qun, et al. Characterisation of heavy metals of *Paphia undulate* inhabiting the intertidal zone of Beibu Bay and assessment of its consumption risk[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(2):60–67.
- [35] 张 春. 射阳港物流现状及对策[J]. 物流科技, 2012(11):74–76.
- ZHANG Chun. A brief analysis on the present situation and the development strategies of Sheyang port logistics[J]. *Logistics Science and Technology*, 2012(11):74–76.
- [36] 钱 华. 环境铅污染来源及其对人体健康的影响[J]. 环境监测管理 与技术, 1998, 10(6):14–17.
- QIAN Hua. Sources of lead pollution and effects on human health[J]. *Monitoring Management and Technology of Environment*, 1998, 10(6):14–17.
- [37] JECFA. Summary and conclusions of the 61st meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives[R]. Italy, 2003.
- [38] Li Y, Yu Z M, Song X X, et al. Trace metal concentrations in suspended particles, sediments and clams (*Ruditapes philippinarum*) from Jiaozhou Bay of China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 121(1):491–501.
- [39] Li J, Huang Z Y, Hu Y, et al. Potential risk assessment of heavy metals by consuming shellfish collected from Xiamen, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(5):2937–2947.
- [40] Fang Z Q, Cheung R Y, Wong M H. Heavy metal concentrations in edible bivalves and gastropods available in major markets of the Pearl River Delta[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2001, 13(2):210–217.
- [41] Franco J, Borja A, Solaun O, et al. Heavy metals in molluscs from the Basque Coast (Northern Spain): Results from an 11-year monitoring programme[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 44(9):973–976.
- [42] Alyahya H, El-Gendy A H, Farraj S A, et al. Evaluation of heavy metal pollution in the Arabian Gulf using the clam *Meretrix meretrix* Linnaeus, 1758[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2011, 214(1):499–507.
- [43] Maanan M. Heavy metal concentrations in marine molluscs from the Moroccan coastal region[J]. *Environment Pollution*, 2008, 153(1):176–183.
- [44] El-Sikaily A, Khaled A, El-Nemr A. Heavy metals monitoring using bivalves from Mediterranean Sea and Red Sea[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004, 98(1):41–58.
- [45] Yap C K, Ahmad I, Tan S G. Heavy metal (Cd, Cu, Pb and Zn) concentrations in the green-lipped mussel *Perna viridis* (Linnaeus) collected from some wild and aquacultural sites in the west coast of Peninsular Malaysia[J]. *Food Chemistry*, 2004, 84(4):569–575.