厦金海域珊瑚体内重金属水平和分布特征

宋倩倩[2], 刘佳英[1, 2], 倪　智[2], 王海洋[2], 陆志强[1, 2]

(1. 福建省海洋渔业资源与生态环境重点实验室, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学 水产学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用电感耦合等离子体质谱仪测定了厦金海域 8 种珊瑚中 Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sn、Sb、Pb 重金属的含量, 通过数据处理、主成分分析方法, 分析了重金属分布特征和其主要来源。采用单因子污染指数法对珊瑚重金属的污染水平进行了评价。结果表明, 其平均浓度水平从大到小依次为: Zn>Mn>Sn>Cr>Cu>As>Ni>Pb>Sb>Cd>Co。在 8 种珊瑚中, 星柳珊瑚(*Astrogrogia* sp.)、等柳珊瑚(*Paris fruticosa*)、*Paraplexaura* sp.的重金属含量较高, 花柳珊瑚(*Anthogorgia* sp.)和 *Guaiagorgia anas* 的含量较低。台湾海域珊瑚中 Cu、Zn、Pb、Ni 的含量、委内瑞拉海域珊瑚中 Zn、Pb、Ni 的含量远高于厦金海域珊瑚体内相同重金属含量, 大堡礁珊瑚中 Cu 含量较厦金海域的略高。通过相关性分析发现, Cr、Co、Ni、Zn 和 Sn 的种间差异较为显著。根据主成分分析, 厦金海域珊瑚体内重金属元素可能的污染来源有: 农业污染、港口生活污水和工业污水的排放、船舶油漆、涂料侵蚀、电镀工业。单因子污染指数法评价结果表明, 6 种重金属元素中, 大佰屿、白哈礁和角屿的主要污染物是 Mn。白哈礁、大佰屿站位的珊瑚体内重金属 Mn 处于重度污染水平, 角屿站位的处于中度污染水平。

关键词: 重金属; 珊瑚; 分布特征; 厦金海域; 污染水平

中图分类号: P514^{+}.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2018)08-0098-09

DOI: 10.11759/hykx20180527001

重金属广泛存在于自然界中, 能够通过河流、陆源污水以及大气输入进入邻近海域并在沉积物中长期稳定存在[1], 过量的重金属将严重影响水生生物的生命活动。

张启军对黄河三角洲湿地自然保护区各营养级生物进行重金属含量研究, 发现重金属的累积随食物链等级的升高而放大, 有沿生物营养级而递增的趋势[2]。重金属还能通过食物链进入人体, 对人体多个系统造成严重危害[3-6]。刘金玲等[7]以鱼类为污染指示物分析海南珊瑚礁区重金属污染现状, 结果表明 Cr 的污染严重, As 中度污染, Mg、Cu、Zn、Pb、Hg 基本无污染或轻度污染。曾龄颐等[8]对湘江流域长沙段底栖鱼类鲶鱼、鲫鱼的研究表明, 它们已受到 Cr、Pb、As 的污染, 污染程度大于上层鱼类, 达不到无公害水产品的要求。珊瑚属于低等生物, 研究珊瑚中的重金属含量更能反映周围海域重金属污染状况。

国外学者在 20 世纪 70 年代就开展了对珊瑚体内重金属的研究, 主要集中关注重金属对珊瑚生理活动的影响, 通过珊瑚骨骼记录重金属的年际变化, 以及不同种类的珊瑚和珊瑚的不同组织富集重金属的能力等方面的研究。研究表明珊瑚对重金属有富集效应[9], 重金属会对珊瑚的新陈代谢、摄食行为、受精等活动造成影响, 甚至造成白化现象[10-13]。珊瑚作为全球环境变化的载体, 同时也赋存了表征污染指标的重要信息[4]。近年来, 众多学者以珊瑚作为研究污染变化的载体, 研究珊瑚骨骼中重金属的含量来判断其周围环境重金属(Cu、Pb 和 Cd)污染状况[5, 14-16]。Grigg[17]研究发现美国檀香山 Mamala 海湾珊瑚的重金属含量偏高, 是由于生活污水的排放对珊瑚污染较严重, 在 1977 年以后, 生活污水得到处理后, 海洋环境重金属污染状况得到改善, 珊瑚体内的重金属含量随之下降。

国内学者在 21 世纪初才开始以珊瑚为研究对象研究重金属污染。关于珊瑚体内重金属的研究主要

收稿日期: 2018-05-27; 修回日期: 2018-08-16

基金项目: 福建省自然科学基金项目(No.2015J01169); 厦门南方海洋研究中心基金项目(13GQT001NF14)

[Foundation: National Natural Science Foundation of Fujian Provincial (No.2015J01169), Southern Marine Research Center Foundation of Xiamen (No.13GQT001NF14)]

作者简介: 宋倩倩(1993-), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 珊瑚重金属, 电话: 13110937245, E-mail: 965396306@qq.com; 刘佳英, 通信作者, 电话: 13338369030, E-mail: 765276310@qq.com

集中在分析珊瑚体内重金属含量及当地海域重金属水平、珊瑚对不同重金属的富集能力、重金属对珊瑚的毒性效应等。彭绍宏等[18]报道各重金属离子对侧扁软柳珊瑚的危害程度大致上呈现出 Cu^{2+}>Pb^{2+}>Zn^{2+}>Cd^{2+}的趋势，严重影响珊瑚的生理及摄食行为。周洁等[19]发现随着 Cu 浓度增加会导致石珊瑚白化，触手伸展活动出现异常，甚至导致块状珊瑚死亡。

彭加喜研究表明西沙永兴岛珊瑚骨骼中 Zn、Mn、Cu 污染较严重，Ni 与 Cd 污染较轻[9]。黄克莉对台湾北部近岸柳珊瑚进行 18 种重金属检测，发现 Ca 、Zn、Cu、Al、Fe 及 Mn 含量较高[20]。彭子成等[4]研究广东省白县大放鸡岛的滨珊瑚的重金属含量，发现 Ni 和 Zn 含量年际变化有递增趋势，且平均值较高，认为该地区珊瑚已经受到明显污染，推测与电镀、冶金、采矿、水产加工等行业的发展有关。三亚滨珊瑚重金属质量分数清楚地揭示了 20 余年来三亚湾海水重金属污染的变化状况，重金属浓度明显高于开放大洋的浓度，受到三亚市工业和生活污染物排放的影响[21]。由此可以看出，我国部分地区的珊瑚存在一定的重金属污染状况，需引起相应重视。

厦门海域海洋生物资源丰富，物种多样，黄晖等对厦门湾口(镇海角和浯屿处)柳珊瑚进行调查，共发现 4 科 7 属 9 种柳珊瑚 [22]。本研究采样点在厦金海域的白哈礁、角屿及大佰屿附近，位于 24°31′~24°34′N, 118°22′~118°27′E。

本研究对厦金海域采集的 8 种珊瑚中的 11 种重金属(Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sn、Sb、Pb)含量水平进行检测和分析，并将结果与其他地区珊瑚体内重金属的含量进行了比较，进一步探讨了重金属间的相关性和重金属来源。利用单因子污染指数法，对厦金海域珊瑚重金属进行生态风险评价。研究结果可明晰厦金海域珊瑚资源的重金属含量水平和重金属污染的潜在风险，为厦金海域珊瑚资源的保护与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

白哈礁(24°31′N, 118°22′E)，位于大嶝、金门正中间[23]。目前白哈礁是无人礁，夏秋季节，有游客、钓客自行租船登礁以及在礁石周边水域游玩。白哈礁四周水域辽阔，盛产石斑鱼、黄花鱼、对虾等，国家一级保护动物中华白海豚也常在这一带出没，此外在白哈礁三面礁盘上分布着数量众多的底栖生物，包括珊瑚、海星、海蛇尾、海百合等。

大佰屿(24°34′N, 118°27′E)，为大陆岛，由变质岩组成，表层为黄土砂质，植被发育，以木麻黄为主。海岸为基岩岸滩，间有沙质岸、人工石砌护岸。目前大佰屿上只有一对夫妻常年看守在岛上，夏秋季节，有游客、钓客自行租船登岛以及在岛屿周边水域游玩。大佰屿西南部多暗礁，为航行危险区域，却是珊瑚的乐园。

角屿(24°32′N, 118°24′E)，面积 0.19 km^2，位于福建省厦门市东南端。岛上有驻军，但是不对外开放。该岛距离大金门岛只有 2.3 km，最低潮时，与金门岛的马山哨所附近的陆地距离仅有 1.8 km。角屿周边礁盘众多，有珊瑚分布生长。

2017.07.02-2017.07.03 在厦门白哈礁 BH1、BH2、BH3、BH4，角屿 JY1，大佰屿 DB1、DB2、DB3、DB4、DB5 这 10 个站点采集 54 个珊瑚样品，经鉴定有 8 种珊瑚，分别是花柳珊瑚(*Anthogorgia* sp.)、星柳珊瑚(*Astrogrogia* sp.)、等柳珊瑚(*Paris fruticosa*)、小月柳珊瑚(*Menella* sp.)、*Paraplexaura* sp.、*Guaiagorgia anas*、瘦枝珊瑚(*Carijoa* sp.)、刺柳珊瑚(*Echinogorgia* sp.)，采样点具体位置如图 1 所示。

通过潜水采集活珊瑚，用软刷清除样品上的污泥，并用海水清洗干净，放入盛有海水的塑料箱内，待回到实验室后，用去离子水清洗干净样品，记录每株样品的长度和宽度，并对其编号拍照。样品放入聚乙烯袋中，挤出袋内空气密封，–20℃冷冻保存至分析。

1.2 样品的处理

用去离子水清洗珊瑚后，取 5~10 g 珊瑚样品放进烘箱烘干。经玛瑙研钵研磨后过尼龙筛，放入聚乙烯袋中待用。

对珊瑚样品重金属的消解方法及质量控制参照国家海洋监测规范-生物体分析(GB 17378.6-2007)[24]。使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)检测 Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sn、Sb、Pb 这 11 种元素的含量，工作条件见表 1。仪器检出限在 0.0002~0.035 μg/g 之间。采用中国计量科学研究院生产的标准物质进行质量控制。标准参考物质回收率均在 90%~110% 之间，平行样的相对标准偏差<10%。

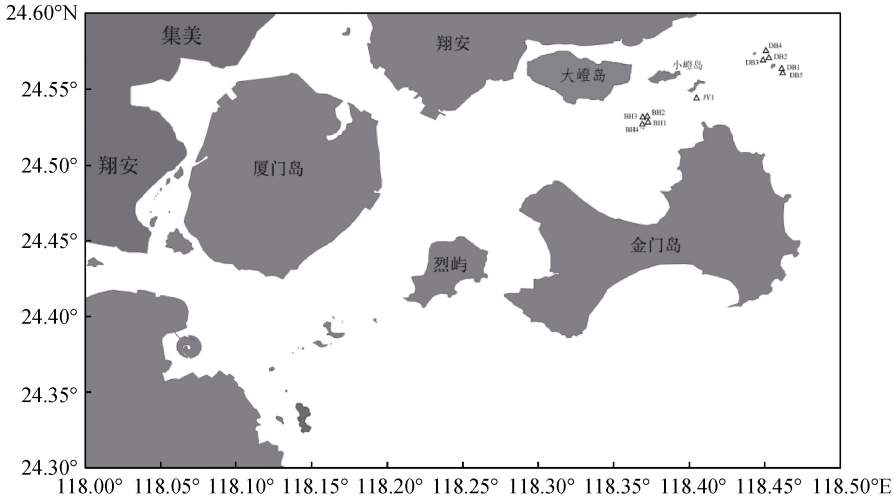


图 1　采样站位图

Fig.1　Map of sampling sites

表 1　电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)的工作参数

Tab. 1　Operating parameters of ICP-MS

项目	参数	项目	参数
等离子射频功率	1260 W	雾化室温度	2℃
等离子气	16 L/min	蠕动泵速率	0.1 r/s
载气速率	1.09 L/min	重复次数	3
采样深度	5.8 mm	分析模式	全定量
采样锥直径	1.0 mm	截取锥直径	0.4 mm

2　结果与讨论

2.1　重金属在珊瑚体中的浓度水平及分布特征

对采集的 8 种珊瑚进行重金属含量分析, 发现珊瑚中 11 种重金属元素的含量呈现不同水平, 具体见表 2。

表 2　8 种珊瑚体内 11 种金属含量检测结果(μg/g)

Tab.2　Concentration ranges and median of 11 metals in eight coral species (μg/g)

种类	*Anthogorgia* sp.	*Menella* sp.	*Guaiagorgia anas*	*Astrogrogia* sp.	*Carijoa* sp.	*Paris fruticosa*	*Paraplexaura* sp.	*Echinogorgia* sp.
Cr	0.75±0.30	1.69±1.53	1.24±1.02	1.52±0.08	1.98±0.89	1.28±0.11	2.18±1.51	0.99±0.52
Mn	3.28±2.65	13.24±2.79	4.90±6.27	14.64±0.57	10.69±4.53	8.73±3.94	8.46±5.23	6.79±6.19
Co	ND	0.01±0.01	0.03±0.04	0.11±0.02	0.09±0.04	0.05±0.05	0.01±0.02	0.01±0.02
Ni	0.20±0.07	0.34±0.12	0.22±0.12	0.55±0.08	0.39±0.16	0.44±0.11	0.62±0.53	0.26±0.14
Cu	0.29±0.07	0.87±0.34	0.12±0.08	1.08±0.21	0.34±0.28	0.86±0.25	0.87±0.70	0.72±0.69
Zn	2.95±2.13	11.85±1.46	2.19±1.27	20.68±5.73	1.48±0.89	12.62±8.47	11.12±7.11	11.04±9.49
As	0.22±0.01	0.52±0.08	0.14±0.03	0.53±0.10	0.14±0.02	0.62±0.18	0.40±0.22	0.46±0.38
Cd	0.07±0.03	0.21±0.06	0.05±0.02	0.23±0.05	0.04±0.02	0.19±0.14	0.15±0.09	0.21±0.16
Sn	1.58±0.51	3.28±0.38	0.78±0.26	4.37±0.64	1.52±0.98	3.37±1.17	2.49±1.17	2.05±1.29
Sb	ND	ND	ND	0.59±0.10	ND	0.74±0.17	0.33±0.48	0.37±0.49
Pb	0.19±0.03	0.50±0.24	0.14±0.12	0.46±0.09	0.24±0.09	0.51±0.27	0.30±0.21	0.31±0.35
样本数	3	3	3	3	6	6	9	21

注: ND 表示含量低于仪器的检出限

11 种重金属的平均浓度由高到低依次为: Zn> Mn>Sn>Cr>Cu>As>Ni>Pb>Sb>Cd>Co。计算 8 种珊瑚的重金属含量, 发现同一重金属在不同的珊瑚种类中含量也有差异。星柳珊瑚体内 Zn、Mn、Sn、Cu、Cd 和 Co 的含量最高, 排第一位, 等柳珊瑚的体内 As、Pb、Sb 含量最高, *Paraplexaura* sp.珊瑚体内 Cr、Ni 两种重金属的含量最高。而花柳珊瑚体内 Mn、Cr、Ni、Co 含量最低, *Guaiagorgia anas* 珊瑚体内 Sn、Cu、As、Pb 含量最低。

2.2 与其他地区珊瑚体内重金属含量比较

厦金海域珊瑚体内 5 种重金属 Cu、Zn、Cr、Pb、及 Ni 的含量与大堡礁、委内瑞拉海域以及台湾北部海域的珊瑚体内相同金属分析值进行比较, 见表 3。

由表可以看出, 台湾海域珊瑚中 Cu、Zn、Pb、Ni 的含量、委内瑞拉海域珊瑚中 Zn、Pb、Ni 的含量远高于厦金海域珊瑚体内相同重金属含量, 大堡礁珊瑚中 Cu 含量较厦金海域的略高。

2.3 重金属含量的相关性分析

对 8 种珊瑚体内 11 种重金属含量进行方差齐性检验, 发现只有 Pb 符合方差齐性, 用单因素 ANOVA 方法 LSD 分析 Pb 的均值差异(显著水平取 P=0.05), 发现 Pb 的含量差异不显著, 表明 Pb 的种间差异不显著。对其余 10 种元素运用方差齐性检验不相等的分析方法 Tamhane's T2 进行分析发现, Cr、Co、Ni、Zn 和 Sn 在 8 种珊瑚中的含量差异较为显著(P<0.01), Mn、Cu、As 及 Sb 次之(0.01<P<0.05), 而 8 种珊瑚中的 Cd 则无明显差异(P>0.05)。

用 Pearson 方法, 对厦金海域的 8 种珊瑚体内的重金属进行分析, 结果如表 4 所示。

表 3 不同地区珊瑚体内重金属含量水平(μg/g)

Tab. 3 Average concentrations of heavy metals in different corals from different locations (μg/g)

地区	种类	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni	文献
大堡礁	*Gorgonian* sp. 1	2.8	2.9	0.78	<0.60	<0.29	[25]
	Gorgonian sp. 2	4.3	12.2	3.0	<0.67	<0.32	
委内瑞拉	*Gorgoniaventalina*	2.1±0.3	59±18	0.9±0.1	5.1±0.3	38±2	[26]
	Gorgoniaventalina	2.6±0.6	264±57	1.50±0.03	2.3±0.2	11.5±1.4	
台湾北部海域	*Subergorgiasuberosa*	2.51±0.37	18.4±1.5	0.44±0.03	0.60±0.05	6.30±0.27	[20]
	Echinogorgiacomplexa	81.7±8.9	249±44	1.89±0.14	1.30±0.11	5.47±0.15	
	Echinogorgiareticulata	83±13	201±18	0.93±0.11	1.60±0.18	7.58±0.29	
厦金海域	*Anthogorgia* sp.	0.29±0.07	2.95±2.13	0.75±0.30	0.19±0.03	0.20±0.07	本研究
	Menella sp.	0.87±0.34	11.85±1.46	1.69±1.53	0.50±0.24	0.34±0.12	
	Guaiagorgia anas	0.12±0.08	2.19±1.27	1.24±1.02	0.14±0.12	0.22±0.12	
	Astrogrogia sp.	1.08±0.21	20.68±5.73	1.52±0.08	0.46±0.09	0.55±0.08	
	Carijoa sp.	0.34±0.28	1.48±0.89	1.98±0.89	0.24±0.09	0.39±0.16	
	Paris fruticosa	0.86±0.25	12.62±8.47	1.28±0.11	0.51±0.27	0.44±0.11	
	Paraplexaura sp.	0.87±0.55	11.12±4.71	2.18±1.56	0.30±0.15	0.62±0.54	
	Echinogorgia sp.	0.72±0.69	11.04±9.49	0.99±0.52	0.31±0.35	0.26±0.14	

表 4 各因子间相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients of each heavy metal

	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sn	Sb	Pb
Cr	1	0.571**	0.423**	0.803**	0.378**	0.283*	0.206	0.151	0.282*	0.331*	0.332*
Mn		1	0.704**	0.608**	0.655**	0.595**	0.510**	0.517**	0.643**	0.607**	0.589**
Co			1	0.396**	0.316*	0.403**	0.272	0.266	0.397**	0.330*	0.389**
Ni				1	0.439**	0.418**	0.327*	0.236	0.503**	0.543**	0.434**
Cu					1	0.795**	0.758**	0.763**	0.680**	0.660**	0.551**
Zn						1	0.884**	0.911**	0.704**	0.673**	0.627**
As							1	0.889**	0.695**	0.682**	0.691**
Cd								1	0.589**	0.634**	0.648**
Sn									1	0.603**	0.562**
Sb										1	0.618**
Pb											1

注: **. P<0.01, 极显著相关; *. P<0.05, 显著相关

多种元素之间极显著相关(P<0.01), 部分显著相关(P<0.05), 表明这些重金属元素之间具有同源性, 只有 Cr 和 As、Cd 相关性较差, Co 和 As、Cd 的相关性较差, Ni 和 Cd 的相关性较差, 表明它们的来源不同, 具体的原因还有待近一步探索。

珊瑚种类不同, 对重金属的富集能力会有差异, 具体表现在有些珊瑚种类在污染严重的地方也能生存, 而有些种类对环境的各种指标要求苛刻, 另外可能跟自身生长状况、生存年限等有关, 珊瑚对重金属具体的富集机制还有待进一步研究。珊瑚中重金属含量存在地域差异, 跟珊瑚生长环境有关, 在其他因素相同的情况下, 周围环境重金属污染严重的区域珊瑚体内重金属含量会较高。

2.4 主成分分析

影响珊瑚体内重金属含量的环境因子有很多, 为了具体分析厦金海域珊瑚体内重金属分布的主要控制因子, 采用了主成分分析方法。KMO 检验统计量为 0.832, Bartlett 的球形度检验 P<0.01, 说明适合做因子分析, 可以采用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)的方法以珊瑚中重金属含量为变量进行方差极大正交旋转后得出主成分分析计算结果, 分析珊瑚中重金属的来源。如表 5 所示, 珊瑚体内的 11 种重金属(11 个变量)的全部信息可由 2 个主成分(特值: 5.136+3.061=8.197 个变量)反映 75.514%, 即可以反映出全部数据的大部分信息。

表 5 珊瑚重金属来源主成分分析结果

Tab. 5 Results of principal component analysis for heavy metal sources in the coral

项目	第一主成分	第二主成分
特征值	5.136	3.061
贡献率/%	47.690	27.824
累计贡献率/%	47.690	75.514
Cr	0.055	0.886
Mn	0.511	0.725
Co	0.232	0.664
Ni	0.222	0.857
Cu	0.809	0.315
Zn	0.911	0.229
As	0.942	0.110
Cd	0.943	0.044
Sn	0.717	0.3745
Sb	0.714	0.382
Pb	0.695	0.350

第一成分的贡献率为 47.690%, 因子变量在 Cd、As、Zn、Cu 的浓度上有较高的正载荷。Chen 等[27]研究发现, 土壤中 Cd、Cu 和 Zn 含量与总磷含量呈一定程度的相关性, 并认为化肥与农药的施用是 Cd、Cu 和 Zn 的来源。李玉等[28]研究结果显示, 连云港近岸海域沉积物中 Cu 与 Zn 来自于周边工业排污和生活污水的污染, As 在自然环境中极少, 是化肥和农药的重要组成部分, 表明其来自工农业和生活污水的排放所致。彭加喜等[9]对珊瑚中 Cu、Zn 的来源渠道进行探讨, 认为两种重金属污染主要来源于船舶的侵蚀、防污漆、防腐涂料、港口以及污水。由于本研究采样区周边陆地主要有大嶝岛、小嶝岛、大金门岛、南安市、晋江市、石狮市, 该海域周边码头众多, 有多条航道, 而且来往渔船、采砂船只众多; 大嶝岛填海造地, 厦门翔安新机场建设等人类活动频繁, 南安市、晋江市、石狮市的石材、水暖、卫浴及服装、鞋帽生产企业众多, 因此第一主成分代表着珊瑚重金属可能来源于农业污染、港口生活污水和工业污水的排放、船舶油漆、涂料被侵蚀脱落等。

第二主成分的贡献率是 27.824%, 因子变量在 Cr、Ni、Mn 的浓度上有较高的正载荷。姚晓飞等[29] Cr、Ni 主要来源于制造合金和电镀行业。张婧等[30]研究表明 Ni、Cr 主要来自城市工业污水, 如电镀工业。锰及其化合物作为原料也被广泛用于工业中, 如电焊条的制造, 染料、油漆等。综合分析, 第二主成分可能来自于工业污水的排放。

2.5 珊瑚体内重金属生态风险评价

对于珊瑚体中重金属污染状况评价, 目前并没有权威的评价标准。本研究对珊瑚体内重金属生态风险评价选择单因子污染指数法[31], 其表达式如下:

$$P_i = C_i/S_i$$

式中, P_i 为单因子污染指数; C_i 为样品中重金属 i 的实测含量; S_i 为重金属 i 的评价标准值, 因为研究对象是珊瑚, 属于海洋生物, 所以以我国海洋生物污染评价标准中重金属的限值作为评价标准, 由于该标准中不含 Mn, 故 Mn 的评价标准参照了世界卫生组织制定的食品中重金属限值(4.00×10^{-6}, 干质量)计算, 具体结果见表 6。

根据单因子污染指数的计算结果将重金属的污染水平划分为 4 个等级: $P_i \leqslant 0.2$ 时, 表示无污染; $0.2<P_i<0.6$ 时, 表示轻度污染; $0.6 \leqslant P_i<1.0$ 时, 表示中度污染; $P_i \geqslant 1.0$ 时, 表示重度污染[7]。本研究中用单因子污染指数法计算珊瑚中重金属污染指数, 具体结果见表 7。

表 6　珊瑚中重金属含量(μg/g)
Tab. 6　Concentrations of heavy metals in corals (μg/g)

元素	Cr	Mn	Cu	Zn	As	Pb
白哈礁	1.09±0.79	4.77±4.60	0.22±0.18	2.93±1.55	0.16±0.04	0.13±0.09
角屿	0.75±0.30	3.28±2.65	0.29±0.07	2.95±2.13	0.22±0.01	0.19±0.03
大佰屿	1.74±1.00	11.82±4.16	1.15±0.45	16.68±6.87	0.66±0.23	0.51±0.26
海洋生物污染评价标准	6		80	160	20	8
WHO		4				

注: 各类标准均按照 4∶1 换算为干质标准

表 7　珊瑚中重金属污染指数
Tab. 7　Pollution index of heavy metals in the corals

元素	Cr	Mn	Cu	Zn	As	Pb
白哈礁	0.18	1.19	0.00	0.02	0.01	0.02
角屿	0.13	0.82	0.00	0.02	0.01	0.02
大佰屿	0.29	2.96	0.01	0.10	0.03	0.06
平均 P_i	0.20	1.66	0.01	0.05	0.02	0.03

白哈礁珊瑚中 Mn 的 P_i>1, 属于重度污染; 角屿珊瑚中 Mn 的 P_i 在 0.6~1.0, 属于中度污染; 大佰屿珊瑚中 Cr 介于 0.2~0.6 属于轻度污染, Mn 的 P_i>1, 属于重度污染; 三个采样点相比, 大佰屿比白哈礁和角屿的污染稍微严重。大佰屿位于围头湾, 处于泉金航线的中途, 更靠近南安市、晋江市、石狮市, 生产企业众多, 可能受工业污染严重, 与主成分分析结果相符。从 3 个采样点的平均 P_i 来看, 6 种重金属元素中, Cr 属于轻度污染水平, Mn 属于重度污染水平。说明厦金海域目前重金属 Mn 污染较为严重, 重金属 Cr 虽然属于轻度污染水平, 但需要相关管理部门引起重视, 加强管理, 避免其污染水平加重。

3　结论

(1) 在厦金海域采集的 8 种珊瑚中, 11 种重金属的平均浓度水平从大到小依次为: Zn>Mn>Sn>Cr>Cu>As>Ni>Pb>Sb>Cd>Co。星柳珊瑚、等柳珊瑚、*Paraplexaura* sp.的重金属含量较高, 花柳珊瑚和 *Guaiagorgia anas* 的含量较低。

(2) 台湾海域珊瑚中 Cu、Zn、Pb、Ni 的含量、委内瑞拉海域珊瑚中 Zn、Pb、Ni 的含量远高于厦金海域珊瑚体内相同重金属含量, 大堡礁珊瑚中 Cu 含量较厦金海域的略高。

(3) 通过相关性分析发现, Cr、Co、Ni、Zn 和 Sn 的种间差异较为显著。除 Cr 和 As、Cd、Co 和 As、Cd、Ni 和 Cd 外, 其余各重金属元素相互之间有相同的来源。根据主成分分析, 重金属元素可能的来源有: 农业污染、港口生活污水和工业污水的排放、船舶油漆、涂料被侵蚀脱落等。

(4) 大佰屿、白哈礁和角屿的主要污染物是 Mn。白哈礁、大佰屿站位的珊瑚体内重金属 Mn 处于重度污染水平, 角屿站位的处于中度污染水平。

参考文献:

[1] Mccready S, Birch G F, Long E R. Metallic and organic contaminants in sediments of Sydney Harbour, Australia and vicinity-- a chemical dataset for evaluating sediment quality guidelines[J]. Environment International.2006, 32(4): 455-465.

[2] 张启军. 黄河三角洲湿地重金属沿食物链富集研究[C]//全国环境化学大会. 第五届全国环境化学大会摘要集. 北京: 全国环境化学大会, 2009.
Zhang Qijun. Study on the enrichment of heavy metals along the food chain in the wetland of the Yellow River Delta[C]//National Conference on Environmental Chemistry. Summary of the 5th National Conference on Environmental Chemistry. Beijing: National Conference on Environmental Chemistry, 2009.

[3] 马静, 魏益民, 郭波莉, 等. 铅对人体和动物毒性作用[J]. 中国公共卫生, 2009, 25(3): 369-370.
Ma Jing, Wei Yimin, Guo Boli, et al. Toxic effects of lead on humans and animals[J]. Chinese Journal of Publis Health, 2009, 25(3): 369-370.

[4] 彭子成, 刘军华, 刘桂建, 等. 广东省电白县大放鸡岛滨珊瑚的重金属含量及其意义[J]. 海洋地质动态. 2003, 19(11): 5-12.
Peng Zicheng, Liu Junhua, Liu Guijian, et al. Interannual variability of the heavy metal contents in the

poriteslutea coral from Dafangji Island of Dianbai County and their implications[J]. Marine Geology Letters, 2003, 19(11): 5-12.

[5] 程继满, 周韫韬, 刘羿, 等. 海南岛龙湾港滨珊瑚重金属含量的年际变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(1): 11-18.
Cheng Jiman, Zhou Yuntao, Liu Yi, et al. Annual variability of heavy metal contents in the poriteslutea from the Longwan Bay, Hainan Province, China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(1): 11-18.

[6] 陈志良, 莫大伦, 仇荣亮. 镉污染对生物有机体的危害及防治对策[J]. 环境保护科学, 2001, 4(27): 37-39.
Chen Zhiliang, Mo Dalun, QiuRongliang. Biologial Damage of Soil Cadmium (Cd) Pollution and Its Control[J]. Environmental Protection Science, 2001, 4(27): 37-39.

[7] 刘金铃, 徐向荣, 丁振华, 等. 海南珊瑚礁区鱼体中重金属污染特征及生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(2): 262-266.
Liu Jinling, Xu Xiangrong, Ding Zhenhua, et al. Heavy metals contamination in fish from coral reef ecosystem and ecology risk evaluation[J]. Marine Environmental Science, 2013, 32(2): 262-266.

[8] 曾龄颐, 李文丽, 黎瑛.湘江流域长沙段鱼类重金属污染情况分析与评价[J]. 轻工科技, 2012, 9: 94-95.
Zeng Lingyi, Li Wenli, Li ying. Analysis and evaluation of heavy metal pollution of fish in Changsha section of Xiangjiang River.[J]. Light Industry Science and Technology, 2012, 9: 94-95.

[9] 彭加喜, 刘金铃, 徐向荣, 等. 西沙永兴岛珊瑚重金属水平及其富集效应[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(6): 848-853.
Peng Jiaxi, Liu Jinling, Xu Xiangrong, et al. Heavy metal levels in coral skeletons from Yongxing Island and their enrichment effects[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(6): 848-853.

[10] Livingston H D T G. Trace element concentrations in some modern corals[J]. Limnology & Oceanography, 1971, 16(5): 786-796.

[11] Howard L S, Crosby D G, Alino P. Evaluation of some methods for quantitatively assessing the toxicity of heavy metals to corals[J]. Coral Reef Population Biology, 1986, 452-464.

[12] Heyward A. Inhibitory effects of copper and zinc sulphates on fertilization in corals [J]. Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium, 1988, 2: 299-303.

[13] Reichelt-Brushett A J, Harrison P L. The effect of copper, zinc and cadmium on fertilization success of gametes from scleractinian reef corals[J]. Marine Pollution Bulletin, 1999, 38(3): 182-187.

[14] Shen G T, Boyle E A. Lead in corals: reconstruction of historical industrial fluxes to the surface ocean[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1987, 82(3–4): 289-304.

[15] Shen G T, Boyle E A, Lea D W. Cadmium in corals as a tracer of historical upwelling and industrial fallout[J]. Nature, 1987, 328(6133): 794-796.

[16] 余克服, 陈特固, 练健生, 等. 大亚湾扁脑珊瑚中重金属的年际变化及其海洋环境指示意义[J]. 第四纪研究, 2002, 22(03): 230-235.
Yu Kefu, Chen Tegu, Lian Jiansheng, et al. Annual changes of heavy metals in coral *Platygyra* in dayabay and their marine environment implication.[J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(3): 230-235.

[17] Grigg R W. Coral reefs in an urban embayment in Hawaii: a complex case history controlled by natural and anthropogenic stress[J]. Coral Reefs, 1995, 14(4): 253-266.

[18] 彭绍宏, 黄将修, 熊同铭, 等. 四种重金属离子对侧扁软柳珊瑚的毒性及其摄食行为的影响[J]. 台湾海峡. 2004, 23(3): 293-301.
Peng Shaohong, Huang Jiangxiu, Xiong Tongming, et al. Effects of four heavy metals on toxicity and feeding behavior of soft coral (Subergorgia suberosa)[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2004, 23(3): 293-301.

[19] 周洁, 余克服, 李淑, 等. 重金属铜污染对石珊瑚生长影响的实验研究[J]. 热带海洋学报. 2011, 30(2): 57-66.
Zhou Jie, Yu Kefu, Li Shu, et al. Experimental study of the impact of heavy metal copper on reef coral growth[J]. Journal of Tropical Oceanography. 2011, 30(2): 57-66.

[20] 黄克莉, 黄将修, 黄慕也. 台湾北部近岸海域柳珊瑚体内金属累积的研究[J]. 台湾海峡. 2003, 22(3): 311-318.
Huang Keli, Huang Jiangxiu, Huang Muye. Bioaccumulation of metals in from coastal water of northern Taiwan Gorgonacea[J] . Journal of Oceanography in Taiwan Strait. 2003, 22(3): 311-318.

[21] 黄德银, 施祺, 张叶春. 三亚湾滨珊瑚中的重金属及环境意义[J]. 海洋环境科学. 2003, 22(3): 35-38.
Huang Deyin, ShiQi, Zhang Yechun. Contents of heavy metals in coral Porites in Sanya Bay and their environmental significance[J]. Marine Environmental Science. 2003, 22(3): 35-38.

[22] 黄晖, 李秀保, 练健生, 等. 福建厦门湾和东山湾海域柳珊瑚的物种多样性及其分布[J]. 台湾海峡, 2007, 26(01): 92-98.
Huang Hui, Li Xiubao, Lian Jiansheng, et al. Species diversity and distribution of Gorgonian (Cnidaria: Anthozoa: Octocoral) in Xiamen Bay and Dongshan Bay, Fujian. [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2007, 26(1): 92-98.

[23] 李荣冠, 江锦祥. 厦门海岛潮间带前鳃类软体动物多样性及其分布[A]. 中国贝类学会. 贝类学论文集(9)[C]. 北京: 海洋出版社. 2001.12-19.
Li Rongguan, Jiang Jinxiang. Biodiversity and distribution of Prosobranchia in intertidal zones, Xiamen Islands[A]. Chinese Shellfish Society. Transactions of the Chinese society of Malacology(9)[C]. Beijing: Ocean Press. 2001.12-19.

[24] GB 17378.6-2007 海洋监测规范第 6 部分: 生物体分析[S].
GB 17378.6-2007 The specification for marine monitoring-Part 6 Organism analysis[S].

[25] Jaffe R, Fernandez C A, Alvarado J. Trace metal analyses in octocorals by microwave acid digestion and graphite furnace atomic-absorption spectrometry[J]. Talanta., 1992, 39(2): 113-117.

[26] Guzmán H M, Jiménez C E. Contamination of coral reefs by heavy metals along the Caribbean coast of Central America (Costa Rica and Panama)[J]. Marine Pollution Bulletin, 1992, 24(11): 554-561.

[27] Chen T, Liu X, Zhu M, et al. Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban–rural transitional area of Hangzhou, China[J]. Environmental Pollution, 2008, 151(1): 67-78.

[28] 李玉, 冯志华, 李谷祺, 等. 连云港近岸海域沉积物中重金属污染来源及生态评价[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(6): 829-833.
Li Yu, Feng Zhihua, Li Guqi. et al. The estimation of source of heavy metal contamination and assessment in marine sediments in Lianyungang area[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(6): 829-833.

[29] 姚晓飞, 周岩梅, 于晓华, 等. 南沙河表层沉积物重金属污染评价及来源解析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12): 197-200.
Yao Xiaofei, Zhou Yanmei, Yu Xiaohua, et al. Pollution evaluation and source identification of heavy metals in surface sediments of Nansha river[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(12): 197-200.

[30] 张婧, 王淑秋, 谢琰, 等. 辽河水系表层沉积物中重金属分布及污染特征研究[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2413-2418.
Zhang Jing, Wang Shuqiu, Xie Yan, et al. Distribution and pollution character of heavy metals in the surface sediments in Liao river[J]. Environmental Science, 2008, 29(9): 2413-2418.

[31] 李厦, 刘宪斌, 田胜艳, 等. 天津大港近岸海域生物体内重金属、石油烃含量及其安全风险评价[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(3): 157-160.
Li Xia, Liu Xianbin, Tian Shengyan, et al. Health-threatening hazard evaluation of heavy metal and oil-residue concentration in the organisms in the offshore area in Dagang, Tianjin[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(3): 157-160.

The level and distribution of heavy metals in coral in the Xiamen-Kinmen sea area

SONG Qian-qian[2], LIUJia-ying[1, 2], NI Zhi[2], WANG Hai-yang[2], LU Zhi-qiang[1, 2]
(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Fishery Resources and Eco-environment, Xiamen 361021, China; 2. Fisheries College of Jimei University, Xiamen 361021, China)

Received: May 27, 2018
Key words: heavymetal; coral; distributioncharacteristics; Xiamen-Kinmen sea water ; pollution level

Abstract: In this study, the content of heavy metals including Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sn, Sb, and Pb in eight species of coral from the Xiamen-Kinmen Sea area was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Their distribution and sources were analyzed and explored through data processing and principal components analysis (PCA). Single factor pollution index (P_i) was employed to evaluate the heavy metal pollution level. The results showed that the level of heavy metals in the coral could be ranked from high to low as: Zn>Mn>Sn>Cr>Cu>As>Ni>Pb>Sb>Cd>Co. Among the eight species of coral, *Astrogrogia* sp. *Parisfruticosa* and *Paraplexaura* sp. had higher levels of heavy metals, while *Anthogorgia* sp. and *Guaiagorgia anas* had lower. Furthermore, the levels of Cu, Zn, Pb, and Ni in the coral of Taiwanese waters and those of Zn, Pb, and Ni in the coral of Venezuelan waters were much higher than those in the coral of the Xiamen-Kinmen Sea area. Also, the Cu content in the coral of the Great Barrier Reef was slightly higher than that in Xiamen-Kinmen Sea area coral. Correlation analysis revealed that the differences among species in levels of Cr, Co, Ni, Zn, and Sn were significant. PCA revealed that agricultural pollution, domestic sewage, ship erosion, paint erosion, and the electroplating industry were the main sources of heavy metal in all the coral. P_i indicated that among the six heavy metals, the main pollutant in the Dabaiyu, Baiha, and Jiaoyu Reefs is Mn. Heavy metal Mn in the coral of the Baiha Reef and Dabaiyu Station was at a serious pollution level, while that of the coral at Jiaoyu Station was at a moderate pollution level.

(本文编辑: 康亦兼)