

流沙湾冬、春季大型海藻的微量元素分析*

张才学 白富进 孙省利 陈春亮

(广东海洋大学海洋资源与环境监测中心 湛江 524088)

提要 采用微波消解法和 AFA、ICP-MS 对流沙湾 2008 年冬春季 21 种大型海藻的微量元素进行了分析。结果表明, As、Cu、Pb、Cr、Se、Fe、Mn 在细江藨体内含量最高, 分别为 8.90、34.35、24.26、68.12、12.04、26 777.20、400.16mg/kg; Hg 在海蕴体内含量最高, 达 6.90mg/kg; Zn 在鼠尾藻体内含量最高, 为 277.37mg/kg; Cd 在石花菜体内含量最高, 为 6.77mg/kg; Ba 在海门冬体内含量最高, 为 127.02mg/kg。各藻类对各重金属元素的综合富集能力由强到弱依次为细江藨>拟刚毛藻>水云>海蕴>鼠尾藻>海门冬>条浒苔>小珊瑚>肠浒苔>蜈蚣藻>礁膜>大石花菜>石花菜>半盐生单歧藻>团扇藻>长石莼>宽扁叉节藻>穗状鱼浒苔>喇叭菜>海头红>刚毛藻, 显示出藻类对各重金属元素综合富集能力因藻而异。各元素被藻类富集的量从大到小依次为 Fe>Mn>Ba>Zn>Cr>Cu>Pb>As>Se>Cd>Hg, 显示出藻类对营养元素的富集要大于对毒性元素的富集。各藻类对各重金属的富集系数从几倍至几十万倍不等, 最高是细江藨对 Fe 的富集, 其次为海蕴对 Hg 的富集, 最差为刚毛藻对 Se 的富集, 其富集系数分别为 204875.29、13800.00、3.48。聚类分析结果显示细江藨的富集能力最强, 是多种重金属污染海域修复的首选生态环境材料。但对重金属复合污染海域进行生物修复, 应有针对性地选择数种富集能力较强的大型海藻组成修复生物群落。

关键词 流沙湾, 大型海藻, 重金属, 富集, 生态修复

中图分类号 O657.31

大型海藻是一类多细胞的海洋孢子植物, 以基部的固着器固着于海底基质上生活, 由于其富含蛋白质、多糖、维生素 C 等营养物质和人体必需的微量元素以及卡拉胶等, 被广泛用作食品、饲料、药用、琼胶工业原料和土壤肥料等, 是非常重要的可更新资源(李宪瑾等, 2002; 徐秀丽等, 2004; 魏尊等, 2005; 杨宇峰等, 2005)。大型海藻在生长过程中能大量富集营养盐和各种微量元素, 所分泌的相生相克类化合物能够抑制其它微藻的生长, 可防止赤潮的发生, 因此, 大型海藻已经被众多沿海国家作为海洋生态环境材料, 用于海洋生态环境污染的治理和修复(刘婷婷等, 2006; 杨宇峰等, 2003; 王悠等, 2006; 徐姗姗等, 2006)。欧盟启动了 EUMAC 重大研究计划(Schramm, 1999), 美国国家海洋与大气管理局(NOAA)新近启动了内容包括大型海藻、鱼类养殖与

渔业管理研究在内的国家计划(Mcvey *et al.*, 2002), 韩国从 2002 年开始也启动了以大型海藻作为近海水域生物过滤器和生产力系统计划等(Chung *et al.*, 2002), 其目的都是为了恢复近海生态系统的服务功能, 以维持海洋资源的可持续利用。

近年来, 随着工农业的发展和沿海城市群的兴起, 各种污染物大量排放, 近岸海域污染严重, 许多海湾生态系统服务功能已严重退化, 亟需治理。但是, 我国海洋生态环境材料的研究刚刚起步, 针对不同海域污染类型, 开展新型海洋生态环境材料的筛选、性状改良、高附加值和应用技术研究, 提高我国海洋生态环境材料的研究和开发水平, 建立海洋生态环境材料的环境协调性评价方法和数据库, 开展海洋生态环境材料的生态设计(eco-design)理论和方法的研究, 是当务之急。

* 广东省自主创新重大科技专项, 2007A032600004 号。张才学, 副教授, E-mail: zhangcx@gdou.edu.cn

通讯作者: 孙省利, 教授, E-mail: xinglsun@126.com

收稿日期: 2008-12-23, 收修改稿日期: 2009-03-15

流沙湾位于中国雷州半岛西南部徐闻县西部、雷州市西南部交界处, 海湾面积约 69km², 是我国著名的海水珍珠养殖生产基地和南珠中心, 也是我国最大的海藻库, 拥有海草场共约 800—900 公顷, 海藻种类非常丰富, 在全国乃至全亚洲都是数量有限的海草场, 有关专家已建议建立流沙湾海草示范保护区, 保护这片难得的“海底绿洲”(http://bbs.xwie.com/readhtm/tid-32879-page-e-fpage-1.html)。藻类是一类具有较强富集能力的植物, 它可以从周围浓度很低的水环境中富集营养盐和金属元素(王夔, 1988), 目前对藻类富集金属等微量元素的研究多集中在单细胞藻类(陈必链等, 1998; 李日强等, 2001), 大型海藻对金属元素的富集也仅局限于少数几种元素, 有关大型海藻对多种微量元素富集能力的研究鲜见报道, 本文通过对流沙湾冬春季大型海藻优势种类重金属等微量元素的分析, 借以充实我国海洋生态环境材料数据库, 寻找适用于生态环境修复的优良品种, 为海洋环境污染治理和生态修复提供基础资料。

1 材料与方法

2008 年 2 月和 5 月冬、春两季分别对流沙湾大型藻类进行了调查(图 1), 冬季采集的优势种类为肠浒苔 *Enteromorpha intestinalis*、海蕴 *Nemacystis Decipiensis*、拟刚毛藻 *Cladophoropsis herpestica*、小珊瑚 *Corallina pilulifera*、鼠尾藻 *Sargassum thunbergii*、礁膜 *Monostroma nitidum*、条浒苔 *Enteromorpha clathrata*、细江篱 *Gracilaria confervuoides*、海门冬 *Asparagopsis taxiformis*、长石莼 *Ulva stenophylla*、水云 *Ectocarpus arctus*、大石花菜 *Gelidium pacificum* Okam. 等; 春季采集的优势种类为石花菜 *Gelidium*

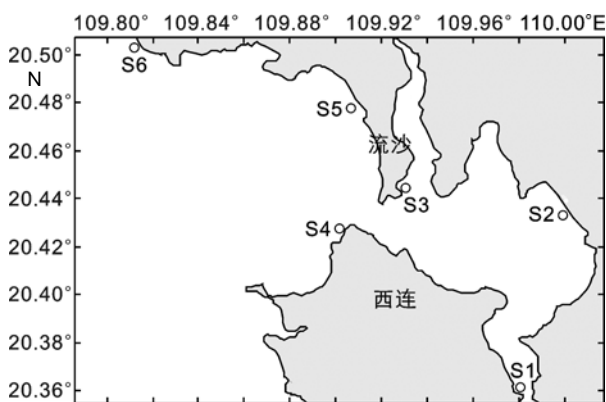


图 1 流沙湾采样点

Fig.1 Sampling stations in the Liusha Bay

amansii、宽扁叉节藻 *Amphiroa anceps* Lamouroux、团扇藻 *Padina* sp.、刚毛藻 *Cladophora* sp.、穗状鱼栖苔 *Acanthophora spicifera*、海头红 *Plocamium tel-fairiae*、蜈蚣藻 *Grateloupia filicina*、半盐生单歧藻、喇叭菜 *Turbinaria ornata* 等。用蒸馏水把采集的各优势藻类冲洗干净, 取适量于冷冻干燥器中冷冻干燥, 用玛瑙研钵研磨后过 200 目筛, 于聚乙烯袋密封备用。

分别称取已制备好的各藻类样品 0.1000g 于容量杯中进行微波消解, 消解工步为: :0.2MPa, 4min; : 0.5MPa, 2min; : 0.8MPa, 2min; : 1.0MPa, 2min; : 1.2MPa, 2min; : 1.5MPa, 5min。冷却后, 如样品为黄色溶液, 逐滴滴加 30%的 H₂O₂, 以使消解完全。将溶液移入 50ml 容量瓶中, 用蒸馏水冲洗容样杯, 洗液一并移入容量瓶, 用蒸馏水定容至标线, 同时制备分析空白。Hg 元素用原子荧光分析仪测定, As、Se、Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Fe、Mn 和 Ba 用电感耦合等离子质谱仪测定。

2 结果与分析

2.1 各大型海藻的重金属含量

经测试和分析发现, 各大型海藻体内各重金属元素的含量相差悬殊(表 1), Hg 含量最高的是海蕴, 达 6.90mg/kg, 其次为水云, 达 3.11mg/kg, 再次为细江篱, 达 2.89mg/kg, 最低为蜈蚣藻, 仅为 0.17mg/kg, 其含量最高种类是次高种类的 2 倍多, 是最低种类的 40 倍; As 含量最高的是细江篱, 达 8.90mg/kg, 其次为喇叭菜, 达 7.10mg/kg, 再次为长石莼, 达 6.28mg/kg, 拟刚毛藻为 5.39mg/kg, 最低为宽扁叉节藻, 仅为 1.05mg/kg, 各物种的含量差别不大, 最大差别仅为 8 倍; Cu 含量最高的是细江篱, 达 34.35mg/kg, 其次为水云, 达 23.58mg/kg, 再次为拟刚毛藻, 达 22.03mg/kg, 鼠尾藻为 22.00mg/kg, 最低为刚毛藻, 仅为 2.92mg/kg, 没有含量特别高的种类; Pb 含量最高的是细江篱, 达 24.26mg/kg, 其次为拟刚毛藻, 达 11.25mg/kg, 再次为水云, 达 9.39mg/kg, 最低为宽扁叉节藻, 仅为 1.65mg/kg, 其含量最高种类是次高种类的 2 倍多, 是最低种类的 14 倍; Zn 含量最高的是鼠尾藻, 达 277.37mg/kg, 其次为拟刚毛藻, 达 79.25 mg/kg, 再次为细江篱, 达 63.31mg/kg, 最低为喇叭菜, 仅为 8.23mg/kg, 含量最高种类与次高种类差别明显, 达 3 倍多, 与含量最低种类差别 33 倍; Cd 含量最高的是石花菜, 达 6.77mg/kg, 其次为鼠尾藻, 达

表 1 各大型海藻重金属的含量(mg/kg 干重)
Tab.1 Heavy mental content in each marine macroalga (mg/kg dry wt.)

种类	Hg	As	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Se	Fe	Mn	Ba	合计
条浒苔	1.80	4.82	18.77	5.57	40.08	0.45	39.79	1.65	5952.65	197.79	23.96	6287.33
肠浒苔	0.74	5.11	7.51	3.61	25.13	2.46	23.43	1.49	3583.19	83.88	75.72	3812.27
长石莼	1.01	6.28	10.23	2.01	49.78	2.71	29.63	0.94	699.29	39.34	66.23	907.45
拟刚毛藻	1.38	5.39	22.03	11.25	79.25	1.38	63.35	4.35	11615.51	227.70	96.46	12128.05
海蕴	6.90	5.30	10.89	6.69	42.53	3.13	19.11	3.41	6011.04	132.41	63.34	6304.75
小珊瑚	0.95	3.32	13.52	4.49	22.75	4.96	25.04	2.82	4099.97	248.25	72.93	4499
细江蓼	2.89	8.90	34.35	24.26	63.31	2.00	68.12	12.04	26777.20	400.16	37.73	27430.96
鼠尾藻	0.93	3.62	22.00	6.66	277.37	4.98	18.96	5.12	6134.74	158.33	71.73	6704.44
礁膜	1.07	1.61	9.04	2.49	26.84	0.16	25.52	1.23	3610.39	104.45	37.81	3820.61
海门冬	1.04	3.33	17.96	6.65	42.89	3.26	33.99	3.31	6054.67	152.11	127.02	6446.23
水云	3.11	3.74	23.58	9.39	30.91	1.72	28.95	2.97	8526.38	256.00	29.74	8916.49
大石花菜	1.08	2.19	15.66	1.84	35.77	0.32	27.62	0.70	3359.56	72.21	37.51	3554.46
蜈蚣藻	0.17	4.54	11.42	5.85	31.29	2.28	20.23	3.02	3585.74	171.15	37.20	3872.89
海头红	0.64	2.11	7.69	1.73	22.62	1.31	1.90	1.01	827.77	40.41	13.35	920.54
宽扁叉节藻	1.20	1.05	6.29	1.65	31.97	0.78	1.72	1.14	955.17	75.86	33.66	1110.49
石花菜	0.22	2.90	5.06	2.19	21.36	6.77	13.94	1.78	1313.59	101.41	47.07	1516.29
团扇藻	0.32	3.17	7.43	2.48	43.97	0.40	5.89	1.86	2404.48	39.02	10.86	2519.88
喇叭菜	0.49	7.10	3.65	1.81	8.23	0.52	12.11	0.32	724.71	28.29	25.39	812.62
穗状鱼浒苔	0.83	1.69	13.96	3.57	55.26	3.46	2.43	2.79	212.99	86.52	48.21	431.71
半盐生单歧藻	0.76	2.69	8.74	5.80	61.14	0.48	14.95	1.18	1657.79	63.13	80.94	1897.6
刚毛藻	0.83	1.11	2.92	2.46	17.06	0.15	3.33	0.28	151.98	10.65	19.10	209.87
平均值	1.35	3.81	12.99	5.35	49.02	2.08	22.86	2.54	4678.99	128.05	50.28	4957.33

4.98mg/kg, 再次为小珊瑚, 达 4.96mg/kg, 最低为刚毛藻, 仅为 0.15mg/kg, 含量最高种类与次高种类差别不大, 但与最低种类差别较大, 达 45 倍; Cr 含量最高的是细江蓼, 达 68.12mg/kg, 其次为拟刚毛藻, 达 63.35mg/kg, 再次为条浒苔, 达 39.79mg/kg, 最低为宽扁叉节藻, 仅为 1.72mg/kg, 含量最高与次高种类差别最小, 但与最低种类差别达近 40 倍; Se 含量最高的是细江蓼, 达 12.04mg/kg, 其次为鼠尾藻, 达 5.12mg/kg, 再次为拟刚毛藻, 达 4.35mg/kg, 最低为刚毛藻, 仅为 0.28mg/kg, 含量最高种类是次高种类的 2 倍多, 是最低种类的 43 倍; Fe 含量最高的是细江蓼, 达 26 777.20mg/kg, 其次为拟刚毛藻, 达 11 615.51mg/kg, 再次为水云, 达 8526.38mg/kg, 最低为刚毛藻, 仅为 151.98mg/kg, 含量最高种类是次高种类的 2 倍多, 是最低种类的 176 倍, Fe 是含量最高也是种类含量差别最大的元素; Mn 含量最高的是细江蓼, 达 400.16mg/kg, 其次为水云, 达 256.00mg/kg, 再次为小珊瑚, 达 248.25mg/kg, 最低为刚毛藻, 仅为 10.65mg/kg, 各种藻类的含量均较高;

Ba 含量最高的是海门冬, 达 127.02mg/kg, 其次为拟刚毛藻, 达 96.46mg/kg, 再次为半盐生单歧藻, 达 80.94mg/kg, 最低为团扇藻, 仅为 10.86mg/kg, 各种藻类的含量均较高且差别不大。

在所测的各重金属元素中, Fe 在各大型海藻体内含量最高, 其次为 Mn, 再次为 Ba 和 Zn, 在各大型海藻体内含量最低的是 Hg(表 1), 说明不同藻类体内各重金属元素的含量不同, 同一种藻类体内各重金属元素的含量也不同, 这可能与藻类的富集能力有关, 也可能与各种藻类不同的生理特征有关, 不同藻类对不同重金属元素的生理需求存在着差异, 在低浓度条件下, 重金属元素能促进藻类的生长, 达到一定浓度会抑制藻类的生长甚至对藻类产生毒性效应(况琪军等, 1996; 于志刚等, 1999)。

2.2 各大型海藻对重金属的富集能力

根据 2008 年冬春季流沙湾海水重金属含量的平均值计算各大型海藻对各重金属的富集系数(表 2), 结果发现, 各大型海藻体内重金属含量都高于水体中重金属的含量, 对各重金属元素的富集系数从几

表 2 各种藻类重金属的富集系数
Tab.2 Bioaccumulation coefficient of heavy metal in each alga

种类	Hg	As	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Se	Fe	Mn	Ba	合计
背景浓度 (mg/L)	0.0005	0.0016	0.0123	0.0084	0.1094	0.0009	0.0240	0.0804	0.1307	0.0490	0.0161	0.4333
条浒苔	3600.00	3012.50	1526.02	663.10	366.36	500.00	1657.92	20.52	45544.38	4036.53	1488.20	62415.53
肠浒苔	1480.00	3193.75	610.57	429.76	229.71	2733.33	976.25	18.53	27415.38	1711.84	4703.11	43502.23
长石莼	2020.00	3925.00	831.71	239.29	455.03	3011.11	1234.58	11.69	5350.34	802.86	4113.67	21995.28
拟刚毛藻	2760.00	3368.75	1791.06	1339.29	724.41	1533.33	2639.58	54.10	88871.54	4646.94	5991.30	113720.30
海蕴	13800.00	3312.50	885.37	796.43	388.76	3477.78	796.25	42.41	45991.13	2702.24	3934.16	76127.03
小珊瑚	1900.00	2075.00	1099.19	534.52	207.95	5511.11	1043.33	35.07	31369.32	5066.33	4529.81	53371.63
细江蒿	5780.00	5562.50	2792.69	2888.10	578.70	2222.22	2838.33	149.75	204875.29	8166.53	2343.48	238197.59
鼠尾藻	1860.00	2262.50	1788.62	792.86	2535.37	5533.33	790.00	63.68	46937.57	3231.22	4455.28	70250.43
礁膜	2140.00	1006.25	734.96	296.43	245.34	177.78	1063.33	15.30	27623.49	2131.63	2348.45	37782.96
海门冬	2080.00	2081.25	1460.16	791.67	392.05	3622.22	1416.25	41.17	46324.94	3104.29	7889.44	69203.44
水云	6220.00	2337.50	1917.07	1117.86	282.54	1911.11	1206.25	36.94	65236.27	5224.49	1847.20	87337.23
大石花菜	2160.00	1368.75	1273.17	219.05	326.97	355.56	1150.83	8.71	25704.36	1473.67	2329.81	36370.88
蜈蚣藻	340.00	2837.50	928.46	696.43	286.01	2533.33	842.92	37.56	27434.89	3492.86	2310.56	41740.52
海头红	1280.00	1318.75	625.20	205.95	206.76	1455.56	79.17	12.56	6333.36	824.69	829.19	13171.19
宽扁叉节藻	2400.00	656.25	511.38	196.43	292.23	866.67	71.67	14.18	7308.11	1548.16	2090.68	15955.76
石花菜	440.00	1812.50	411.38	260.71	195.25	7522.22	580.83	22.14	10050.42	2069.59	2923.60	26288.64
团扇藻	640.00	1981.25	604.07	295.24	401.92	444.44	245.42	23.13	18396.94	796.33	674.53	24503.27
喇叭菜	980.00	4437.50	296.75	215.48	75.23	577.78	504.58	3.98	5544.84	577.35	1577.02	14790.51
穗状鱼浒苔	1660.00	1056.25	1134.96	425.00	505.12	3844.44	101.25	34.70	1629.61	1765.71	2994.41	15151.45
半盐生单歧藻	1520.00	1681.25	710.57	690.48	558.87	533.33	622.92	14.68	12683.93	1288.37	5027.33	25331.73
刚毛藻	1660.00	693.75	237.40	292.86	155.94	166.67	138.75	3.48	1162.82	217.35	1186.34	5915.36

倍至几十万倍不等,富集系数最大的是细江蒿对 Fe 的富集,达 204875.29,富集系数最小的是刚毛藻对 Se 的富集,仅为 3.48。分析还发现,细江蒿对 As、Se、Cu、Pb、Cr、Fe 和 Mn 的富集能力在各大海藻中为最强,而刚毛藻对 Se、Cu、Cd、Fe、Mn 的富集能力在各大海藻中均为最差,综合各大海藻对所测重金属元素的富集能力,其由强到弱依次为细江蒿>拟刚毛藻>水云>海蕴>鼠尾藻>海门冬>条浒苔>小珊瑚>肠浒苔>蜈蚣藻>礁膜>大石花菜>石花菜>半盐生单歧藻>团扇藻>长石莼>宽扁叉节藻>穗状鱼浒苔>喇叭菜>海头红>刚毛藻;综合分析各元素被各大海藻类富集的量,其从大到小的顺序为 Fe>Mn>Ba>Zn>Cr>Cu>Pb>As>Se>Cd>Hg,富集量最大的 Fe 是富集量最小的 Hg 的 3466 倍。这与藻类对营养元素的需求和金属元素的毒性有关,海藻对营养元素的富集(如 Fe、Mn、Ba、Zn 等)要强于对毒性元素的富集(如 Cu、Pb、Cd、Hg、As 等),这也间接

说明了所测元素对大型海藻的毒性强度和大型海藻对所测元素的亲和力及其对毒性元素的耐受力。

在 Hg 污染海域,应选海蕴作为环境污染修复生物;在 As 污染海域,应选细江蒿、喇叭菜、长石莼为污染修复生物;在 Cu 污染海域,宜选细江蒿和水云为污染修复生物;在 Pb 污染海域,应选细江蒿为污染修复生物;在 Zn 污染海域,应选鼠尾藻、拟刚毛藻、细江蒿为污染修复生物;在 Cr 污染海域,应选石花菜、鼠尾藻为环境修复生物;在 Se 污染海域,应选细江蒿、鼠尾藻为环境修复生物;在 Fe 污染海域,应选细江蒿、拟刚毛藻为环境修复生物;在 Mn 污染海域,应选细江蒿、水云为环境修复生物;在 Ba 污染海域,应选海门冬、拟刚毛藻为环境修复生物。可见,并没有单一的某种藻类对每种重金属元素都具有较强的富集能力,要对多种重金属污染海域进行生物修复,最好选择数种对不同元素具有较强富集能力的大型海藻组成修复生物群落,才能更有利于重金属

复合污染海域的生态修复。综合分析所调查的各大型海藻, 细江篱对各重金属的富集能力均较强, 是多种重金属污染海域修复的首选生态环境材料。

2.3 与其它藻类的比较

在海洋藻类中有关大型海藻对重金属富集能力研究的报道较少, 而对微型藻类的研究较多。据报道(毛文君等, 1995; 谢苏婧等, 2003; 贺与平等, 1996), 在藻类中 Cu、Zn、Fe、Mn、Se 的含量范围分别为 1—30.66、62—420、150—4230、11—100、1.576—5.980mg/kg, 本研究中仅细江篱 Cu 含量高于 30.66mg/kg; Zn 的含量仅拟刚毛藻、细江篱和鼠尾藻高于 62mg/kg, 但都低于 420mg/kg; Fe 含量细江篱、拟刚毛藻、水云、鼠尾藻、海门冬和条浒苔均大于 4230mg/kg; Mn 含量细江篱、水云、小珊瑚、拟刚毛藻、条浒苔、蜈蚣藻、鼠尾藻、海门冬、海蕴、礁膜、石花菜都高于 100mg/kg, 细江篱含量最高, 为最大值的 4 倍; Se 含量仅细江篱大于 5.980mg/kg, 而长石莼、海头红、大石花菜、肠浒苔、礁膜、半盐生单歧藻、宽扁叉节藻、喇叭菜和刚毛藻的含量都低于 1.576mg/kg。据报道, As 的含量: 海带为 42—62mg/kg、马尾藻为 36—50mg/kg、江篱为 3—9mg/kg、石莼为 2—10mg/kg (孙飏等, 1996), 藻对 Pb 的富集系数可达到 70000 (温志良等, 2000), 藻类对金属元素如 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 等的富集程度可以达到几千倍(Aaronson *et al.*, 1982)。本研究中藻类 As 的含量和 Pb 的富集系数都较低, 最高是细江篱, 分别为 8.90mg/kg 和 2888.66, 而 Cu、Zn 的富集系数大部分在数百之间, Hg 的富集系数相对比较大, 这可能与海区海水中各重金属元素的含量有关, 据李日强等(2001)研究发现, 藻类对重金属的富集率与重金属的浓度有关。

2.4 系统聚类分析

以各种藻类为样本, 各重金属含量为聚类指标, 通过 DPS 软件对各藻类的综合富集能力进行聚类分析, 结果 21 种藻类的富集能力划分为 6 类, 第一类为肠浒苔、长石莼、礁膜、大石花菜、海头红、团扇藻、宽扁叉节藻、刚毛藻; 第二类为条浒苔、水云、蜈蚣藻、半盐生单歧藻、喇叭藻、小珊瑚、海门冬; 第三类为拟刚毛藻、石花菜; 第四类为海蕴; 第五类为鼠尾藻; 第六类为细江篱(图 2)。细江篱的富集能力最强, 其次为鼠尾藻和海蕴, 条浒苔、水云、蜈蚣藻、半盐生单歧藻、喇叭藻、小珊瑚和海门冬的富集能力相近, 而肠浒苔、长石莼、礁膜、大石花菜、海头红、

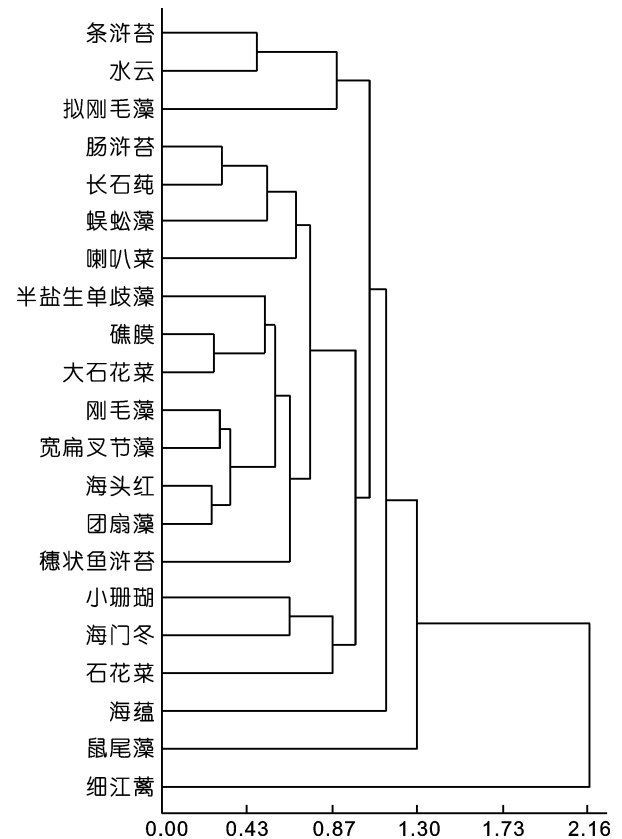


图 2 大型藻类聚类分析图

Fig.2 The cluster tree of macroalgae

团扇藻、宽扁叉节藻和刚毛藻的富集能力最差。

3 结论

(1) 各重金属元素的最高含量分别处于不同的藻类体内, As、Cu、Pb、Cr、Se、Fe、Mn 含量最高的是细江篱, 分别为 8.9、34.35、24.26、68.12、12.04、26777.2、400.16mg/kg; Hg 含量最高的是海蕴 6.9mg/kg, Zn 含量最高的是鼠尾藻 277.37mg/kg, Cd 含量最高的是石花菜 6.77mg/kg, Ba 含量最高的是海门冬 127.02mg/kg。

(2) 各种藻类对各重金属元素富集总量由强到弱依次为细江篱>拟刚毛藻>水云>海蕴>鼠尾藻>海门冬>条浒苔>小珊瑚>肠浒苔>蜈蚣藻>礁膜>大石花菜>石花菜>半盐生单歧藻>团扇藻>长石莼>宽扁叉节藻>穗状鱼浒苔>喇叭菜>海头红>刚毛藻, 这与藻类的富集能力有关。各元素被藻类富集的量从大到小的顺序为 Fe>Mn>Ba>Zn>Cr>Cu>Pb>As>Se>Cd>Hg。这与藻类对营养元素的需求和金属元素的毒性有关, 对营养元素的富集要大于对毒性元素的富集。

(3) 不同藻类对重金属的富集系数有明显的差异, 同一种藻类对不同重金属的富集系数也不一样,

富集系数从几倍至几十万倍不等, 最高是细江藓对 Fe 的富集, 其次为海蕴对 Hg 的富集, 再次为细江藓对 Mn 的富集, 最差的为刚毛藻对 Se 的富集, 其富集系数分别为 204875.29、13800.00、8166.53 和 3.48。

(4) 聚类分析结果显示, 细江藓的综合富集能力最强, 其次为鼠尾藻和海蕴, 而肠浒苔、长石莼、礁膜、大石花菜、海头红、团扇藻、宽扁叉节藻和刚毛藻及条浒苔、水云、蜈蚣藻、半盐生单歧藻、喇叭藻、小珊瑚和海门冬的富集能力比较相近。

(5) 没有单一的某种藻类对每种重金属元素都具有较强的富集能力, 要对多种重金属污染海域进行生物修复, 最好选择数种富集能力较强的大型海藻组成修复生物群落, 才能更有利于重金属复合污染海域的生态修复。细江藓对各重金属的富集能力相对较强, 是多种重金属污染海域修复的首选生态环境材料。

参 考 文 献

- 于志刚, 张 经, 史峰岩等, 1999. 一种评价重金属污染对大型海藻毒性效应的新方法. 海洋与湖沼, 30(2): 199—205
- 王 悠, 俞志明, 宋秀贤等, 2006. 大型海藻与赤潮微藻以及赤潮微藻之间的相互作用研究. 环境科学, 22(2): 274—279
- 王 夔, 1988. 生物无机化学. 北京: 清华大学出版社, 200—203
- 毛文君, 管华诗, 李八方, 1995. 几种海洋生物体内硒含量的测定. 海洋湖沼通报, 4: 28—32
- 刘婷婷, 杨宇峰, 叶长鹏等, 2006. 大型海藻龙须菜对两种海洋赤潮藻的生长抑制效应. 暨南大学学报, 27(5): 754—759
- 孙 飏, 范 晓, 1996. 海藻中砷的含量分布特征. 海洋科学, 5: 24—27
- 李日强, 王翠红, 席玉英等, 2001. 钝顶螺旋藻对五种元素生物富集作用的研究. 山西大学学报(自然科学版), 24(2): 167—169
- 李宪瑾, 范 晓, 韩丽君等, 2002. 中国黄、渤海常见大型海藻的脂肪酸组成. 海洋与湖沼, 33(2): 215—224
- 杨宇峰, 宋金明, 林小涛等, 2005. 大型海藻栽培及其在近海环境的生态作用. 海洋环境科学, 24(2): 77—80
- 杨宇峰, 费修缙, 2003. 大型海藻对富营养化海水养殖区生物修复的研究与展望. 青岛海洋大学学报, 33(1): 053—057
- 况琪军, 夏宜铮, 惠 阳, 1996. 重金属对藻类的致毒效应. 水生生物学报, 20(9): 279—280
- 陈必链, 庄惠如, 余 望等, 1998. 钝顶螺旋藻对锌和硒生物富集作用的研究. 食品与发酵工业, 24(6): 27—29
- 贺与平, 陈金素, 1996. ICP-AES 法同时测定螺旋藻中 Ca、Mg、P、Fe、Cu、Mn、Zn. 光谱实验室, 6: 633—666
- 徐秀丽, 范 晓, 宋福行, 2004. 中国经济海藻提取物生物活性. 海洋与湖沼, 35(1): 55—63
- 徐姗姗, 李 祯, 何培民, 2006. 大型海藻在近海水域中的生态修复作用及其发展策略. 渔业现代化, 6: 12—16
- 温志良, 温淡茂, 张爱军, 2000. 藻类在水环境保护中的利用. 贵州环保科技, 6(3): 9—12
- 谢苏婧, 谢树莲, 谢宝妹, 2003. 藻类植物中钙、镁、铁、锰、铜和锌含量分析. 光谱学与光谱分析, 3: 615—616
- 魏 尊, 谷子林, 李秋凤等, 2005. 饲料中添加海藻粉对蛋白质的影响. 饲料研究, 6: 24—26
- Aaronson S, Dubinsky Z, 1982. Mass production of microalgae. *Experientia*, 38(1): 36—40
- Chung I K, Kang Y H, Yarish C *et al*, 2002. Application of seaweed cultivation to the bioremediation of nutrient-rich effluent. *Algae*, 17(3): 187—194
- Mcvey J P, S Tickney R R, Yarish C *et al*, 2002. Aquatic polyculture and balanced ecosystem management: New paradigms for seaweed production. *Responsible Marine Aquaculture*, New York: CABI Publishing, 91—104
- Schramm W, 1999. Factors influencing seaweed responses to eutrophication: some results from EU-project EU-MAC. *J Appl Phycol*, 11: 69—78

TRACE ELEMENTS OF SPRING AND WINTER MACROALGAE IN LIUSHA BAY

ZHANG Cai-Xue, BAI Fu-Jin, SUN Xing-Li, CHEN Chun-Liang

(Ocean Resources and Environments Monitor Center, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, 524088)

Abstract Concentrations of As, Se, Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Fe, Mn, and Ba in 21 macro-algae from Liusha Bay (the west of Xuwen Country, Guangdong Province) in spring and winter 2008 were determined by Atomic Fluorescence Analyzer (AFA) and Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS). The results show that the concentration of heavy metal was enriched in different algae. For example, *Gracilaria confervoides* had the highest concentration of As, Cu, Pb, Cr, Se, Fe, Mn, at 8.9, 34.35, 24.26, 68.12, 12.04, 26777.2, and 400.16mg/kg; and *Nemacysti Decipientis*, *Sargassum thunbergii*, *Gelidium amansii*, *Asparagopsis taxiformis* for Hg, Zn, Cd, Ba at 6.9, 277.37, 6.77, 127.02mg/kg, respectively. The order of heavy-metal bioaccumulation degree is: *Gracilaria confervoides* > *Cladophoropsis herpestica* > *Ectocarpus* > *Nemacysti Decipientis* > *Sargassum thunbergii* > *Asparagopsis taxiformis* > *Enteromorpha clathrata* > *Corallina pilulifera* > *Enteromorpha intestinalis* > *Grateloupia filicina* > *Monostroma nitidum* > *Gelidium pacificum* Okam. > *Gelidium amansii* > *Padina* sp. > *Ulva stenophylla* > *Amphiroa anceps* Lamouroux > *Acanthophora spicifera* > *Turbinaria ornata* > *Plocamium telfairiae* > *Cladophora* sp.. Moreover, the magnitude order of average concentration of heavy metals accumulated in different algae is: Fe > Mn > Ba > Zn > Cr > Cu > Pb > As > Se > Cd > Hg, and the bio-enrichable nutrients elements are richer in the algae than toxic elements. Different algae are very different in the bioaccumulation coefficient varying from several to hundreds of thousands of times, and so for each species for different heavy metals. The highest value was found in *Gracilaria confervoides* for Fe enrichment with bioaccumulation coefficient at 204875.29, followed by *Nemacysti decipientis* for Hg at 13800.00; and the least one was *Cladophora* sp. for Se at only 3.48. No individual alga had strong accumulation of every heavy metal. Cluster analysis showed that *Gracilaria confervoides* was the strongest one capable of bio-accumulation, and can be selected to treat heavy-metal polluted waters. However, to remedy large-area heavy-metal contaminated waters, combination of several capable algae is recommended for better ecological restoration.

Key words Liusha Bay, Macro-algae, Heavy metals, Accumulation, Eco-remediation