

## 坛紫菜中铝的形态分析及风险性评价

严华<sup>1\*</sup>, 黄东仁<sup>1</sup>, 陈火荣<sup>1</sup>, 张新明<sup>2</sup>, 杨琳<sup>3</sup>

(1. 福建省海洋环境与渔业资源监测中心, 福建 福州 350003;

2. 福州大学生物科学与工程学院, 福建 福州 350108;

3. 厦门海洋职业技术学院, 福建 厦门 361000)

**摘要:**应用化学连续萃取法结合电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法对紫菜中铝的存在形态进行了初步研究,并对紫菜中铝食用安全性进行了评价。所测30份紫菜样品中铝的总含量范围为74.3~1479 mg/kg,紫菜中铝的形态存在难溶态>有机态>无机态>水溶性游离态的分布规律。约75%的铝以难溶态存在。可溶态的铝主要以有机铝的形态存在,有机铝占总可溶态铝的72%左右。无机铝主要以 $Al(OH)_3$ 的形态存在,水溶性游离态铝占无机铝的18.5%。通过模拟胃肠消化环境测定紫菜中铝的溶出率,结果表明,模拟胃液可溶出的铝占总铝的1.38%~6.80%,说明大部分铝在人体消化过程中不易溶出,对人体的潜在危害并不大。

**关键词:**坛紫菜;铝的形态;电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)

**中图分类号:**S 912

**文献标志码:**A

铝是岩石圈中丰度最高的金属元素,自然条件下铝主要以氧化物或铝硅酸盐的形态存在,占全部含铝矿物的99%以上<sup>[1]</sup>。由于这两种铝形态的低溶解性,长期以来铝被认为是无毒无害的安全元素,又因其具有优良的理化性质,被广泛应用于人们的日常生活,如饮食加工行业大量采用的铝制器皿和含铝加工试剂、临床抗胃酸药等。近年来由于人类生产活动的扩大,大气污染加剧并形成酸雨,使得铝在土壤、水体中的浓度增加,其潜在的危害正被逐渐认识和重视<sup>[2-4]</sup>。有研究表明,铝在环境中的迁移转化、生物可利用性及毒性不完全取决于总量,而是与其化学形态有关<sup>[5]</sup>。化学分级提取法最早被用来分析环境样品中铝的形态<sup>[5-9]</sup>,后来也被用于蔬菜、茶叶、中药等食品中铝的形态分级<sup>[10-13]</sup>。由于铝的络合、聚合能力很强,能与各种无机、有机配体形成不同的配合物,其形态分布受浓度、温度、pH等众多因素影响,目前尚未有统一的分析规范。

不同形态的铝具有不同的毒性,生物毒理学证明无机单核铝 $Al^{3+}$ 、 $Al(OH)^{2+}$ 和 $Al(OH)_2^+$ 的

毒性最大,铝的氟化物和有机态结合的铝毒性大大降低,难溶态铝不具有毒性。世界卫生组织(WHO)和联合国粮农组织(FAO)认为铝属于低毒金属元素,并于1989年正式将铝确定为食品污染物加以控制,提出人体每周铝的暂定摄入量标准为每千克体质量7 mg。2006年6月,专家委员会对铝的安全性重新进行了评估,将每周可容忍的铝摄入量降低至每千克体质量1 mg。但尽管如此,由于对铝的风险评价缺乏足够的科研数据,即使欧美等发达国家也没有就食品中的铝作出具体限量规定。我国GB 2760-2007《食品添加剂使用卫生标准》<sup>[14]</sup>规定水产品及其制品中铝的残留量应小于100 mg/kg,以此为据,许多企业的紫菜产品被查出铝含量超标。本研究工作以坛紫菜(*Porphyra haitanensis*) (以下简称紫菜)为调查对象,应用ICP-MS检测对紫菜中铝的含量和存在形态进行了分析,并对紫菜的食用安全性进行了初步评价,旨在探讨以紫菜中的总铝含量作为衡量标准的合理性,以及紫菜中的铝是否对人体产生危害等问题,以期对紫菜等水产品中铝的食用

收稿日期:2010-12-27 修回日期:2011-02-14

资助项目:福建省农业科技重点项目(2010N0008)

通讯作者:严华, Tel:059187879727, E-mail:yanhua\_hy@hotmail.com

安全性等相关标准的制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂及仪器

电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, 美国 Agilent 7500 ce), 微波消解系统 (Mars-5, 美国 CEM), 超纯水制备装置 (MilliQ, 美国 Millipore), 超声波清洗器 (KQ 250-B, 昆山超声仪器厂), 电热恒温干燥箱 (DHG-P141A, 上海精宏仪器厂)。铝标准储备溶液 (10 mg/L), 硝酸 (优级纯), 盐酸 (优级纯), 胃蛋白酶 (1:10 000)。

人工胃液: 以药典方法配置模拟人工胃液<sup>[15]</sup>, 具体方法为取稀盐酸 (取盐酸 234 mL, 加水定容至 1 000 mL) 16.4 mL, 加水约 800 mL 及胃蛋白酶 3.33 g, 搅匀后加水定容至 1 000 mL。

### 1.2 测定方法

样品采集 于福建省主要紫菜产区收集不同采摘周期的紫菜产品, 每份样品质量 100 g 左右, 用聚乙烯保鲜袋封装, 于通风干燥处保存。

样品前处理 总铝含量的测定: 称取 0.100 g 紫菜干样于微波消解罐内, 加 5 mL 浓 HNO<sub>3</sub> 微波消解; 微波消解程序参照《食品中铝的测定 电感耦合等离子体质谱法》GB/T 23374 - 2009<sup>[16]</sup>, 程序升温时间为 5 min, 保持温度 120 °C, 保持时间 3 min, 再升温至 175 °C, 升温时间 6 min, 保持 10 min。微波消解完, 取出消解罐内罐, 放在微机控温加热板上 (120 °C) 进行赶酸处理, 赶酸至 1 mL 左右, 用超纯水洗涤消解罐 3~4 次, 洗液合并与 50 mL 比色管中, 超纯水定容, 取 5 mL 溶液经 0.45 μm 滤膜过滤后 ICP-MS 检测, 同时做流程空白。

总可溶态铝的测定: 称取 0.100 g 紫菜干样于 50 mL 塑料离心管中, 加入 5 mL 浓 HNO<sub>3</sub> 浸泡 24 h, 超声 30 min 至残渣完全分解, 用超纯水定容至 50 mL, 取上清液经 0.45 μm 滤膜过滤, 待测。

水溶态铝的测定: 称取 0.100 g 紫菜干样于 50 mL 塑料离心管中, 加入 25 mL 超纯水于振荡器上振荡提取 1 h, 用一次性针筒吸取 10 mL 上清液, 过 0.45 μm 滤膜, 硝酸酸化, 待测。

无机态铝的测定: 称取 0.100 g 紫菜干样于 50 mL 塑料离心管中, 加入 25 mL 1 mol/L 盐酸溶液, 于振荡器上振荡提取 1 h, 用一次性针筒吸

取 10 mL 上清液, 过 0.45 μm 滤膜, 待测。

模拟胃液浸提铝的测定: 称取 0.100 g 紫菜干样于 50 mL 塑料离心管中, 加入 40 mL 人工胃液于 37 °C 水浴提取 2 h, 用一次性针筒吸取 10 mL 上清液, 过 0.45 μm 滤膜, 待测。

溶出率计算公式:

$$\text{溶出率}(\%) = \text{溶出量} / \text{总量} \times 100\% \quad (1)$$

样品测试 参照《食品中铝的测定 电感耦合等离子体质谱法》GB/T 23374 - 2009<sup>[16]</sup>, 铝的标准系列浓度为 0.00、2.00、5.00、10.00、20.00、50.00 ng/mL, 以 1 μg/mL 的 <sup>45</sup>Sc 作为内标, 在线内标加入法定量。ICP-MS 仪器条件参数见表 1。

表 1 ICP-MS 工作条件  
Tab.1 ICP-MS working parameters

参数 parameters	数值 values
<b>等离子体 inductively coupled plasma</b>	
射频功率 RF power	1 500 W
采样深度 sampling depth	8.0 mm
载气流速 carrier gas flow rate	0.8 L/min
辅助气流速 makeup gas flow rate	0.26 L/min
<b>碰撞反应池 collision cell</b>	
碰撞气 collision gas	He
碰撞气流速 collision gas flow rate	4.0 mL/min
<b>检测器 detector</b>	
分析时间 dwell time per point	0.3 s
重复次数 replicates	3

质量控制 抽取 10% 的样品做平行测定, 以确认测试结果的再现性和精密度。

## 2 结果

### 2.1 紫菜中铝的总质量分析结果

紫菜样品经微波消解后, 得到铝的总量。从微波消解的实验结果来看, 经微波消解后, 所有紫菜样品中铝的含量范围为 74.3 ~ 1 479.0 mg/kg, 仅 1 份样品铝的含量低于 100 mg/kg, 4 份样品铝的含量高于 1 000 mg/kg, 其余 25 份样品中铝的含量介于 100 ~ 1 000 mg/kg, 占样品总数的 83.3%。所有紫菜中铝的平均值为 613 mg/kg, 中间值为 580 mg/kg。

紫菜中铝的来源主要分为自然来源和加工环节。对采集的养殖区海水进行分析发现, 经 0.45 μm 滤膜过滤后的海水中铝的含量约为 (4.53 ± 0.46) ng/mL; 而不经滤膜过滤, 将海水连同悬浮

颗粒物一起经微波消解,得到铝的含量为  $(2.65 \pm 0.57) \times 10^3$  ng/mL;可见海水中游离态铝的含量不高,铝主要是集中于悬浮颗粒物上。由于紫菜表面含有较多的多糖,具有一定的粘性,对海水中的悬浮颗粒物有一定的吸附作用,因此海水中悬浮颗粒物中的铝是紫菜原藻中铝的重要来源。相同海区采集的原藻不经任何加工处理,直接经微波消解,测得铝的含量达  $(2\ 574 \pm 134)$  mg/kg。紫菜原藻经脱盐、清洗之后,铝的含量明显降低,清洗一次后紫菜中铝的含量降低为  $(1\ 135 \pm 148)$  mg/kg,清洗4次后紫菜中铝的含量降低为  $(571 \pm 60)$  mg/kg,证明紫菜原藻中的铝主要是以表面吸附的形式存在的,这部分铝与紫菜的结合能力较弱。但紫菜原藻经清洗4次之后,铝的含量仍高于500 mg/kg,说明仍有一部分铝通过化学键合的作用与紫菜细胞壁上的功能基团结合,或是通过细胞壁上的转运蛋白进入了紫菜细胞内部。

加工方式对紫菜成品中铝的含量也有影响。我们按加工方式对所测紫菜中铝的总质量进行分类统计,结果见表2。紫菜中铝的含量较高的主要集中于天然晒干的紫菜,15个样品中有13个紫菜样品中铝的含量高于500 mg/kg,且有4个含量高于1 000 mg/kg。烘干紫菜中铝的含量相对较低,有10个样品中铝的含量低于500 mg/kg,占烘干样品总数的2/3,其余5个样品中铝的含量介于500~1 000 mg/kg。分析原因,我们发现由于天然晒干的紫菜在空气中的暴露时间长,容易受到空气中的灰尘污染,相比较而言,烘干房的环境较为洁净,紫菜受大气中颗粒物的沾污较

小。据文献报道<sup>[17]</sup>,福建沿海土壤属于富铝土壤,土壤中  $Al_2O_3$  的含量范围变化范围也较大,从0.58%至29.08%不等,中值15.64%,比全国土壤丰度高约3%。由于缺乏大气颗粒物中铝的含量数据,我们目前只能以土壤中铝的本底值作为参考,天然晒干紫菜的高铝含量与环境的相关性还有待进一步研究证明。

表2 天然晒干与烘干紫菜中铝的含量统计结果  
Tab.2 Comparison of aluminum concentration profiles in sun-dried or baking-dried *P. haitanensis*

铝含量范围/ (mg/kg) Al concentration range	烘干 baking-dried		天然晒干 sun-dried	
	样品数量 sample number	占比/ % percentage	样品数量 sample number	占比/ % percentage
<100	1	6.77	0	0
100~200	3	20.0	0	0
200~500	6	40.0	2	13.3
500~1 000	5	33.3	9	60.0
>1 000	0	0	4	26.7

## 2.2 紫菜中铝的化学形态分级结果

不同提取方法对应铝的主要形态估计见表3。用水浸提得到水溶性游离态铝;用盐酸浸提得到无机铝,无机铝=水溶性游离态铝+ $Al(OH)_3$ ;用浓硝酸浸泡结合超声的方法可完全将紫菜中的有机质分解,得到总可溶态铝,总可溶态铝=无机铝+有机铝;浓硝酸结合微波消解的方式不仅能将有机质分解,还可将难溶态的铝溶解,得到总铝,总铝=无机铝+有机铝+难溶态铝。通过差减法可分别得出 $Al(OH)_3$ 、有机铝和难溶态铝的含量。

表3 不同提取方法对应铝的主要形态  
Tab.3 The definition of the Al species distribution by different extraction methods

提取方法 extraction method	溶出形态 aluminum fractionation	铝的主要形态 Al species
水浸提 $H_2O$ extraction	水溶性游离态	$Al^{3+}$ , $Al(OH)^{2+}$ , $Al(OH)_2^+$ , $Al(OH)_4^-$ , $Al(F)_n$
1 mol/L 盐酸浸提 1 mol/L HCl extraction	无机态 = 水溶性游离态 + $Al(OH)_3$	$Al^{3+}$ , $Al(OH)^{2+}$ , $Al(OH)_2^+$ , $Al(OH)_4^-$ , $Al(F)_n$ , $Al(OH)_3$
浓硝酸浸提 $HNO_3$ extraction	总可溶态铝 = 无机铝 + 有机铝	$Al^{3+}$ , $Al(OH)^{2+}$ , $Al(OH)_2^+$ , $Al(OH)_3$ , $Al(OH)_4^-$ , $Al(F)_n$ , Al-org
浓硝酸微波消解 $HNO_3$ microwave digestion	总铝 = 无机铝 + 有机铝 + 难溶态铝	$Al^{3+}$ , $Al(OH)^{2+}$ , $Al(OH)_2^+$ , $Al(OH)_3$ , $Al(OH)_4^-$ , $Al(F)_n$ , Al-org, 铝硅酸盐

30 个紫菜样品的形态分析测定结果见表 4, 从表 4 可以看出,紫菜中铝的形态存在难溶态 > 有机态 > 无机态 > 水溶性游离态的分布规律。紫菜的总铝含量虽然较高,但大部分铝以难溶态的形态存在,难溶态的铝占总铝的 62.2% ~ 87.9%,平均值为 78.5%。总可溶态铝主要以有机铝的形态存在,有机铝的含量范围为 8.89 ~ 248 mg/kg,平均值为 97.4 mg/kg,溶出率范围为 6.08% ~ 31.2%,平均溶出率为 15.3%,有机铝

占总可溶态铝的 72% 左右;无机铝的含量范围为 9.74 ~ 55.6 mg/kg,平均值为 29.5 mg/kg,溶出率范围为 2.06% ~ 15.7%,平均溶出率为 5.93%;无机铝中水溶性游离态铝的含量范围为 1.97 ~ 8.71 mg/kg,平均值为 4.45 mg/kg,水溶性游离态铝占无机铝的 4.33% ~ 44.5%,平均为 18.5%,说明无机铝主要以  $Al(OH)_3$  的形态存在。

表 4 紫菜中各种提取态铝的含量及溶出率结果

Tab. 4 The content and dissolution rates of Al in different extraction forms in *P. haitanensis*

加工方式 processing method	水溶性游离态 water soluble species		无机态 inorganic species		有机态 organic species		难溶态 insoluble species	模拟胃液溶出 gastric stage soluble		总量 total content
	含量/ (mg/kg) content	溶出率/ % dissolution rate	含量/ (mg/kg) content	溶出率/ % dissolution rate	含量/ (mg/kg) content	溶出率/ % dissolution rate	含量/ (mg/kg) content	含量/ (mg/kg) content	溶出率/ % dissolution rate	含量/ (mg/kg) content
		2.81	3.78	11.7	15.7	8.89	12	53.7	5.06	6.8
	3.45	2.47	9.74	6.99	13	9.34	116	6.04	4.33	139
	5.05	3.65	11.3	8.2	19.5	14.1	107	6.43	4.65	138
	1.97	0.59	18.3	5.46	30.6	9.11	287	8.91	2.65	336
	4.99	1.63	16.8	5.5	35.1	11.4	255	7.3	2.38	306
	5.59	0.69	16.8	2.06	122	15	676	14.9	1.83	814
烘干 baking-dried	2.47	1.47	17.6	10.5	24.5	14.6	126	5.53	3.29	168
	4.91	1.73	18.6	6.58	26.9	9.51	238	11.1	3.9	283
	6.3	0.99	29	4.56	108	17	499	19.1	3.01	636
	3.56	0.98	31.1	8.53	42.8	11.7	291	9.01	2.47	364
	8.71	0.94	48.7	5.26	146	15.8	731	24.7	2.67	925
	3.5	0.48	32.9	4.48	149	20.3	552	15.9	2.17	734
	4.18	1.66	18.6	7.38	41.7	16.5	192	10.6	4.22	252
	6.77	1.97	24.9	7.23	53.8	15.6	265	15.7	4.56	344
	3.37	0.43	36.2	4.65	181	23.2	562	13.9	1.78	779
		2.96	1.4	12.7	5.99	12.9	6.08	186	9.09	4.29
	2.07	0.39	10.8	2.06	70.5	13.4	442	11.89	2.27	524
	8.48	1.56	36.2	6.66	169	31.2	337	20.5	3.78	543
	4.11	1.02	37.4	9.28	78.5	19.5	287	18.9	4.67	403
	3.7	0.37	23.9	2.41	147	14.9	819	16.2	1.63	990
	8.28	0.56	55.6	3.76	248	16.8	1175	28.2	1.91	1478
晒干 sun-dried	2.82	0.25	50.2	4.37	172	15	926	20.3	1.77	1148
	2.48	0.38	29.6	4.5	106	16.1	523	14.8	2.25	659
	5.18	0.55	39.4	4.16	135	14.2	772	18.2	1.93	947
	4.6	0.39	41.7	3.56	154	13.1	976	26.7	2.28	1171
	4.13	0.36	32.1	2.79	138	12	981	17.4	1.51	1152
	8.61	0.98	29.4	3.35	105	12	743	14.1	1.6	878
	3.27	0.58	35.3	6.22	142	25.1	390	14	2.46	568
	2.34	0.28	54.1	6.51	123	14.7	655	11.5	1.38	831
	2.71	0.46	54.1	9.12	118	19.9	421	24.8	4.18	593
	平均值 average	4.45	1.2	29.5	5.93	97.4	15.3	486	14.7	2.96

### 2.3 模拟胃液中铝的溶解态含量

为了进一步研究铝在人体中的可吸收程度,我们采用与人体生理条件相接近的人工胃液浸提紫菜中的铝,测定其溶出量。实验结果表明(表4),模拟胃液中铝的含量范围为5.06~28.20 mg/kg,平均值为14.7 mg/kg,溶出率范围为1.38%~6.80%,平均值为2.96%。由形态分级的结果可知,紫菜中的无机铝主要以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的形态存在,由于人体胃液呈酸性,可使 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 转化为 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 或 $\text{Al}(\text{OH})^+$ 等形态而溶出,同时,胃液中含有的胃蛋白酶可以将一些有机物分解,释放出—部分有机铝。模拟胃液中铝的含量高于水溶性铝,低于无机铝和有机铝,说明模拟胃液中溶解态铝的组成为水溶性铝及部分无机铝和有机铝的混合物。

## 3 讨论

### 3.1 紫菜中铝的食用安全性评价

由于紫菜细胞壁富含多糖,在天然水体中带负电荷,容易从周围环境中富集各种金属离子,这些金属离子尤其是有毒有害的砷(As)、镉(Cd)和铅(Pb)等元素在海藻中的存在形态已经引起广泛关注<sup>[18-19]</sup>。研究发现,以金属元素的总量来衡量其毒性是不合理的,同样,不同形态的铝具有不同的毒性,生物毒理学证明无机单核铝 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 和 $\text{Al}(\text{OH})^+$ 的毒性最大,铝的氟化物和有机态结合的铝毒性大大降低,难溶态铝不具有毒性,因此在对紫菜中铝的食用安全性进行评价时,笔者认为可忽视难溶态铝,而重点关注总可溶态铝,特别是无机铝[ $\text{Al}(\text{OH})_3$ 在消化液的酸性条件下可以转化为 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 或 $\text{Al}(\text{OH})^+$ 等形态而溶出]的含量及其对每周允许摄入量(provisional tolerable weekly intake,PTWI)的贡献率。

按照世界卫生组织和联合国粮农组织制定的每周可容忍的铝摄入量暂定标准,即每周每千克体质量1 mg的安全限量,对于体质量60 kg的成年人(约为我国成年人平均体质量)一周内允许摄入的有害铝的总量应为60 mg。由于紫菜一般都被用来作汤食,实际食用量并不大,为分析方便,笔者假定每周进食50 g紫菜(以中日紫菜贸易标准计量单位计算,19 cm×21 cm的纸状片加工紫菜每张重3 g,即17张左右,实际消费量很难达到)。以此为基准,按本实验结果进行计算,从

紫菜这一种食物中摄入的铝总量为3.72~73.9 mg,对PTWI的贡献率为6.19%~123%,平均为51.1%;摄入的总可溶态铝为1.03~15.2 mg,对PTWI的贡献率为1.71%~25.3%,平均为10.6%;摄入的无机铝含量为0.49~2.78 mg,对PTWI的贡献率仅为0.82%~4.63%,平均为2.46%。同样以此为基准,按模拟胃液溶出的铝计算,人体通过食用紫菜摄入铝的量为0.25~1.41 mg,对铝的PTWI的贡献率仅为0.42%~2.35%,平均为1.22%。以上分析可见,人体通过食用紫菜摄入并可利用的铝对PTWI的贡献并不大,不会对人体构成健康威胁。单就紫菜而言,对于体质量60 kg的成人每周进食50 g紫菜,即使按铝的总量判断,只要不超过1 200 mg/kg也都属于安全范围。

### 3.2 紫菜中铝的评判标准

GB 2760-2007规定,水产加工环节使用硫酸铝钾或硫酸铝铵作为食品添加剂使用时铝的残留量不得高于100 mg/kg。由于硫酸铝钾或硫酸铝铵在水中很容易电离产生铝离子,铝离子进一步水解又易生成胶状的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,因此作为添加剂使用后,食品中残留的铝应主要是以无机铝的形态存在。然而根据本实验进行的化学形态分析结果表明,紫菜中大部分铝以难溶态存在,无机铝的溶出率仅为2.06%~15.7%,可以判断,紫菜中的铝并非是由于使用硫酸铝钾或硫酸铝铵作为食品添加剂使用而导致,显然,用GB 2760-2007的限量标准来评判紫菜中铝的含量是否超标并不合理。进而,笔者认为,针对紫菜等天然高含铝食品,当前可参照国际规则,暂时不定限量标准。如果一定要制定限量标准,应进行充分的风险性评价,充分考虑食品中铝的存在形态及人体吸收能力,然后在此基础上引导消费者合理膳食,确保人体健康的同时促进紫菜行业的健康发展和国际贸易,也可以避免形成新的贸易壁垒。

感谢农业部水产品质量监督检验测试中心(上海)蔡友琼研究员和国家水产品质量监督检验中心翟毓秀研究员对本研究提出的建议和帮助。

### 参考文献:

- [1] 牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京:北京大学出版社,1999:10-14.

- [ 2 ] 李增禧,楼蔓藤,李小樑,等. 铝对人类智能的损害及其对策的研究[J]. 广东微量元素科学,2000,7(4):1-17.
- [ 3 ] 王劲. 铝的生物学作用研究概况[J]. 卫生研究,2002,31(4):320-322.
- [ 4 ] 盛明纯. 铝对人体健康影响的研究进展综述[J]. 安徽预防医学杂志,2006,12(1):46-48.
- [ 5 ] 杨小弟,章福平,王先龙,等. 环境与生物体系中铝形态分析技术的新进展[J]. 分析化学,2003,31(9):1131-1138.
- [ 6 ] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Anal Chem, 1979, 51: 844-850.
- [ 7 ] 庞叔薇,康德梦,王玉保,等. 化学浸提法研究土壤中活性铝的溶出及形态分布[J]. 环境化学,1986,5(3):68-76.
- [ 8 ] 刘文新,栾兆坤,汤鸿霄. 水体中铝(Ⅲ)的化学形态及其生态效应的研究进展[J]. 生态学报,1996,16(2):212-220.
- [ 9 ] 罗明标,毕树平. 阳离子交换树脂分离-铝试剂分光光度法测定土壤中铝形态[J]. 分析科学学报,2004,20(2):113-116.
- [ 10 ] 汤秀梅,李崇宗,尹家元,等. 蔬菜中钙铝元素存在形态分析[J]. 微量元素与健康研究,2001,18(4):49-50.
- [ 11 ] 高舸,陶锐. 茶叶中铝的卫生学实验研究[J]. 中国公共卫生,2001,17(3):221-223.
- [ 12 ] 齐璐璐,何计国,姜微波. 炖肉中铝的存在形态分析[J]. 食品科技,2005(10):95-97.
- [ 13 ] 孙建民,苑忠格,石志红,等. 化学浸提法研究中药茯苓中活性铝的形态分布[J]. 分析科学学报,2008,24(1):111-113.
- [ 14 ] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. 食品添加剂使用卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [ 15 ] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 第二部. 北京:化学工业出版社,2005.
- [ 16 ] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 食品中铝的测定电感耦合等离子体质谱法 GB/T 23374-2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [ 17 ] 林才浩. 福建沿海土壤地球化学分类及基准值研究[J]. 第四纪研究,2005,25(3):347-354.
- [ 18 ] 赵艳芳,宁劲松,翟毓秀,等. 镉在海藻中的化学形态[J]. 水产学报,2011,35(3):405-409.
- [ 19 ] 郭莹莹,翟毓秀,林洪,等. 海产品中砷化合物检测方法的研究进展[J]. 水产科学,2008,27(12):674-679.

## Speciation analysis and health risk assessment of aluminum in *Porphyra haitanensis*

YAN Hua<sup>1\*</sup>, HUANG Dong-ren<sup>1</sup>, CHEN Huo-rong<sup>1</sup>, ZHANG Xin-ming<sup>2</sup>, YANG Lin<sup>3</sup>

(1. Ocean Environment and Fishery Resource Monitor Center of Fujian Province, Fuzhou 350003, China;

2. College of Biological Science and Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

3. Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 361000, China)

**Abstract:** The speciation analysis and health risk assessment of aluminum in *Porphyra haitanensis* was carried out by sequential chemical extraction method and analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The total content of aluminum was within the limits of 74.3–1 479 mg/kg in 30 samples. The content distribution of aluminum species in *P. haitanensis* was according to the order of insoluble Al > organic Al > inorganic Al > water soluble Al. Insoluble aluminum in *P. haitanensis* accounted for about 75% of the total Al. The greatest amount of soluble aluminum existed as organic Al, which accounted for 72% of the total soluble aluminum. The dominating form of inorganic aluminum was Al(OH)<sub>3</sub> and water soluble aluminum only accounted for 18.5% of inorganic aluminum. The percentage of dissolved aluminum in gastric stage only accounted for 1.38%–6.80% of the total aluminum, which indicated most of aluminum was insoluble during digestion process and health risk of aluminum which come from *P. haitanensis* was low.

**Key words:** *Porphyra haitanensis*; aluminum speciation; inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)

**Corresponding author:** YAN Hua. E-mail: yanhua\_hy@hotmail.com