# 羊栖菜不同部位微量元素含量测定及健康风险评价

朱姚镓,刘宇璇,汪恒玮,汪芷因,李 丹,吴嘉平\* (浙江大学海洋学院,浙江舟山 316021)

摘要:运用电感耦合等离子体质谱 (inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS)分析 3 个 不同养殖区域成熟期羊栖菜 (Sargassum fusiforme)主茎、侧茎、生殖托、气囊等部位中 As、Cd、Cr、 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量,以揭示羊栖菜中这些微量元素在不同部位的分布特征。结果表明,羊栖菜 具有较强的微量元素富集能力,不同部位的微量元素富集能力存在差异,主要富集在生殖托和气囊 中。结果表明,各站位间 As、Cd、Cr 和 Cu 在各部位的分布特征较为相似,而 Ni、Pb 和 Zn 在各部位 中的分布特征存在差异。羊栖菜对 As 的富集系数最高,对 Cr 的富集系数最小。根据健康风险评 价结果,除了两个站位的生殖托外,摄入羊栖菜不会对人体产生健康风险,但是相对而言,茎干的食 用风险更低。

关键词:海洋化学;羊栖菜;不同部位;微量元素;健康风险评估

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2022.03.007

中图分类号:P734 文献标识码:A

羊栖菜(Sargassum fusiforme)是一种广泛分布 于西北太平洋海岸潮间带的温带褐藻。羊栖菜中含 有丰富的营养成分,例如褐藻硫酸多糖、甾醇类化合 物、膳食纤维、蛋白质和氨基酸等<sup>[1-2]</sup>,具有较高的 食用价值。羊栖菜也被推崇为一种天然的治疗剂, 《中华人民共和国药典》《神农本草经》等指出其具 有消痰软坚散结、治奔豚气、消宿食、利水消肿等药 理作用<sup>[34]</sup>。此外,大规模的海藻养殖能够吸收海 水中大量的营养物质,如氮、磷等<sup>[5]</sup>,大幅度减缓海 水富营养化状态<sup>[6]</sup>,吸收二氧化碳,释放氧气,提升 海水 pH,改善海水生态环境<sup>[79]</sup>。

长期以来,工业、农业和生活污水等不断排放入海,对滨海水质和沉积物造成了一定影响<sup>[10-11]</sup>。 2020年全国直排海水中的六价铬、铅总量达到了 2153 kg和14 100 kg<sup>[12]</sup>。因海藻中的细胞壁等结 构能提供较多可与离子结合的官能团,且液泡等结 构能够隔离和固定微量元素,故海藻易从周围环境 中富集各种离子<sup>[13-14]</sup>。虽然海藻能够对海水中的 有益微量元素进行吸收积累,但同时也能吸收积累 一些有害离子如 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Cr<sup>2+</sup>等,进而有可能通 文章编号:2095-4972(2022)03-0423-09

过摄入等方式对人体健康安全造成潜在风险。

虽然近年来对羊栖菜的关注日益增多,但是 主要针对其中的活性成分等<sup>[2,15]</sup>进行研究,对微量 元素含量的研究相对较少,且主要为针对羊栖菜 整体的微量元素含量进行测定<sup>[16-19]</sup>,对羊栖菜不 同部位微量元素的分布与富集情况的报道尚不多 见。在日本,经常将羊栖菜的茎和气囊等不同部 位进行分开售卖,故而对分部位羊栖菜的微量元 素含量进行分析、研究具有一定的理论意义和实 用价值。

本研究对不同养殖区域成熟期羊栖菜4种可食 部位(主茎、侧茎、气囊和生殖托)的7种微量元素 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn含量进行分析测定,以 研究微量元素在羊栖菜不同部位的分布特点和含量 水平,同时采集养殖区海水进行环境评估,并对羊栖 菜中微量元素的食用风险进行评价。本研究旨在确 定羊栖菜不同部位的微量元素分布特性,探讨羊栖 菜中的微量元素含量水平和食用安全性,为生产者 和消费者食用部位的选择提供参考,同时为今后羊 栖菜资源的进一步开发利用提供科学依据。

收稿日期:2021-06-17

基金项目:科技部国合项目资助项目(2015DFA01410);浙江省高校基本科研费资助项目(2021XZZX012);国家自然科学基金资助项目 (42171398)

作者简介:朱姚镓(1996—),女,博士生;E-mail: zhu\_yaojia@zju.edu.cn

<sup>\*</sup> 通讯作者:吴嘉平(1962—),男,博士,教授;E-mail: jw67@ zju.edu.cn

## 1 材料与方法

# 1.1 样品采集及测定

1.1.1 研究区域概况 自然生长的羊栖菜主要附 着在低潮带岩石上。1989年,羊栖菜在人工试养成 功后开始大面积推广养殖,经过 30 多年发展,2019 年浙江温州洞头区的羊栖菜养殖面积达到了约 906 hm<sup>2</sup>,产量达到了 1.94 万吨,被誉为中国羊栖菜之 乡<sup>[20]</sup>。本研究在洞头区的 3 个养殖区(胜利岙、仙 叠岩和五屿头)进行采样(图 1)。





1.1.2 样品采集和前处理 2020年5月在洞头区3 个养殖区采集羊栖菜成熟期样品,同时采集表层水 样。海藻样品低温运回实验室后用去离子水清洗, 去除表面附着物及淤泥颗粒,用纸巾吸干表面水分。 将羊栖菜分为主茎、侧茎、气囊、生殖托4个部分,55 ℃烘干48h后磨碎备用。海水采样方法参照《海洋 监测规范》<sup>[21]</sup>。

1.1.3 实验方法 称取羊栖菜不同部位样品约 0.1 g,加入 5 mL HNO<sub>3</sub>,在恒温石墨炉中消煮,期间加数 次 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,煮至溶液澄清。冷却至室温后用去离子水 稀释定容至 25 mL,静置后取上清液待测。每个样 品平行测定 3 次,同时做空白对照组。

海藻及海水样品中的 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等微量元素用电感耦合等离子质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS)测定。 分析中所用试剂均为优级纯,分析过程以标准物质 GBW10023(紫菜)进行质量控制。实验中标准物质 回收率为92.5%~110.7%。

# 1.2 健康风险评价

采用目标危害系数法[22-23] 对羊栖菜中的重金

属进行健康风险评价。该方法通过单一重金属危害 系数(target hazard quotient, THQ)和多种重金属复 合危害系数(total target hazard quotient, TTHQ)对通 过食物途径摄入重金属的健康风险进行评估,其计 算公式如下:

$$THQ = \frac{E_{\rm F} \cdot E_{\rm D} \cdot F_{\rm IR} \cdot C}{RfD \cdot W_{\rm AB} \cdot T_{\rm A}} \times 10^{-3}$$
(1)

$$TTHQ = \sum THQ \tag{2}$$

式(1)中: $E_F$ 为暴露频率(365 d/a), $E_D$ 为暴露 持久性(30 a), $F_{IR}$ 为羊栖菜摄入率(20 g/标准人 日)<sup>[16]</sup>, C 为实验测得的各重金属含量(mg/kg), *RfD*为经口服摄入重金属参考剂量[mg/(kg·d)], 其中 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 分别为 3.0×10<sup>-4</sup>、 1.0×10<sup>-3</sup>、3.0×10<sup>-3</sup>、4.0×10<sup>-2</sup>、2.0×10<sup>-2</sup>、3.5×10<sup>-3</sup>、 0.3 mg/(kg·d)<sup>[22-24]</sup>,  $W_{AB}$ 为人体平均体重(63.45 kg), $T_A$ 为平均暴露时间(10 950 d)。

鉴于重金属对人体健康的影响一般是由多种元 素共同作用的结果,该方法的优势在于评价单一重 金属健康风险的同时,对多种重金属复合暴露的健 康风险进行评估。如果 THQ 或 TTHQ 指数小于 1.00,则说明暴露人群没有明显的健康风险,反之, 则说明相关暴露人群可能存在健康风险。

## 1.3 元素富集系数

元素富集系数(bioconcentration factor, BCF)为 海藻吸收和积累环境中微量元素能力的指标,其计 算公式<sup>[25-26]</sup>为

$$BCF = \frac{C_{\rm s}}{C_{\rm w}} \times 10^3 \tag{3}$$

式(3)中: $C_s$ 为海藻中微量元素含量(mg/kg),  $C_w$ 为海水中微量元素含量( $\mu$ g/L)。

### 1.4 数据统计及分析

数据采用 Excel 2019 和 DPS 16.05 软件进行统计 分析,结果用平均值±标准差表示。采用 Duncan 新复 极差检验进行差异性分析,显著水平设定为 P=0.05。

### 2 结果与分析

# 2.1 羊栖菜各部位重金属含量

羊栖菜不同部位的微量元素分布特征见图 2。 羊栖菜中微量元素总体平均含量较高的为 As(26.37 ~84.00 mg/kg)和 Zn(29.37~44.64 mg/kg),其次为 Cu(3.91~9.94 mg/kg)和 Ni(1.18~2.57 mg/kg),Cd (0.32~1.08 mg/kg)、Cr(0.60~1.30 mg/kg)和 Pb (0.82~1.38 mg/kg)的含量较低。从图 2 可知,对于 As、Cd、Cr和 Cu 而言,虽然各元素含量随着区域的不 同而存在一定差异,但生殖托和气囊中的含量显著高于主茎和侧茎中的含量(P<0.05)。在3个站位中,羊 栖菜的 As 和 Cr 含量在站位 X 中最高,Cd 和 Cu 含量

在站位 T 中最高。对于元素 Ni、Pb 和 Zn 而言,不同 部位的羊栖菜含量存在显著差异(P<0.05),不同站位 间的元素含量分布特征也存在一定差异。



### 2.2 海藻微量元素富集能力

表1为各采样站位海水中的微量元素含量。从 表中可以看出,海水中微量元素的分布为:Zn > As > Cr/Cu/Ni > Pb > Cd。与海水水质标准<sup>[27]</sup>对照, 除了Zn元素为二类水质标准外,其他元素含量达 到了一类水质标准。3个区域中,站位T的海水水 质状况相对较好。

实验测得羊栖菜体内微量元素含量均高于周围

海水中的含量,说明羊栖菜具有较强的元素富集能 力(表2)。羊栖菜富集系数计算结果表明,羊栖菜 中As的富集系数最高,Cr在羊栖菜中的富集系数 最低。而不同站位的羊栖菜对微量元素的富集特征 存在一定差异,站位S的羊栖菜对Zn的富集系数最 高,站位T对Cd的富集系数最高,位点X对As、Cr、 Cu、Ni和Pb的富集系数最高。

|--|

站位	项目	微量元素含量/(μg・L <sup>-1</sup> )							
		As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
S	范围	2.97~3.43	0.09~0.13	1.44~1.82	2.16~2.41	1.42~2.05	0.58~0.75	30.81~37.48	
	均值	3.15	0.11	1.58	2.33	1.79	0.65	35.17	
Т	范围	3.78~4.82	0.08~0.15	1.68~1.94	1.48~2.14	1.00~1.29	0.25~0.59	20.79~46.04	
	均值	4.16	0.11	1.77	1.76	1.14	0.42	37.36	
X	范围	4.35~4.68	0.08~0.12	2.13~2.32	1.32~1.55	1.02~1.08	0.34~0.54	27.39~55.74	
	均值	4.47	0.09	2.22	1.41	1.04	0.36	49.41	
海水标准	一类	≤20.00	≤1.00	≤50.00	≤5.00	≤5.00	≤1.00	≤20.00	
	二类	≤30.00	≤5.00	≤100.00	≤10.00	≤10.00	≤5.00	≤50.00	

#### 表2 羊栖菜微量元素富集系数

Tab. 2 Bioconcentration factor of trace elements in Sargassum fusiforme

站位	BCF							
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
S	13 856	3 071	490	2 385	1 183	1 889	1 071	
Т	14 078	7 750	406	4 366	1 682	2 515	998	
X	17 456	5 688	543	4 588	1 997	2 675	733	

### 2.3 海藻各部位富集能力综合评价

对羊栖菜中各微量元素含量进行主成分分析 (principal component analysis, PCA),根据特征方差 累计贡献率确定主成分个数。由图 3 可知,前 3 个 主成分累积贡献率达到 87.4%,基本保留了原有数 据的基本信息。第一主成分(PC1)的贡献率为 38.1%,该变量在 As、Cd、Cr 和 Cu 上有相似正载荷 (0.40~0.53);第二主成分(PC2)的贡献率为 27.4%,该变量在 Ni 上有较高正载荷(0.66),表明 第二主成分主要支配着羊栖菜中 Ni 的富集能力;第 三主成分(PC3)的贡献率为 21.9%,Zn 和 Pb 有着 较高的正载荷,分别为 0.62 和 0.54。 根据主成分分析结果,提取前3个主成分对羊 栖菜中微量元素的富集能力进行综合评价(表3)。 由表3可知,站位X和站位T羊栖菜各部位对微量 元素的富集能力排序为生殖托>气囊>侧茎>主茎。 站位S羊栖菜各部位对微量元素的富集能力排序为 气囊>侧茎>生殖托>主茎。相比较而言,三个区域 中站位S的羊栖菜的富集能力较弱。由结果可知, 羊栖菜气囊对于微量元素的富集能力较强,主茎和 侧茎对于微量元素的富集能力较弱。考虑到生殖托 为羊栖菜仅在成熟期产生的特殊部位,故而生殖托 对微量元素的富集能力差异可能与其生长时间存在 一定关联。



Fig. 3 2-dimensional loading plots of the trace elements PC1 贡献率为 38.1 %, PC2 贡献率为 27.4 %, PC3 贡献率为 21.9 %。

### 表 3 羊栖菜各站位不同部位微量元素富集能力的综合得分

Tab. 3 Comprehensive score of trace element accumulation capability in different tissues of *Sargassum fusiforme* at different sites

站位-部位	PC1	PC2	PC3	综合得分
X-生殖托	3.225	0.128	-0.117	1.237
T-生殖托	2.393	-1.323	2.030	0.992
T-气囊	0.854	0.336	0.566	0.541
X-气囊	1.102	1.214	-2.173	0.278
X-侧茎	0.320	0.919	-0.525	0.259
S-气囊	-0.924	1.640	0.424	0.191
S-侧茎	-1.845	1.720	1.550	0.108
S-生殖托	-0.380	-0.355	0.319	-0.172
X-主茎	-0.876	0.720	-1.363	-0.434
T-侧茎	-0.662	-1.197	-0.370	-0.661
S-主茎	-2.045	-0.910	0.979	-0.814
T-主茎	-1.163	-2.891	-1.319	-1.524
贡献率/%	38.1	27.4	21.9	_
累积贡献率/%	38.1	65.5	87.4	_

# 2.4 健康风险评估

羊栖菜微量元素的健康风险评估结果见图 4。 从单一微量元素的风险来看,各微量元素的 THQ 值均小于1.00,故各微量元素的摄入对人体健康 不存在风险。从微量元素的种类上来看,As和Cd 对健康风险的占比最高,THQ平均值达到了0.34 和0.16。其次为元素Pb和Cr,THQ平均值约为 0.10。元素Cu、Ni和Zn引起的健康风险占比相对 较低。

从微量元素复合风险上来看,仅站位 T 和 X 的 生殖托存在 TTHQ 大于 1.00 的情况,表明居民经膳 食单独摄入这两个站位的生殖托会存在一定风险。 而站位 T 和 X 的气囊虽然尚属安全,但 TTHQ 的值 分别为 0.95 和 0.98,十分接近 1.00,存在一定的安 全隐患,应当引起重视。总体而言,羊栖菜主茎和侧 茎的微量元素复合风险低于生殖托和气囊。因此, 当地居民需控制羊栖菜生殖托及气囊的摄入,以减 少潜在的微量元素摄入风险。

### 2.5 讨论

羊栖菜对各微量元素的吸收富集能力不同,故 各微量元素的含量差异较大。羊栖菜中 Zn 和 Cu 含量相对较高,而此类元素是植物生长所必需的微 量元素,是生物体内多种酶的组成成分,对海藻体内 的生命活动有着较为重要的作用<sup>[13]</sup>。元素 Ni、Pb、 Cr 和 Cd 的含量相对较低,考虑到这些元素具有高 生物毒性<sup>[24]</sup>,羊栖菜对这部分微量元素可能存在选 择性吸收。此外本研究表明,因生长地域的差异,羊 栖菜的元素含量和富集程度也存在较大差别。以往 的研究表明,海洋环境污染会使藻体内元素含量与 水环境中元素含量达到动态平衡并呈现线性关 系<sup>[28]</sup>。不同海域海藻中的元素含量差异能有效地 反映不同沿海系统各元素的动态变化,进而反映水 质变化。Say 等(1990)在英国 1 个未受污染、5 个受 污染河口采集浒苔属(Enteromorpha)的样本进行 Zn、Cd、Hg 和 Pb 含量的测定,结果表明,不同河口 浒苔属的元素含量存在差异,且未受污染河口的浒 苔属样本中的元素含量相对较低<sup>[29]</sup>。Pise 等 (2013)通过对不同站位的 Porphyra vietnamensis 中 的重金属含量、脂质过氧化物(lipid peroxidation, LPO)与过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)等氧化应激标志物、抗氧 化酶过氧化氢酶(catalase, CAT)和谷胱甘肽硫转移 酶(glutathione S-transferase, GST)等的测定结果表 明,同一种海藻对不同的环境条件有不同的生化反 应<sup>[30]</sup>。本研究结果表明,羊栖菜不同部位对不同微 量元素的富集能力存在显著差异。从羊栖菜的生长 环境而言,虽然所有部位均和海水环境直接接触,但 是不同部位的生长及发育阶段不同,可能对微量元 素的吸收富集产生不同的影响。对不同生长期龙须 菜(Gracicilaria lemaneiformis)中重金属含量的历史 研究表明,不同生长期龙须菜对重金属的富集能力 不同,且随着龙须菜的生长,元素的富集量增加<sup>[31]</sup>。 针对坛紫菜(Porphyral haitanensis)的两个明显异性 世代——叶状体和丝状体的 Cu 胁迫结果表明,坛 紫菜自由丝状体对 Cu 离子的胁迫更为敏感,在急 性毒理试验中,在短时间内,较低浓度下,其生长状 况已经受到极显著的抑制现象<sup>[32]</sup>。



As 元素在羊栖菜中的含量相对较高,但之前的 研究表明,海藻中的As大多以毒性较小的有机态存 在,目前已知的仅无机砷(包括三价砷和五价砷)对 人体有致癌作用<sup>[33-34]</sup>。一般大部分微量元素主要 贮存在细胞壁中.但As在细胞中的分布位置较为不 同。有研究表明羊栖菜中As 主要贮存在胞液中,在 胞液中的分布比例达到了 58% [13]。在实际的海藻 生产中,加工过程中的洗涤、浸泡和蒸煮等步骤能够 降低最后成品中的 As 含量<sup>[35-36]</sup>,也有通过脱砷剂 等方法对羊栖菜进行脱砷处理,降低羊栖菜中的As 含量<sup>[37]</sup>。除此之外有研究表明,Se能够通过抗炎 症、抗氧化和抗凋亡等机制减轻 As 中毒的症状<sup>[38]</sup>。 而 Se 是浙江产羊栖菜特殊的营养成分<sup>[39]</sup>.故而羊 栖菜中的 Se 可能削弱了其中高含量的 As 对人体的 影响。食用羊栖菜在日本有着十分久远的历史,最 早在1643年的料理书中就记载了羊栖菜的烹饪方 法<sup>[40]</sup>。现今羊栖菜仍是日本最受欢迎的海藻食品 之一,调查报告显示羊栖菜人均日摄入量为 3.3 g<sup>[41]</sup>。目前并没有证据表明这种水平的 As 暴露对 人体造成有害影响。但是考虑到羊栖菜中 As 毒性 的复杂性,关于羊栖菜中 As 的风险评估仍需要进一 步的研究。

# 3 结论

洞头羊栖菜中微量元素的平均含量由高到底排 序为 As > Zn > Cu > Ni > Pb > Cr > Cd。针对羊栖 菜不同部位而言,虽然元素 As、Cd、Cr 和 Cu 的具体 含量差异随着采样区域的不同而存在一定差异,但 生殖托和气囊中的含量显著高于主茎和侧茎中的含 量。羊栖菜对于 As 元素有较强的富集能力。从微 量元素复合风险上来看,部分站位的生殖托存在 *TTHQ* 略大于 1.00 的情况,长期食用对人体健康存 在风险。但考虑到部分元素在生物体内不同形态的 毒性不同,可能存在风险高估的结果。总体而言,摄 人羊栖菜主茎和侧茎的微量元素复合风险低于生殖 托和气囊。

### 参考文献:

- [1] 王百龙,孙稚颖,周凤琴. 羊栖菜成分以及药理研究进展[J]. 山东中医杂志, 2015, 34(9): 722-725.
  WANG B L, SUN Z Y, ZHOU F Q. Research progress of components and pharmacological of *Sargassum fusiforme*[J]. Shandong Journal of Traditional Chinese Medicine, 2015, 34(9): 722-725.
- [2] 林立东,尚天歌,陈斌斌,等. 经济海藻羊栖菜(Sargassum fusiforme)受精卵生物活性物质及矿质元素成分分析[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(2): 429-436.
  LIN L D, SHANG T G, CHEN B B, et al. Analysis of bioactive substances and mineral elements in fertilized eggs of economic seaweed Sargassum fusiforme[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, 50(2): 429-436.
- [3] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(2015 年版一部)[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2015.
  Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China, 2015, Volume 1[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2015.
- [4] 顾观光. 神农本草经[M]. 于童蒙, 编译. 哈尔滨: 哈尔滨出版社, 2007.

GU G G. Shennong's herbal classic [M]. Compiled by YU T M. Harbin: Harbin Publishing House, 2007.

- [5] DUARTE C M, WU J P, XIAO X, et al. Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? [J]. Frontiers in Marine Science, 2017, 4: 100.
- [6] XIAO X, AGUSTI S, LIN F, et al. Nutrient removal from Chinese coastal waters by large-scale seaweed aquaculture [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 46 613.
- [7] WU J P, ZHANG H B, PAN Y W, et al. Opportunities for blue carbon strategies in China [J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 194: 105241.
- [8] XIAO X, AGUSTÍ S, YU Y, et al. Seaweed farms provide refugia from ocean acidification [J]. Science of the Total Environment, 2021, 776: 145192.
- [9] ZHENG Y H, JIN R J, ZHANG X J, et al. The considerable environmental benefits of seaweed aquaculture in China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, 33(4/5/6): 1 203-1 221.
- [10] 张石天,陈阳,张贤艳,等. 温州地区贝类养殖环境重金属的分布与评价[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(增刊1): 376-379. ZHANG S T, CHEN Y, ZHANG X Y, et al. Distribution and assessment of heavy metals in shellfish culture area of Wenzhou[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(S1): 376-379.
- [11] 叶林安,徐清,朱志清,等. 2016 年象山港海域水质分布变化与主要污染因子分析[J]. 科技通报, 2018, 34(12): 265-270.
  YE L A, XU Q, ZHU Z Q, et al. Analysis of distribution changes and major pollution factors in sea water of Xiangshan Bay in 2016 [J]. Bulletin of Science and Technology, 2018, 34(12): 265-270.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 2020年中国海洋生态环境状况公报[EB/OL]. [2021-06-06]. http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/jagb/202105/P020210526318015796036.pdf.
  Minstry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Bulletin of China's marine ecological environment in 2020[EB/OL]. [2021-06-06]. http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/jagb/202105/P020210526318015796036.pdf.
- [13] 赵艳芳,尚德荣,宁劲松,等. 羊栖菜中微量金属元素的亚细胞分区分布[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(6): 118-123.
  ZHAO Y F, SHANG D R, NING J S, et al. Subcellular distributions of trace metals in *Sargassum fusiforme*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(6): 118-123.
- [14] CONTRERAS-PORCIA L, MEYNARD A, LÓPEZ-CRISTOFFANINI C, et al. Marine metal pollution and effects on seaweed species [M]// KU-MAR M, RALPH P. Systems biology of marine ecosystems. Cham: Springer International Publishing, 2017: 35-48.
- [15] 李红, 党晨阳, 张金荣. 三种马尾藻不同部位挥发性成分的比较分析[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 281-288.
  LI H, DANG C Y, ZHANG J R. Comparative analysis of volatile components in different parts of three species of Sargassum[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 281-288.
- [16] 许秀兰. 微波消解 ICP-MS 法同时测定羊栖菜中 13 种元素及其食用风险评估[J]. 现代食品科技, 2013, 29(3): 636-639.
  XU X L. Determination of thirteen elements in *Sargassum fusiforme* by microwave digestion and ICP-MS and its health risk assessment[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(3): 636-639.
- [17] 陈星星,吴越,周朝生,等.浙江沿海藻类重金属含量测定及健康风险评价[J].浙江农业学报,2018,30(6):1029-1034.
  CHEN X X, WU Y, ZHOU C S, et al. Determination of heavy metal contents and health risk evaluation of algae in coastal region of Zhejiang Province[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30(6): 1029-1034.
- [18] SUN X, LIU Z W, JIANG Q C, et al. Concentrations of various elements in seaweed and seawater from Shen'ao Bay, Nan'ao Island, Guangdong coast, China: environmental monitoring and the bioremediation potential of the seaweed[J]. Science of the Total Environment, 2019, 659: 632-639.
- [19] LI Y J, FU X T, DUAN D L, et al. Comparison study of bioactive substances and nutritional components of brown algae Sargassum fusiforme strains with different vesicle shapes[J]. Journal of Applied Phycology, 2018, 30(6): 3 271-3 283.
- [20] 温州市洞头区委史志编纂委员会,温州市洞头区地方志研究室.洞头年鉴(2020)[M].北京:方志出版社,2020.
  The Historiography Compilation Committee of Dongtou District, Wenzhou, The Local Chronicles Research Office of Dongtou District, Wenzhou.

2020 Dongtong yearbook [M]. Beijing: Local Records Publishing, 2020.

- [21] 国家海洋局.海洋监测规范:第3部分 样品采集、贮存与运输:GB 17378.3—2007[S].北京:中国标准出版社,2008.
  State Oceanic Administration. The specification for marine monitoring—Part 3: sample collection, storage and transportation: GB 17378.3-2007
  [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [22] 王北洪,刘静,姚真真,等. 栽培食用菌重金属含量的测定及健康风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(2): 490-496.
  WANG B H, LIU J, YAO Z Z, et al. Determination and health risk evaluation of heavy metals in cultivated edible mushrooms[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(2): 490-496.
- [23] 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 等. 海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4 916-4 924.

YANG J Z, WANG Z L, GAO J W, et al. Accumulation and health risk of heavy metals in cereals, vegetables, and fruits of intensive plantations in Hainan Province[J]. Environmental Science, 2021, 42(10): 4 916-4 924.

- [24] United States Environmental Protection Agency. Risk based screening table [EB/OL]. [2021-05-13]. https://www.epa.gov/risk/regionalscreening-levels-rsls-generic-tables.
- [25] ZAYED A, LYTLE C M, QIAN J H, et al. Chromium accumulation, translocation and chemical speciation in vegetable crops[J]. Planta, 1998, 206(2): 293-299.
- [26] PAN Y R, WERNBERG T, DE BETTIGNIES T, et al. Screening of seaweeds in the East China Sea as potential bio-monitors of heavy metals [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(17): 16 640-16 651.
- [27] 国家环境保护局,国家海洋局.海水水质标准:GB 3097—1997[S].北京:中国标准出版社,1998.
  State Environmental Protection Administration, State Oceanic Administration. Sea water quality standard: GB 3097-1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998.
- [28] 康士秀, 沈显生, 黄字营, 等. 青岛海藻重元素富集特性的 SR-XRF 分析及对海洋环境监测的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(1): 94-97.

KANG S X, SHEN X S, HUANG Y Y, et al. SR-XRF analysis of characteristics of heavy element concentration in Qingdao algae and application to monitoring oceanic pollution [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2003, 23(1): 94-97.

- [29] SAY P J, BURROWS I G, WHITTON B A. Enteromorpha as a monitor of heavy metals in estuaries [J]. Hydrobiologia, 1990, 195(1): 119-126.
- [30] PISE N M, GAIKWAD D K, JAGTAP T G. Oxidative stress and antioxidant indices of the marine red alga *Porphyra vietnamensis* [J]. Acta Botanica Croatica, 2013, 72(2): 197-209.
- [31] 罗洪添. 大型海藻龙须菜对重金属的生物修复效应[D]. 广州: 暨南大学, 2019. LUO H T. Bioremediation effects of heavy metals by seaweed *Gracicilaria lemaneiformis*[D]. Guangzhou: Jinan University, 2019.
- [32] 郭翠. 重金属离子 Cu 对坛紫菜叶状体和丝状体的毒性效应[D]. 汕头: 汕头大学, 2011. GUO C. Toxic effects of heavy metal Cu on the thallus and conchocelis of *Porphyral haitanensis*[D]. Shantou: Shantou University, 2011.
- [33] Food and Agriculture Organization of the United Nations & Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, World Health Organization. Evaluation of certain contaminants in food: seventy-second report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on food additives[M]. Switzerland: WHO Press, 2011: 21-37.
- [34] 张伟,黄良民.海洋生物体内砷含量及其形态研究进展[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(1): 41-53.
  ZHANG W, HUANG L M. Advances of arsenic contents and different species in marine organisms[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(1): 41-53.
- [35] HANAOKA K, YOSIDA K, TAMANO M, et al. Arsenic in the prepared edible brown alga hijiki, *Hizikia fusiforme*[J]. Applied Organometallic Chemistry, 2001, 15(6): 561-565.
- [36] PARK G Y, KANG D E, DAVAATSEREN M, et al. Reduction of total, organic, and inorganic arsenic content in *Hizikia fusiforme* (*Hijiki*) [J].
  Food Science and Biotechnology, 2018, 28(2): 615-622.
- [37] 张燕平, 洪泳平, 张虹, 等. 脱砷羊栖菜的营养分析评价[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(1): 129-132. ZHANG Y P, HONG Y P, ZHANG H, et al. Evaluation on nutritional components of obviation arsenic of *Sargassum fusiforme*[J]. Food Research and Development, 2009, 30(1): 129-132.
- [38] ADEDARA I A, FABUNMI A T, AYENITAJU F C, et al. Neuroprotective mechanisms of selenium against arsenic-induced behavioral impairments in rats[J]. NeuroToxicology, 2020, 76: 99-110.
- [39] 戴志远,洪泳平,张燕平,等. 羊栖菜的营养成分分析与评价[J]. 水产学报, 2002, 26(4): 382-384.
  DAI Z Y, HONG Y P, ZHANG Y P, et al. Evaluation on nutritional components of *Sargassum fusiforme*[J]. Journal of Fisheries of China, 2002, 26(4): 382-384.
- [40] 日本ひじき協議会.ひじきの歴史[EB/OL]. [2021-05-13]. https://www.hijiki.org/trivia-history/.
  Japan Sargassum fusiforme Association. The history of Sargassum fusiforme[EB/OL]. [2021-05-13]. https://www.hijiki.org/trivia-history/.
- [41] NAKAMURA Y, NARUKAWA T, YOSHINAGA J. Cancer risk to Japanese population from the consumption of inorganic arsenic in cooked hijiki [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(7): 2 536-2 540.

# Concentration and health risk assessment of trace elements in different tissues of *Sargassum fusiforme*

ZHU Yaojia, LIU Yuxuan, WANG Hengwei, WANG Zhiyin, LI Dan, WU Jiaping\* (Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS) was used to analyze the concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in the main blade, lateral blade, receptacles and pneumathode of *Sargassum fusiforme* at maturity, to reveal the distributions of trace elements in different tissues of *Sargassum fusiforme*. Our results showed that *Sargassum fusiforme* had a strong ability to enrich trace elements, which varied in different tissues. The trace elements usually accumulated more in receptacles and pneumathode. The distribution patterns of As, Cd, Cr and Cu in different tissues were similar, while that of Ni, Pb and Zn differed and varied with site investigated. The enrichment coefficient of As in alga was the highest, while that of Cr was the lowest. According to the results of risk assessment, there is no health risk to human body when taking *Sargassum fusiforme* as food except receptacles from two sites. Comparatively, the health risk of consuming branches is much lower.

Key words: marine chemistry; *Sargassum fusiforme*; algal tissue; trace element; health risk assessment DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2022.03.007

(责任编辑:方建勇)