

海藻中碘的形态及其食用安全性研究进展

丁海燕, 赵艳芳, 孙晓杰, 康绪明, 盛晓风, 尚德荣, 翟毓秀*

(中国水产科学研究院黄海水产研究所, 国家水产品质量监督检验中心,
农业农村部水产品质量安全检测与评价重点实验室, 青岛 266071)

摘 要: 碘是人体甲状腺激素合成的必需元素, 也是人体必需的微量元素之一。依据世界卫生组织提出的食盐加碘补碘策略, 1994 年我国颁布了《食盐加碘消除碘缺乏危害管理条例》。但长期过量摄入无机碘, 不仅会引起甲状腺功能失调, 增加患甲状腺癌的几率, 还会导致其他组织器官病变。海藻是天然的食用碘资源, 有机碘含量最高达 80%。通过海藻碘、有机碘和无机碘的毒性研究发现, 长期大量摄入海藻碘和有机碘对甲状腺的危害要小很多。本文分析了我国补碘现状及国内外碘的限量, 对比海藻碘、有机碘和无机碘的毒性差异, 阐述当前海藻碘的毒性研究进展, 为进一步开展海藻碘的食用安全性评估和制定碘的限量提供参考。

关键词: 海藻碘; 形态; 食用安全性

Research process on the speciation and edible safety of seaweeds iodine

DING Hai-Yan, ZHAO Yan-Fang, SUN Xiao-Jie, KANG Xu-Ming, SHENG Xiao-Feng,
SHANG De-Rong, ZHAI Yu-Xiu*

(Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, National Center for Quality Supervision
and Test of Aquatic Products, Key Laboratory of Testing and Evaluation for Aquatic Product Safety and Quality,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao 266071, China)

ABSTRACT: Iodine is the essential element of biosynthesis of thyroid hormones and also is the essential trace element in human body. According to the world health organization recommended the universal salt iodization, our government promulgates *Regulation on the management of eliminating iodine deficiency by universal salt iodization* in 1994. But excessive iodine intake for a long time would cause thyroid malfunction, and increase thyroid cancer probability, and also could cause lesion of other organic tissue. Seaweeds are the natural iodine resource, and the organic iodine content is almost 80 percent. Through the study of seaweed iodine, organic iodine and inorganic iodine toxicity, long-term high intake of seaweed iodine and organic iodine is much less harmful to the thyroid gland. This paper analyzed the current situation of iodine supplementation in China and the iodine limits at home and abroad, compared the toxicity differences of seaweed iodine, organic iodine and inorganic iodine, and expounded the current research progress of the toxicity of seaweed iodine, so as to provide reference for the further evaluation of the edible safety of seaweed iodine and the formulation of iodine limits.

KEY WORDS: seaweeds iodine; speciation; edible safety

基金项目: 中国水产科学研究院黄海水产研究所级基本科研业务费项目(20603022017015、20603022016007)

Fund: Supported by Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, YSFRI, CAFS (20603022017015, 20603022016007)

***通讯作者:** 翟毓秀, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为水产品质量与安全。E-mail: zhaiyx@ysfri.ac.cn

***Corresponding author:** ZHAI Yu-Xiu, Professor, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China. E-mail: zhaiyx@ysfri.ac.cn

1 引言

碘被称为生命元素、智慧元素,在人体中的含量极少,却是合成甲状腺激素必需的成分,也是人体生长必需的微量元素之一。1811年法国人 Bernard Coutois 首次在褐藻中发现碘,继而 1895 年 Baumann 发现碘是甲状腺素的特定组分,并且与甲状腺的活性有着密切关系。海藻是碘的天然浓缩器,尤其是海带,可将海水中微量的碘富集浓缩几百万倍。海带中的碘含量比一般的富碘矿含量高,干海带中碘含量大都为 0.3%~0.6%,有的甚至超过 1.0%^[1-4]。众所周知,海藻中的碘被称为“活性碘”,是可持续的绿色的补碘食品。目前人体补碘的主要方式是采用食盐中添加无机碘,食源性碘的危害也主要是以碘化钾和碘酸钾为主要研究对象开展的。随着我们对海藻碘的研究和认识,海藻碘也成为我国科学补碘的一个新导向。然而,在 2018 年 8 月到 2019 年 1 月,德国先后 5 次通过欧盟食品和饲料快速预警系统(rapid alert system for food and feed, RASFF)通报,韩国出口的海藻产品因为碘含量过高(72.51~3725 mg/kg)而导致不合格,其中有 4 次是直接来自韩国出口至德国^[5-9];4 次通报我国出口的海藻产品的碘含量过高(36~20620 mg/kg)不合格,都是经由其他国家转入德国^[10-13]。海藻中的碘的食用安全性仍未有科学的论断。为此,本文主要以海藻活性碘为对象,探讨海藻碘的食用安全性研究现状及世界相关的国家和组织对海藻中碘的限量要求,为以后开展海藻碘的食用安全性评估工作和海藻产品的国际贸易提供参考。

2 我国全民补碘的现状

从 20 世纪五六十年代起,我国开始了对克汀病的研究。缺碘是克汀病发病的主要原因,因此民众的膳食补碘也引起了政府部门的高度重视。根据世界卫生组织推荐的评价标准,当时我国面临碘缺乏病风险的人口可能高达 7 亿多,1994 年世界卫生组织和联合国儿童基金会推荐,在食盐中添加碘,作为一种安全的、低成本而且可持续的补碘策略以保证广大民众的碘的摄入量^[14]。为了消除和防治地方性碘缺乏病,1994 年我国政府也颁布《食盐加碘消除碘缺乏危害管理条例》,采用食盐中添加碘酸钾和碘化钾的方式进行补碘^[15]。从此以后,我国开始了全民补碘行动,碘盐已经伴随我们生活 20 多年。经过努力,2000 年我国已经基本消除了地方性碘缺乏病,但是至今仍持续保持消除碘缺乏的危害状态^[16]。在我国,食盐中碘的含量会根据监测结果进行不断调整,2012 年中国根据居民的膳食摄入变化,下调碘盐浓度标准,降低了人群通过碘盐摄入的碘含量,确保了人群碘营养水平总体适宜^[16]。

3 碘的食用安全限量分析

为了尽快彻底消除人体缺碘带来的疾病隐患,1994 年世界卫生组织推荐以食盐加碘的补碘方式,在全球展开了补碘行动。其推荐的每天碘的摄入量^[17,18]:一周岁以内的婴幼儿每天 50 μg ; 2~6 岁的每天 90 μg ; 7~12 岁的每天 120 μg ; 大于 12 岁及成人每天 150 μg ; 孕妇和哺乳期女性每天 200 μg 。从 1994 年到 2006 年间对 83 个补碘国家的统计结果来看,有 76 个国家的尿碘中位值在 100~199 $\mu\text{g/L}$ 和 200~299 $\mu\text{g/L}$; 7 个国家的尿碘值高于 300 $\mu\text{g/L}$ ^[18]。约有 31% 的人群仍有碘摄取不足的问题,主要受影响的区域分布在东南亚和欧洲^[18]。

由于碘的摄入不足和过量都会对人体产生破坏,从世界卫生组织推荐全球补碘之后,有部分国家和组织对人体碘的摄入量展开了研究,提出了自己的推荐摄入量。中国营养学会根据我国居民的膳食结构分析结果,推荐我国居民膳食碘元素每天最高可耐受摄入量为,从 4~6 岁为 200 μg ; 7~11 岁为 300 μg ; 11~13 岁为 400 μg ; 14~17 岁为 500 μg ; 18 岁以上以及孕妇为 600 μg ^[19]。

欧盟的相关政策规定不同年龄阶段人群碘每天最高可耐受摄入量: 1~3 岁为 200 μg ; 4~6 岁为 250 μg ; 7~10 岁为 300 μg ; 11~14 岁为 450 μg ; 15~17 岁为 500 μg ; 成人 600 μg ; 孕妇及哺乳期妇女为 600 μg ^[20]。并针对碘的食用安全进行了风险评估,认为摄取富含碘的藻类食品不能随便食用,尤其当藻类食品的碘含量超过 20 mg/kg(干重),即便是碘缺乏地区人群,也会导致碘摄入量危险性地严重超标^[21]。据此,德国认为食用微量碘含量超过 20 mg/kg 海藻产品,即会导致碘的摄入量超过人体的每天最高可耐受摄入量,由于没有证据证明这种碘的超量摄入方式对健康的负面影响可以忽略不计,则需对海藻及相关食品提出碘的限量要求,但是到目前为止,欧盟官方仍旧没有针对海藻食品制订碘含量的限量标准。德国依据此参考限量评估结果^[21],多次因碘含量不合格通报海藻食品。

虽然德国对海藻食品严格采用碘的含量不超过 20 mg/kg 的限量标准,但是同属于欧盟成员国的法国却另有规定。法国食品环境和职业健康及安全局(French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety, ANSES) 在 Avis l'Anses Saisine n 2012-SA-0144 中规定^[22]: 掌状海带、糖海带和真江蓠中碘不得超过 6000 mg/kg(干重),其他 9 种授权认可的海藻中碘的最大限量为 2000 mg/kg(干重),其中是否包括海带、紫菜和裙带菜,并未做明确说明。显然欧盟对海藻中碘允许限量缺乏科学统一的标准,德国仅片面的采用了欧盟风险评估的数据作为限量标准,缺乏科学性,而且其对海藻食品中碘的限量要求如此苛刻,严重制约了我国海藻类食品的出口贸易。要想打破这一贸易壁垒,扩大我国海藻食品的贸易市场,提高海藻类长寿食

品的在民众心目中的地位,就需要我们加大对海藻食品中的功能性成分的研究力度,并对海藻中碘的食用安全性进行科学全面的评估。从而让民众知道海藻食品对人体的益处,远远大于碘摄入过量带来的弊端。

在人体补碘的过程中,有机碘和无机碘的食用安全性的差异,以及海藻中的有机碘和我们平常补充的碘酸钾对人体产生的生物效应的差异性都是亟需解决的问题。这些问题的进一步研究有助于我们进一步认识海藻碘,为民众科学补碘提供重要的科学依据。

4 海藻碘的形态及毒性研究现状

4.1 海藻碘的形态研究

我国有关海藻中碘的研究是从 20 世纪 60 年代开始,主要以海带为原料提取碘元素,为解除我国碘缺乏的国情发挥了重要作用^[23]。海带中碘的形态包括无机态碘和有机态碘 2 大类型,其中有机态碘常被称为“海藻活性碘”。有研究表明海洋生物中的碘主要是与氨基酸、硬蛋白等结合形成的^[24-28]。韩丽君等^[29]测定海带中有机碘的含量约在 10%~40%之间,海带中碘的平均含量占鲜重的 0.133%,同时海带不同部位碘的含量不同,叶部外缘含碘较多,是叶中部的 2 倍左右,尤其叶尖部的含量达到鲜重的 0.183%;而有机碘的含量分布规律则不同,有机碘的含量在靠近根部的位置较高,为根部鲜重的 13.9%。碘在海带不同部位中的分布不同,亚细胞分布也有差异,这一特点可能与海带的生命活动规律有关^[29-32]。Vanessa 等^[27]在研究可食用海藻中不同形态碘和溴的生物利用效率时,发现许多可食用的海藻中都含有一定量的一碘酪氨酸和 3,5-二碘酪氨酸。越来越多的研究证明,一碘酪氨酸和 3,5-二碘酪氨酸是海带中的有机碘主要存在形态^[33-38]。刘崑等^[39]研究发现,紫菜中含有约 76%的未知形态有机碘。

4.2 海藻碘和无机碘的补碘功效对比研究

目前我国碘缺乏的危害已经被有效防控,随着人们膳食结构的改变,当前世界卫生组织推荐补碘方式,是否存在补碘过量的现象,至今未有明确论断。这一问题也逐渐引起社会的广泛关注。有研究表明长期碘酸钾过量会导致大鼠甲状腺处于亚临床损伤状态,明显影响甲状腺的健康^[40];随着补碘时间的延长和剂量的增加,甲状腺结构的破坏也越来越严重^[41]。许钺铨等^[42,43]发现过量碘能够抑制甲状腺细胞自噬,诱导其凋亡;而且过量碘可能与桥本甲状腺炎的发病有关。长期过量摄取抗心律失常的药物胺碘酮,易造成甲状腺功能亢进和甲状腺功能减退等病症;超充足的碘摄入量易引起 Wolff-Chaikoff 反应,增加得乳突状甲状腺癌和滤泡型甲状腺癌的几率^[44]。轻微过量摄取碘会导致临时性的体内碘升高,甲状腺内的

有机碘和甲状腺激素增加;过量摄取碘会抑制碘离子从中毒的甲状腺和甲状腺激素过量的甲状腺中释放,其中有 0.01%~0.06%的暴露人群会产生甲状腺功能减退的症状^[20]。邹晓燕^[45]研究发现高碘能够抑制大鼠主动脉内皮细胞增殖,降低细胞活性,诱导细胞凋亡,使大鼠主动脉内皮细胞抗氧化能力降低。当人体连续 14 d 每天摄入碘量达到 1700 μg 和 4500 μg 时,人体甲状腺激素和促甲状腺释放激素的含量升高,但是没有对甲状腺功能产生影响^[46,47]。随机试验,志愿者每日碘的摄入量为 750 μg 时,会出现次甲状腺激素水平升高^[48]。

以上的研究结果说明长期过量摄入无机碘会引起甲状腺内各种激素的含量失衡,甚至会对甲状腺产生危害,还会影响到其他组织器官。偶尔碘摄入过量对人体的危害性、更加安全的补碘措施以及食盐添加无机碘补碘方式的安全性等都是需要进一步研究的问题。

随着大家对海藻功能性成分的分析研究,有关海藻碘的提取及功能性方面的研究也日益增加。迟玉森^[49]研究发现小鼠日摄入无机碘量超过 40 μg 时,即出现甲状腺明显肿大,而日摄入海带有机碘的量达 200 μg 时,甲状腺仍未见明显肿大;海带中的有机碘和 3,5-二碘酪氨酸对高碘性甲状腺肿的小白鼠起到一定的治疗作用。这一研究提示我们,相同剂量的不同形态的碘对人体的甲状腺产生的作用应该有很大差异。在小鼠引用水中持续补充碘化钾 2 年,发现小鼠的甲状腺组的变形可能是由于非基因毒性增值依赖机制引起^[50]。刘丹等^[51]发现, KI 与甲状腺片混合各组 ATP 酶活性均降低,而二碘酪氨酸(diiodotyrosine, DIT)与甲状腺片混合各组 ATP 酶活性无明显变化;与甲亢模型组比较, DIT 中高剂量组 ATP 酶水平都显著升高,而 KI 各组均无显著性变化;说明 DIT 可能对甲状腺片有拮抗作用; DIT 可能通过提高甲亢大鼠 ATP 酶活性而达到保护心肌的作用,而且较高剂量下 DIT 较 KI 更加安全可靠。研究发现 DIT 在一定程度上可降低血清 FT3、FT4 水平,对甲状腺片所致甲亢产生一定的拮抗作用;而无机碘组仅有尿碘量增加, KI 对血清 FT3、FT4 水平无影响^[52]。对比有机碘和无机碘对人体甲状腺细胞凋亡的影响发现,高浓度的有机碘和无机碘均会引起甲状腺细胞的形态改变并增强细胞凋亡的发生,且有机碘 DIT 对细胞的影响较 KI 的弱^[53]。

以上研究发现,相对于无机碘,海带碘的食用安全性更高,是更加科学的补碘方式。海藻在我国的广泛食用,对海藻碘的功能及毒性的研究较全面,也为海藻碘作为保健食品开辟了一个新途径。据此,我国政府在 2018 年颁布了《GB 1903.39-2018 食品安全国家标准 食品营养强化剂海藻碘》,将海藻碘列入可食用的补碘材料,这是对海藻碘的营养价值的肯定^[54]。这也表征在人体补碘方面,我国政府走在了科学合理补碘的前列。

5 小 结

碘营养水平与甲状腺功能有关, 甲状腺功能异常患者和健康者都需关注碘营养状态, 需避免盲目补碘^[55]。研究表明^[7]大多数可食用海藻都富含碘, 其范围从几十到几千毫克每千克; 且有机碘含量占总碘的比例较大^[9,12]。目前海藻产业的主要方向仍旧是食品行业, 作为食品原料进行再加工。因此, 藻类食品的食用安全性也是关系整个产业发展的重要因素。因此需要在明确海藻中有机碘含量和成分的基础上, 对比研究海藻中碘和食盐中常添加的无机碘的毒性效应差异, 开展食品中碘的暴露评估, 科学合理的评价海藻中碘的食用安全性, 从而更好地为我国海藻产业的壮大和发展服务。

参考文献

- [1] Gall EA, Küpper FC, Kloareg B. A survey of iodine content in *Laminaria digitata* [J]. Botan Mar, 2004, 47: 30-37.
- [2] Yang M, Her N, Ryu J. Determination of perchlorate and iodide concentrations in edible seaweeds [J]. Int J Environ Sci Technol, 2014, 11(3): 565-570.
- [3] Yeh TS, Hung NH, Lin TC. Analysis of iodine content in seaweed by GC-ECD and estimation of iodine intake [J]. J Food Drug Anal, 2014, 22: 189-196.
- [4] Sun J, Wang D, Cheng H, et al. Use of ion-pairing reagent for improving iodine speciation analysis in seaweed by pressure-driven capillary electrophoresis and ultraviolet detection [J]. J Chromatogr A, 2015, 1379: 112-117.
- [5] European Union Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF)-Alert. High content of iodine (323 mg/kg - ppm) in dried seaweed from South Korea. 2019. 0220 [EB/OL]. [2019-01-21]. https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/portal/?event=notificationDetail&NOTIF_REFERENCE=2019.0220.
- [6] European Union Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF)-Alert. High content of iodine (300 mg/kg - ppm) in dried brown seaweed from South Korea, via the Netherlands. 2019. 0188 [EB/OL]. [2019-01-17]. https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/portal/?event=notificationDetail&NOTIF_REFERENCE=2019.0188.
- [7] European Union Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF)-Alert. High content of iodine (3557; 3725 mg/kg - ppm) in dried seaweed from South Korea, via the Netherlands. 2019. 0052 [EB/OL]. [2019-01-07]. https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/portal/?event=notificationDetail&NOTIF_REFERENCE=2019.0052.
- [8] European Union Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF)-Alert. High content of iodine (261 mg/kg - ppm) in dried algae from South Korea. 2018. 3806 [EB/OL]. [2018-12-28]. https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/portal/?event=notificationDetail&NOTIF_REFERENCE=2018.3806.
- [9] European Union Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF)-Alert. High content of iodine (72. 51 mg/kg - ppm) in dried roasted seaweed from South Korea. 2018. 3499 [EB/OL]. [2018-12-03]. https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/portal/?event=notificationDetail&NOTIF_REFERENCE=2018.3499.
- [10] European Union Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF)-Alert. High content of iodine (175 mg/kg - ppm) in dried algae from China, via Spain. 2019. 1018 [EB/OL]. [2019-03-18]. https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/portal/?event=notificationDetail&NOTIF_REFERENCE=2019.1018.
- [11] European Union Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF)-Alert. High content of iodine (20620 mg/kg - ppm) in dried seaweed from China, via the Netherlands. 2019. 0526 [EB/OL]. [2019-02-12]. https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/portal/?event=notificationDetail&NOTIF_REFERENCE=2019.0526.
- [12] European Union Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF)-Alert. High content of iodine (36 mg/kg - ppm) in dried roasted seaweed from China, via the Netherlands. 2018. 2985 [EB/OL]. [2018-10-23]. https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/portal/?event=notificationDetail&NOTIF_REFERENCE=2018.2985.
- [13] European Union Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF)-Alert. High content of iodine (63 mg/kg - ppm) in dried seaweed from China, via the Netherlands. 2018. 2410 [EB/OL]. [2018-08-24]. https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/portal/?event=notificationDetail&NOTIF_REFERENCE=2018.2410.
- [14] World Summit for children – mid decade goal: Iodine deficiency disorders [Z].
- [15] 中华人民共和国国务院令 163 号. 食盐加碘消除碘缺乏危害管理条例[Z]. The People's Republic of China State Department ream No.163. Regulations on eliminating the iodine deficiency hazard by salt iodization [Z].
- [16] 2018 年碘与甲状腺疾病大会工作组. 2018 年全国第三届碘与甲状腺疾病大会共识[J]. 中华地方病学杂志, 2018, 37(11): 861-862. Iodine and Thyroid Disease Conference. Consensus of the third national iodine and thyroid disease conference in 2018 [J]. Chin J Endemiol, 2018, 37(11): 861-862.
- [17] World Health Organization, United Nations Children's Fund, International Council for the Control of Iodine Deficiency Disorders. Recommended iodine levels in salt and guidelines for monitoring their adequacy and effectiveness [C]. Geneva: World Health Organization, 1996.
- [18] World Health Organization, United Nations Children's Fund, International Council for the Control of Iodine Deficiency Disorders. Assessment of iodine deficiency disorders and monitoring their elimination: a guide for programme managers, 3rd edition [C]. Geneva: World Health Organization (WHO), 2007.
- [19] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量[M]. 北京: 科学出版社, 2014. Chinese Nutrition Society. Chinese dietary reference intakes [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [20] Scientific Committee on Food-Scientific Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies. European Food Safety Authority (EFSA). Tolerable upper intake levels for vitamins and minerals [Z].
- [21] Commission Recommendation (EU) 2018/464 of 19 March 2018 on the monitoring of metals and iodine in seaweed, halophytes and products based on seaweed (Text with EEA relevance) [Z].
- [22] AVIS de l'Anses relatif à l'évaluation des risques liés aux graisses bovines collectées après fente de la carcasse pour une utilisation en alimentation

- des espèces de rente [S].
- [23] 李晓川. 我国鲜海带加工的综合利用[J]. 中国水产, 2012, (10): 22–23.
Li XC. The comprehensive utilization of fresh kelp processing in China [J]. Chin Fish, 2012, (10): 22–23.
- [24] Shaw TI. The mechanism of iodine accumulation by the brown seaweed *Laminaria digitala*, the uptake of ^{131}I . respiration and iodide uptake [J]. Proceed Royal Soc B, 1959, 152: 356–357.
- [25] Shaw TI. The mechanism of iodine accumulation by the brown seaweed *Laminaria digitala*. II Respiration and iodide uptake [J]. Proceed Royal Soc B, 1960, 946: 109–117.
- [26] 迟玉森, 庄桂东, 黄国清, 等. 海带生物有机活性碘的提取、分离、纯化和结构验证测定[J]. 食品与生物技术学报, 2009, 28(6): 781–785.
Chi YS, Zhuang GD, Huang GQ, *et al.* Extraction, purification, and structural identification of an organic active iodide from kelp [J]. J Food Sci Biotechnol, 2009, 28(6): 781–785.
- [27] Romarís-Hortas V, Bermejo-Barrera P, Moreda-Piñeiro J, *et al.* Speciation of the bio-available iodine and bromine forms in edible seaweed by high performance liquid chromatography hyphenated with inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Anal Chim Acta, 2012, 745: 24–32.
- [28] Romarís-Hortas V, Bianga J, Moreda-Piñeiro, *et al.* Speciation of iodine-containing proteins in Nori seaweed by gel electrophoresis laser ablation ICP-MS [J]. Talanta, 2014, 127: 175–180.
- [29] 韩丽君, 范晓. 海藻中有机碘的研究I. 海藻中有机碘含量测定[J]. 水生生物学报, 1999, 23(5): 489–492.
Han LJ, Fan X. Studies on organic iodine from seaweed I. The determination of the content of organic iodine in seaweed [J]. Acta Hydrobiol Sin, 1999, 23(5): 489–492.
- [30] Nitschke U, Stengel DB. A new HPLC method for the detection of iodine applied to natural samples of edible seaweeds and commercial seaweed food products [J]. Food Chem, 2015, 172: 326–334.
- [31] Verhaeghe EF, Frayse A, Guerquin-Kern JL, *et al.* Microchemical imaging of iodine distribution in the brown alga *Laminaria digitata* suggests a new mechanism for its accumulation [J]. J Biol Inorg Chem, 2008, 13(2): 257–269.
- [32] Mireille AA, Lalit M. Srivastava, traslocation of iodine in *Laminaria Saccharia* (Phaeophyta) [J]. J Phycol, 1985, 21(2): 330–333.
- [33] 韩丽君, 范晓, 李宪瑾. 海藻中有机碘的研究II. 存在形态及含量[J]. 海洋科学集刊, 2001, 43: 129–135.
Han LJ, Fan X, Li XC. Studies on organic iodine in seaweed II. The states and content of organic iodine in seaweed [J]. Stud Marina Sin, 2001, 43: 129–135.
- [34] Wang X, Xu J, Wang L, *et al.* Optimization of microwave-ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis extraction of iodine amino acids in laminaria by high performance liquid chromatography with a photodiode array detector [J]. Algal Res, 2019, 39: 101452.
- [35] Sun JN, Wang D, Cheng HY, *et al.* Use of ion-pairing reagent for improving iodine speciation analysis in seaweed by pressure-driven capillary electrophoresis and ultraviolet detection [J]. J Chromatogr A, 2015, 1379: 112–117.
- [36] Shah M, Wuilloud RG, Kannam kumarath SS, *et al.* Iodine speciation studies in commercially available seaweed by coupling different chromatographic techniques with UV and ICP-MS detection [J]. J Anal At Spectrm, 2005, 20: 176–182.
- [37] Romarís-Hortas V, Bermejo-Barrera P, Moreda-Piñeiro A. Ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis for iodinated amino acid extraction from edible seaweed before reversed-phase high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. J Chromatogr A, 2013, 1309: 33–40.
- [38] Wang SL, Yi Ling, Ye LH, *et al.* Microwave-assisted micellar extraction of organic and inorganiodines using zwitterionic surfactants [J]. J Chromatogr A, 2017, 1509: 50–59.
- [39] 刘崴, 曹巍然, 胡俊栋, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子质谱法测定紫菜中的碘形态[J]. 分析试验室, 2017, 36(9): 1028–1031.
Liu W, Cao WR, Hu JD, *et al.* Determination of iodine species in seaweed samples using high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chin J Anal Lab, 2017, 36(9): 1028–1031.
- [40] 满娜. 慢性碘过量对甲状腺功能和形态影响的实验研究[D]. 沈阳: 中国医科大学, 2005.
Na M. The effects of chronic iodine excess on thyroid function and structure [D]. Shenyang: China Medical University, 2005.
- [41] 滕晓春, 杨帆, 单忠艳, 等. 慢性碘过量对具有自身免疫遗传倾向的 NOD. H-2h4 小鼠甲状腺功能和形态影响的实验研究[J]. 中华内分泌代谢杂志, 2011, 27(4): 331–334.
Teng XC, Yang F, Shan ZY, *et al.* Effects of chronic iodine excess on thyroid function and structure in autoimmune-prone NOD. H-2h4 mice [J]. Chin J Endocrinol Metab, 2011, 27(4): 331–334.
- [42] 许钺钺, 郑婷婷, 吴菲, 等. 过量碘调节甲状腺细胞自噬和凋亡以及与桥本甲状腺炎关系的研究[J]. 细胞与分子免疫学杂志, 2015, 31(7): 965–967, 971.
Xu CC, Zheng TT, Wu F, *et al.* Effects of excessive iodine on thyrocytes' autophagy and apoptosis and relationship with hashimoto's thyitoiditis [J]. Chin J Cell Mol Immunol, 2015, 31(7): 965–967, 971.
- [43] 许钺钺. 过量碘调节甲状腺细胞自噬和凋亡及与桥本甲状腺炎关系的研究[D]. 南京: 江苏大学, 2015.
Xu CC. Effects of Excessive iodine on thyrocytes' autophagy and apoptosis and relationship with hashimoto's thyitoiditis [D]. Nanjing: Jiangsu University, 2015.
- [44] Koukkou EG, Roupas ND, Markou KB. Effect of excess iodine intake on thyroid on human health [J]. Minerva Med, 2017, 108(2): 136–146.
- [45] 邹晓燕. 高碘对体外培养大鼠主动脉内皮细胞损伤租用的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
Zou XY. Damage effects of high iodine on endothelial cells from the rat aorta segments [D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [46] Paul T, Meyers B, Witorsch RJ, *et al.* The effect of small increases in dietary iodine on thyroid function in euthyroid subjects [J]. Metabolism, 1988, 37: 121–124.
- [47] Gardner DF, Centor RM, Utiger RD. Effects of low dose oral iodide supplementation on thyroid function in normal men [J]. Clin Endocrinol, 1988, 28: 283–288.
- [48] Chow CC, Phillips DI, Lazarus JH, *et al.* Effect of low dose iodide supplementation on thyroid function in potentially susceptible subjects: Are dietary iodide levels in Britain acceptable? [J]. Clin Endocrinol, 1991, 34: 413–416.
- [49] 迟玉森. 海带中有机碘的动物补碘评价[J]. 中国食品学报, 2002, 2(3): 37–42.

- Chi YS. The evaluation of organic iodine in Kelp supplementing iodine on animal [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2002, 2(3): 37–42.
- [50] EGVM (Expert group on Vitamins and Minerals). Draft report on safe upper levels for vitamins and minerals [Z].
- [51] 刘丹, 蔺新英, 于福贵, 等. 海带有机碘与无机碘对甲状腺功能亢进 Wistar 大鼠心肌 ATP 酶的影响[J]. 中华地方病学杂志, 2015, 34(9): 646–649.
- Liu D, Lin XY, Yu FG, *et al.* Contrastive study on the effect of 3,5-diiodotyrosine and potassium iodide on myocardial ATPase in hyperthyroidism wistar rats [J]. Chin J Endemiol, 2015, 34(9): 646–649.
- [52] 王翠平, 蔺新英, 刘丹, 等. 海带有机碘与无机碘对甲亢大鼠血清 FT3 和 FT4 及尿碘的影响[J]. 环境与健康杂志, 2016, 33(4): 296–299.
- Wang CP, Lin XY, Liu D, *et al.* Effects of 3,5-diiodotyrosine and potassium iodide on serum FT3, FT4 and urine iodine in hyperthyroid rats [J]. J Environ Health, 2016, 33(4): 296–299.
- [53] 邹晓燕, 蔺新英, 陈兆堂, 等. 有机碘和无机碘对人甲状腺细胞凋亡的影响[J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(2): 120–124.
- Zou XY, Lin XY, Chen ZT, *et al.* Influence of organic iodine and inorganic iodine on thyrocytes apoptosis [J]. J Environ Health, 2013, 30(2): 120–124.
- [54] GB 1903.39-2018 食品安全国家标准 食品营养强化剂 海藻碘[S].
- GB 1903.39-2018 National food safety standard-Nutritive fortifier-Seaweeds iodine [S].
- [55] 王凤玲, 侯振江, 刘玉枝, 等. 甲状腺功能异常患者碘营养状态的评估分析[J]. 中国医药导报, 2018, 15(25): 63–66.
- Wang FL, Hou ZJ, Liu YZ, *et al.* Analysis of iodine nutritional status in patients with abnormal thyroid function [J]. Chin Med Herald, 2018, 15(25): 63–66.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



丁海燕, 助理研究员, 主要研究方向为水产品质量与安全。
E-mail: dinghy@ysfri.ac.cn



翟毓秀, 研究员, 主要研究方向为水产品质量与安全。
E-mail: zhaiyx@ysfri.ac.cn