

# 基于生命周期评价法的条斑紫菜养殖加工产业碳足迹分析

邵魁双<sup>1</sup>, 郑江鹏<sup>2</sup>, 魏爱泓<sup>2</sup>, 彭模<sup>2</sup>, 武筱涵<sup>3</sup>, 白钰<sup>3</sup>, 沈玲羽<sup>1</sup>, 巩宁<sup>3</sup>

(1. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210019; 3. 大连海事大学, 环境系统生物学研究所, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**应用生命周期评价法(LCA)对条斑紫菜养殖加工行业进行了全周期的碳足迹分析,明确了各环节中碳排放源的种类和数量。结果表明,100亩条斑紫菜养殖加工过程中碳排放总量为 $1.25 \times 10^5 \sim 2.47 \times 10^5$  kg CO<sub>2</sub>,远高于条斑紫菜100亩养殖形成的可移出碳汇量( $9.43 \times 10^3$  kg CO<sub>2</sub>)。基于全产业链的分析,条斑紫菜产业尚不是一个碳汇产业。养殖阶段碳排放量最大,排放源主要来自石油化工材料的大量使用。二次加工阶段碳排放量仅次于养殖阶段,排放源主要来自纸壳包装和塑料包装的大量使用。在一次加工阶段,热源的使用是影响该阶段碳排放的主要影响因素,生物质燃料是碳排放量最低的热源形式。

**关键词:**条斑紫菜;碳足迹;全生命周期;生命周期评价法

中图分类号:S968.431

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2024)01-0012-06

## Carbon Footprint Analysis of *Porphyra* Culture and Processing Industry Based on LCA Method

SHAO Kuishuang<sup>1</sup>, ZHENG Jiangpeng<sup>2</sup>, WEI Aihong<sup>2</sup>, PENG Mo<sup>2</sup>, WU Xiaohan<sup>3</sup>, BAI Yu<sup>3</sup>, SHEN Lingyu<sup>1</sup>, GONG Ning<sup>3</sup>

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian, Liaoning 116023, China; 2. Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing, Jiangsu 210019, China; 3. Institute of Environmental System Biology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116023, China)

**Abstract:** In this paper, the life cycle assessment method (LCA) was used to analyze the carbon footprint of the whole cycle of *Porphyra* culture and processing industry. The types and extent of carbon emission sources in each link were identified. The results show that the total carbon emission in 100 mu of *Porphyra* cultivation and processing was  $1.25 \times 10^5 \sim 2.47 \times 10^5$  kg CO<sub>2</sub>, which was much higher than  $9.43 \times 10^3$  kg of CO<sub>2</sub> that could be removed from 100 mu of *Porphyra* cultivation. The *Porphyra* industry was not a carbon sink industry based on the analysis of the whole industry. The carbon emissions in the cultivation stage were the largest, followed by the secondary processing stage. The emission sources in the cultivation stage mainly come from the large use of petrochemical materials, while those in the secondary processing stage were mainly from the large use of paper shell and plastic packaging. In the primary processing stage, the use of heat source is the main factor affecting carbon emissions. Biomass fuel is the form of heat source with the lowest carbon emission.

**Key words:** *Porphyra yezoensis*; Carbon footprint; The whole life cycle; LCA method

我国是海藻养殖大国,由于藻类养殖过程中能通过光合作用将大气中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)固定,并经过渔民收割后从海水中移出,因此,这种非投饵养

殖活动也被称为碳汇渔业<sup>[1]</sup>,这部分储存在养殖生物体内的碳被称为“可移出碳汇”<sup>[2]</sup>。近年来,众多学者围绕我国沿海碳汇渔业(尤其是海藻养

收稿日期:2023-07-10;修订日期:2023-12-13

基金项目:江苏省环境监测科研基金项目(2210);江苏省生态环境科研项目(2021004)

作者简介:邵魁双(1973—),男,研究员,博士,主要从事海藻生物学研究。

殖碳汇)的核算开展了大量相关研究<sup>[2, 3-10]</sup>,但这些核算和评估只是基于养殖活动本身来进行的。海藻养殖固碳只是其产业周期的一部分,其养殖和加工过程中均会有 CO<sub>2</sub> 的释放,因此衡量一个生产活动的碳汇潜力或效果,还是要基于产业周期,分析生产各个环节中 CO<sub>2</sub> 的释放足迹,最后通过 CO<sub>2</sub> 的净吸收量来评估碳汇渔业产业的碳汇潜力。

“碳足迹(Carbon footprint)”表示一个系统的碳耗用量,碳耗与相关温室气体排放量成正比。碳足迹分析法是研究人类活动直接和间接碳排放的量化分析方法,诠释了不同对象时间和空间的碳排放过程<sup>[11]</sup>。碳足迹的计算方法主要包括投入产出法(I-O 法)和生命周期评价法(LCA 法)<sup>[12]</sup>,前者是一种自下而上的计算方法,多适用于宏观层面的计算,后者适用于产品碳足迹分析,评价结果较为详细<sup>[12]</sup>。

在海水养殖行业中,有学者开展了海带、对虾、鱼类、双壳类等养殖过程中的碳足迹分析<sup>[13-15]</sup>。但这些碳足迹分析,主要局限于养殖过程本身而未考虑到产品后续加工过程中的碳排放情况。条斑紫菜是我国重要的海藻养殖品种,主要产地为江苏南通、盐城和连云港海域,近些年在山东乳山、辽宁大连海域也有规模化养殖。本研究基于条斑紫菜养殖产业碳足迹模型构建,根据我国海域条斑紫菜产业特点,开展条斑紫菜行业碳足迹分析,对各阶段碳排放量进行测算,为紫菜产业的碳减排提供依据。

## 1 研究方法

采用 LCA 法对条斑紫菜养殖加工行业进行全面评估。针对不同环节构建模型,对条斑紫菜碳足迹进行测算分析,其中主要包括条斑紫菜的育苗、养殖、运输、加工等各环节直接和间接的碳排放量。根据数据的可得性,本研究主要采取文献搜集、实际调研等途径获取数据。条斑紫菜养殖加工产业包括育苗、海上养殖、运输、加工和存储 5 个阶段,将育苗、海上养殖、运输、一次加工和二次加工作为碳足迹研究的重点关注阶段,条斑紫菜产业清单分析内容见图 1。由图 1 可见,育苗阶段中的碳排放主要来自水泵运行过程中产生的电耗。

在海上养殖阶段,关注对象包括燃油消耗和养殖器材的碳排放。每个养殖周期中养殖器材的排

放量为总排放量除以相应使用年限,其中,网帘、浮漂的使用年限为 5 a,撑杆与塑料缆绳等的使用年限为 10 a。柴油消耗的碳排放主要来自船只运输、紫菜收割等产生的燃油消耗。

陆上运输阶段的碳排放主要来自条斑紫菜收获后到加工厂的车辆运输燃油消耗。一次加工阶段中的碳排放主要涉及加工流程中机械设备运转的电耗、热源燃烧和包装材料消耗。二次加工阶段中的碳排放主要涉及加工流程中机械设备运转的电耗和包装材料消耗。

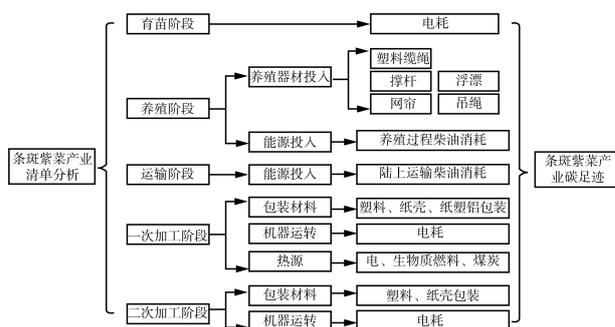


图 1 条斑紫菜产业清单分析内容

### 1.1 条斑紫菜育苗阶段碳足迹分析

条斑紫菜育苗过程产生的碳排放量,计算方法如下:

$$Z_{\text{育苗}} = X \times \delta_{\text{电耗}} \quad (1)$$

式中: $Z_{\text{育苗}}$ ——育苗过程中碳排放量,kg; $X$ ——水泵等机器的电耗,MWh; $\delta_{\text{电耗}}$ ——电网平均碳排放系数。

### 1.2 条斑紫菜养殖阶段碳足迹分析

条斑紫菜养殖过程养殖材料使用产生的碳排放量计算方法如下:

$$Z_{\text{器材}} = \sum_i^n I_i C_i \quad (2)$$

式中: $Z_{\text{器材}}$ ——条斑紫菜生产过程中养殖器材的碳排放量,kg; $n$ ——条斑紫菜生产过程中的各种产品投入数量(塑料缆绳、撑杆等); $I_i$ ——条斑紫菜生产过程中的第  $i$  种产品投入量,kg; $C_i$ ——第  $i$  种产品投入的碳排放系数。

养殖阶段燃油碳排放计算方法如下:

$$Z_{\text{养殖能耗}} = M_j \times \delta_j \quad (3)$$

式中: $Z_{\text{养殖能耗}}$ ——养殖阶段燃油消耗碳排放量,kg; $M_j$ ——使用  $j$  类型燃料量,kg; $\delta_j$ —— $j$  类型能源的碳排放系数。

### 1.3 陆上运输阶段碳排放

车辆行驶过程中因燃料的使用而产生 CO<sub>2</sub> 等温室气体的排放,计算公式同式(3)。

### 1.4 条斑紫菜一次加工阶段碳排放

在条斑紫菜一次加工过程中,加工阶段使用热源燃料进行加工,使用的燃料目前主要有煤炭、生物质燃料和电,此外还有机器运行的耗电,计算方法如下:

$$Z_{\text{能耗}} = W_i \times \delta_i + X \times \delta_{\text{电耗}} \quad (4)$$

式中:  $Z_{\text{能耗}}$ ——一次加工过程中能耗碳排放量,kg;  $W_i$ ——使用  $i$  类型燃料量,kg;  $\delta_i$ —— $i$  类型能源的碳排放系数;  $X$ ——加工机器的电耗,MWh;  $\delta_{\text{电耗}}$ ——电网平均碳排放系数。

条斑紫菜一次加工使用包装的碳排放量计算公式如下:

$$Z_{\text{包装}} = \sum_i^n Y_k \delta_k \quad (5)$$

式中:  $Z_{\text{包装}}$ ——一次加工过程中包装消耗所产生的碳排放量,kg;  $Y_k$ —— $k$  种类型包装一件产品碳排放量,kg;  $\delta_k$ —— $k$  种材料的碳排放系数。

### 1.5 条斑紫菜二次加工阶段碳排放

在条斑紫菜二次加工过程中,能量消耗产生的碳排放主要来自二次加工机器运转的耗电,计算方法同式(1)。条斑紫菜二次加工使用包装的碳排放量计算方法同式(5)。

### 1.6 条斑紫菜存储阶段碳排放

由于条斑紫菜通常为常温保存,该阶段没有明显的碳排放,故不计算。

### 1.7 条斑紫菜产业碳足迹分析

综上所述所有环节,可得出条斑紫菜产业碳排放的测量模型,计算公式如下:

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 \quad (6)$$

式中:  $Z$ ——条斑紫菜产业碳排放量,kg;  $Z_1$ ——育苗阶段碳排放量,kg;  $Z_2$ ——养殖阶段碳排放量,kg;  $Z_3$ ——陆上运输阶段碳排放量,kg;  $Z_4$ ——一次加工阶段碳排放量,kg;  $Z_5$ ——二次加工阶段碳排放量,kg。

### 1.8 数据来源

碳足迹核算的数据包括条斑紫菜养殖生产加工过程中各种材料投入种类、数量以及能源消耗量等。不同养殖模式的器材使用、能耗等数据,通过问卷调查、实地调研来获取。咨询的养殖加工企业包括大连中跃水产品养殖有限公司、青岛鑫扬制网有限公司、江苏连云港力生紫菜有限公司、启东市吕四海苔制品有限公司、南通杰盛食品有限公司等。考察多个海域条斑紫菜的亩产生产情况,设定100亩(紫菜养殖中1亩指1台养殖浮筏,养殖网帘的实际覆盖面积为120m×2m)养殖面积的鲜菜产量为50t。

碳排放因子即排放系数数据是通过查阅中国生命周期基础数据库(CPCD)<sup>[16]</sup>和生态环境部发布的相关文件<sup>[17]</sup>得出。

## 2 结果与分析

条斑紫菜养殖加工产业的相关数据及碳足迹计算结果见表1。

表1 条斑紫菜养殖加工产业的相关数据及碳足迹计算结果(按100亩计算)

生命周期阶段	项目	消耗量	碳排放系数	CO <sub>2</sub> 排放量/kg	各环节 CO <sub>2</sub> 合计排放量/kg	
育苗阶段	水泵电耗	3.33 MWh	570.3 <sup>*</sup>	1.90×10 <sup>3</sup>	1.90×10 <sup>3</sup>	
养殖阶段	插杆养殖	撑杆	1.45×10 <sup>3</sup> kg <sup>①</sup>	74.28	1.07×10 <sup>5</sup>	1.14×10 <sup>5</sup>
		塑料缆绳	0.22×10 <sup>3</sup> kg <sup>①</sup>	0.93	0.22×10 <sup>3</sup>	
		网帘	1.15×10 <sup>3</sup> kg <sup>②</sup>	5.84	6.72×10 <sup>3</sup>	
		浮漂	0.77×10 <sup>2</sup> kg <sup>②</sup>	8.43	0.65×10 <sup>3</sup>	
		吊绳	117.6kg <sup>②</sup>	0.93	0.11×10 <sup>3</sup>	
	翻板养殖	撑杆	0.81×10 <sup>3</sup> kg <sup>①</sup>	74.28	6.02×10 <sup>4</sup>	6.59×10 <sup>4</sup>
		塑料缆绳	0.55×10 <sup>3</sup> kg <sup>①</sup>	0.93	0.52×10 <sup>3</sup>	
		网帘	0.48×10 <sup>3</sup> kg <sup>②</sup>	5.84	2.8×10 <sup>3</sup>	
		浮漂	2.77×10 <sup>2</sup> kg <sup>②</sup>	8.43	2.34×10 <sup>3</sup>	
		支柱养殖	塑料缆绳	0.32×10 <sup>3</sup> kg <sup>①</sup>	0.93	
运输阶段	柴油	网帘	1.15×10 <sup>3</sup> kg <sup>②</sup>	5.84	6.72×10 <sup>3</sup>	7.02×10 <sup>3</sup>
			3.20×10 <sup>3</sup> kg	3.8	1.22×10 <sup>4</sup>	

续表

生命周期阶段	项目	消耗量	碳排放系数	CO <sub>2</sub> 排放量/ kg	各环节 CO <sub>2</sub> 合计 排放量/kg
一次加工阶段	柴油	0.60×10 <sup>3</sup> kg	3.8	2.28×10 <sup>3</sup>	2.28×10 <sup>3</sup>
	塑料包装	0.60×10 <sup>3</sup> kg	4.73	2.84×10 <sup>3</sup>	6.55×10 <sup>3</sup>
	纸壳包装	1.10×10 <sup>3</sup> kg	1.81	1.99×10 <sup>2</sup>	
	纸塑铝包装	0.1×10 <sup>3</sup> kg	0.89	0.9×10 <sup>2</sup>	
	机器运转耗电	6.00 MWh	570.3 <sup>*</sup>	3.42×10 <sup>3</sup>	5.13×10 <sup>3</sup>
	热源 电能	9.00 MWh		5.13×10 <sup>3</sup>	5.13×10 <sup>3</sup>
二次加工阶段	生物质燃料	27.00×10 <sup>3</sup> kg	0.15	4.05×10 <sup>3</sup>	4.05×10 <sup>3</sup>
	煤炭	10.00×10 <sup>3</sup> kg	1.97	19.7×10 <sup>3</sup>	19.7×10 <sup>3</sup>
	机器运转电耗	11 MWh	570.3 <sup>*</sup>	6.27×10 <sup>3</sup>	9.07×10 <sup>4</sup>
	塑料包装	3.3×10 <sup>3</sup> kg	4.73	1.56×10 <sup>4</sup>	
	纸壳包装	38×10 <sup>3</sup> kg	1.81	6.88×10 <sup>4</sup>	

注:①为除去 10 a 期限的使用量;②为除去 5 a 期限的使用量; \* 依据国家生态环境部办公厅 2023 年 2 月 4 日发布的《关于做好 2023—2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》(环办气候函〔2023〕43 号)规定:2022 年度全国电网平均排放因子为 0.570 3 t/MWh。

## 2.1 育苗、养殖和运输阶段碳排放

100 亩条斑紫菜苗种培育产生的碳排放量为 1.90×10<sup>3</sup> kg(以 CO<sub>2</sub> 计,下同)。

条斑紫菜海上养殖阶段的活动主要包括养殖器材的运输、养殖浮筏的安装、幼苗培育、紫菜收割和运输等。养殖环节碳排放源有 2 项,分别为养殖器材的投入和燃油消耗。

对于不同养殖模式,养殖器材的组成和投入量存在较大差异。目前条斑紫菜养殖主要有 3 种方式:翻板式养殖、插杆式养殖和支柱式养殖。其中,插杆式养殖主要位于江苏连云港、山东南部 and 辽宁大连海域,翻板式养殖位于山东南部海域,江苏盐城和南通海域采用支柱式养殖,养殖区域主要位于黄海南部的辐射沙洲区域。在插杆式养殖中,100 亩紫菜养殖所用的养殖器材主要包括聚酯树脂撑杆(19 m)363 根,塑料缆绳(φ18 mm 浮缆 2 360 m 和 φ20 mm 撇缆 17 000 m),养殖网帘(10 m×1.8 m 维尼纶)1 200 张,聚苯乙烯浮漂(60 cm×90 cm 132 个,φ10 cm 3 600 个),φ9 mm 吊绳 1 100 m,扣除相应的使用期限,可以得出每年养殖器材合计碳排放量为 1.14×10<sup>5</sup> kg。在翻板式养殖中,100 亩紫菜养殖所用的养殖器材主要包括聚酯树脂撑杆(2.3 m)5 400 根,塑料缆绳(φ18 mm 浮缆 21 000 m 和 φ20 mm 撇缆 4 000 m),养殖网帘(10 m×1.8 m 维尼纶)1 000 张,聚苯乙烯浮漂(60 cm×90 cm)5 200 个,扣除相应的使用期限,得出每年养殖器材合计碳排放量为 6.59×10<sup>4</sup> kg。在支柱式养殖中,

100 亩紫菜养殖所用的养殖器材主要包括塑料缆绳(φ18 mm)30 000 m,养殖网帘(10 m×1.8 m 维尼纶)1 200 张和竹制撑杆,扣除相应的使用期限,得出每年养殖器材合计碳排放量为 7.02×10<sup>3</sup> kg。3 种养殖模式中,插杆式养殖器材碳排放量最高,其次为翻板式养殖和支柱式养殖。

海上养殖和运输阶段的柴油排放主要包括海上运输、紫菜收割和陆地运输。紫菜收割燃油消耗量与紫菜产量相关,海上运输和陆地运输燃油消耗与养殖区离岸距离以及码头与加工厂之间的距离有关。在江苏启东、如东、连云港、山东和辽宁近岸海域,养殖区离岸距离较近,燃油排放相对较少,而江苏辐射沙洲海域,由于离岸距离较短(离岸几十公里),燃油消耗相对较高,本研究中的海上运输和陆地运输的燃油消耗数据来自启东市吕四海苔制品有限公司,能代表大多数近岸养殖区域养殖阶段燃油消耗的排放情况。

结果表明,在养殖和运输阶段,不同养殖模式下养殖器材和燃油消耗碳排放的比例不同。在插杆式养殖中,该阶段碳排放总量为 128.48×10<sup>3</sup> kg,养殖器材碳排放量占比达到 88.7%;在翻板式养殖中,该阶段碳排放总量为 80.38×10<sup>3</sup> kg,养殖器材碳排放量占比达到 82.0%;在支柱式养殖中,该阶段碳排放总量为 21.5×10<sup>3</sup> kg,养殖器材碳排放量占比为 32.7%。

## 2.2 一次加工阶段碳排放

条斑紫菜一次加工是将原藻加工成菜饼,其工

艺流程如下:(1)漂洗阶段:海上采集的鲜菜倒入漂洗池中,通过缓慢搅拌和清洁海水清洗,清除泥沙和附着硅藻;(2)打浆和浇饼阶段:在切菜机中将原藻切碎,并与海水、淡水按一定比例调和成紫菜浆液传送至浇饼装置进行浇饼;(3)烘干和再干阶段:浇注好的紫菜饼经脱水、烘干、剥离、挑选装入再干箱中,经再干处理,含水率降至3%~5%,包装、储藏以及销售。

一次加工阶段过程中碳排放主要来自机器运行消耗、紫菜包装和干燥热源消耗产生的碳排放。其中,包装材料(主要包括塑料包装、纸壳包装和纸塑铝包装)产生的碳排放量为 $3.13 \times 10^3$  kg,运行设备使用电能的碳排放量为 $3.42 \times 10^3$  kg。

在热能使用方面,条斑紫菜的一次加工过程中主要使用3种热源形式,即煤、生物质能和电能。其中,使用电能作为热源,产生的碳排放量仅为 $5.13 \times 10^3$  kg,占碳排放量的43.9%(该阶段碳排放总量为 $11.68 \times 10^3$  kg);使用生物质燃料产生的碳排放量为 $4.05 \times 10^3$  kg,占碳排放量的38.2%(该阶段碳排放总量为 $10.6 \times 10^3$  kg);使用煤燃烧产生的碳排放量为 $19.7 \times 10^3$  kg,占碳排放量的75.0%(该阶段碳排放总量为 $26.25 \times 10^3$  kg)。由此可以看出,燃煤作为热源的碳排放量最大,其次为生物质燃料,电能的碳排放量远远低于前两者。

### 2.3 二次加工阶段碳排放

条斑紫菜二次加工的工艺流程为将一次加工的菜饼切割、喷涂调料或添加芝麻等配料、烤熟、包装,经过二次加工后成为包装好的商品直接出售或常温储存一段时间后再销售。

二次加工阶段碳排放主要来自机器运行电耗和紫菜包装消耗。其中,包装材料(包括塑料包装和纸壳包装)产生的碳排放量为 $8.44 \times 10^4$  kg,几乎占该阶段碳排放量的93.1%;运行设备使用电能的碳排放量仅为 $6.27 \times 10^3$  kg,该阶段碳排放总量为 $9.07 \times 10^4$  kg。

### 2.4 条斑紫菜产业碳足迹分析的影响因素

碳足迹指的是全生命周期内的碳排放总量,以碳排放量来表示。在产品从生产到加工等阶段涉及的温室气体除 $\text{CO}_2$ 之外还有一氧化二氮( $\text{N}_2\text{O}$ )等气体,本研究为简化计算暂未考虑其他温室气体,因此,评价结果将会低于温室气体的实际排放量。

条斑紫菜产业包括采苗、养殖、运输、加工、分

销、废弃等一系列上下游环节,研究条斑紫菜碳足迹需要将条斑紫菜全生命周期的碳排放量体现出来,但在实际计算中,人工操作、分销和废弃等环节无法量化,导致核算的碳排放量会低于实际碳排放量。

在核算过程中,碳排放系数的选择会显著影响核算结果,而碳排放系数与材料形式、工艺技术等相关,由于紫菜养殖和加工过程中所需材料非单一材质,而目前的碳排放系数的数据库还不够全面,因此,尽管本研究采用的碳排放系数来自最新研究结果,但对结果还是会产生一定的影响。

### 2.5 条斑紫菜产业的减排对策与建议

众所周知,紫菜养殖是一个碳汇活动<sup>[1-2]</sup>,依据自然资源部颁布的行业标准《养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法碳储量变化法》(HY/T 0305—2021)规定的藻类成体收获碳储量计算公式<sup>[18]</sup>,公式如下:

$$C_{SH} = W_{sy} \times R_{ssdw} \times C_{aa} \quad (7)$$

式中: $C_{SH}$ ——养殖大型藻类每亩收获的碳量,kg; $W_{sy}$ ——每亩成藻的产量,kg; $R_{ssdw}$ ——收获时大型藻类成藻的干湿比; $C_{aa}$ ——成藻的含碳率。

计算出条斑紫菜100亩养殖形成的可移出碳汇约为 $2.57 \times 10^3$  kg(以C计),即 $9.43 \times 10^3$  kg(以 $\text{CO}_2$ 计)。由本研究结果可知,100亩条斑紫菜养殖加工过程中碳排放总量为 $1.25 \times 10^5 \sim 2.47 \times 10^5$  kg(一次加工热源燃料不同,导致排放总量不同)。很显然,条斑紫菜养殖过程中移出的碳汇量远低于产业其他环节中碳排放量,因此,基于全产业链的分析,条斑紫菜产业并不是一个碳汇产业。

在养殖阶段,养殖器材所用材料主要是石油化工产品,尽管使用寿命较长,但仍是碳排放的主要因素,因此,寻找合适的低碳替代品,或提高使用寿命,就可以显著降低年度碳排放的分摊比例。

在一次加工阶段,热源的使用是碳排放的主要贡献者。采用不同热源形式,碳排放量存在较大差异。尽管煤炭的成本最低,但其碳排放量最大,且煤炭燃烧也会污染空气,因此从环保和碳排放角度,煤炭应是属于被摒弃的热源材料。生物质燃料符合环保要求,其碳排放量在3种燃料中是最低的,是条斑紫菜一次加工较为适宜的热源材料。

在一次和二次加工阶段使用的塑料包装、纸壳包装是碳排放的主要贡献者,由于这些材料已经属

于行业通用包装材料,在目前的产业工艺中,被替代的几率较低。只能通过修改工艺或循环使用减少使用量,来降低碳排放量。

### 3 结论

(1)条斑紫菜100亩养殖加工过程中碳排放总量为 $1.25 \times 10^5 \sim 2.47 \times 10^5$  kg,远高于条斑紫菜百亩养殖形成的可移出碳汇量( $9.43 \times 10^3$  kg)。结果表明,基于全产业链的分析,条斑紫菜产业尚不是一个碳汇产业。

(2)条斑紫菜养殖过程中养殖器材、加工过程中的包装材料以及一次加工过程中的热源是碳排放的主要贡献者,因此,建议通过提高材料的使用寿命、选择低碳替代品以及采用生物质燃料作为热源材料等途径来降低条斑紫菜产业的碳排放量。

#### [参考文献]

[1] 唐启升. 碳汇渔业与又好又快发展现代渔业[J]. 江西水产科技, 2011, 126(2): 5-7.

[2] 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 359-365.

[3] 曹万云, 肖鲁湘, 王德, 等. 黄渤海近海海藻养殖规模及固碳强度时空分布[J]. 海洋科学, 2018, 42(4): 112-119.

[4] 严立文, 黄海军, 陈纪涛, 等. 我国近海藻类养殖的碳汇强度估算[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(4): 537-545.

[5] GAO G, GAO L, JIANG M J, et al. The potential of seaweed cultivation to achieve carbon neutrality and mitigate deoxygenation and eutrophication[J]. Environmental Research Letters, 2022, 17: 014018.

[6] 齐占会, 王珺, 黄洪辉, 等. 广东省海水养殖贝藻类碳汇潜力

评估[J]. 南方水产科学, 2012, 8(1): 30-35.

[7] 李昂, 刘存歧, 董梦荃, 等. 河北省海水养殖贝类与藻类碳汇能力评估[J]. 南方农业学报, 2013, 44(7): 1201-1204.

[8] 于佐安, 谢玺, 朱守维, 等. 辽宁省海水养殖贝藻类碳汇能力评估[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 382-386.

[9] 邵桂兰, 刘冰, 李晨. 我国主要海域海水养殖碳汇能力评估及其影响效应——基于我国9个沿海省份面板数据[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2614-2625.

[10] 纪建悦, 王萍萍. 我国海水养殖业碳汇能力测度及其影响因素分解研究[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(6): 871-878.

[11] 卞晓红, 张绍良. 碳足迹研究现状综述[J]. 环境保护与循环经济, 2010, 30(10): 16-18.

[12] 王微, 林剑艺, 崔胜辉, 等. 碳足迹分析方法研究综述[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(7): 71-78.

[13] 孙威, 张继红, 吴文广, 等. 基于生命周期法的养殖海带的碳足迹评估[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(5): 16-23.

[14] 吴飞飞, 纪建悦, 许罕多. 基于LCA方法的对虾池塘养殖碳足迹研究[C]. 第十三届中国管理科学学术年会论文集, 2011: 674-678.

[15] XU C J, SU G H, ZHAO K S, et al. Current status of greenhouse gas emissions from aquaculture in China[J]. Water Biology and Security, 2022, 1(3): 100041.

[16] 中国城市温室气体工作组. 中国产品全生命周期温室气体排放系数库[DB/OL]. (2023-04-04) [2023-06-10]. <http://lea.cityghg.com/>.

[17] 中华人民共和国生态环境部办公厅. 关于做好2023—2025年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知[EB/OL]. (2023-02-07) [2023-06-10]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/202302/t20230207\\_1015569.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html).

[18] 中华人民共和国自然资源部. 养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法碳储量变化法: HY/T 0305—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

## 声明

本刊已加入中国学术期刊网络出版总库、中国学术期刊综合评价数据库、万方数据-数字化期刊群、中国核心期刊数据库和中文科技期刊数据库。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网进行网络出版或提供信息服务,稿件一经刊用将一次性支付作者著作权使用报酬,如作者不同意将自己的文章被以上期刊数据库收录,请在来稿中声明,本刊将作适当处理。