

基于生命周期评价法(LCA)的裙带菜栽培 加工产业碳足迹分析

沈玲羽¹, 巩 宁², 白 钰², 王长发³, 王晓凡²,
曲 翊⁴, 武筱涵², 邵魁双¹

(1.国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2.大连海事大学 环境系统生物学研究所, 辽宁 大连 116023; 3.自然资源部 大连海洋中心, 辽宁 大连 116015; 4.辽宁省大连生态环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘 要:本文应用生命周期评价法(LCA)对裙带菜栽培加工产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:裙带菜浮筏栽培加工阶段的碳排放总量为 3.95×10^5 kg CO₂e/百亩,高于百亩裙带菜栽培阶段形成的碳汇量,从全产业链的尺度来看,裙带菜栽培加工产业尚不是一个碳汇产业。在裙带菜产业链中,首先为加工阶段的碳排放量最大,主要来自包装的大量使用;其次为存储阶段的碳排放,主要来自制冷设备的电耗;最后为栽培阶段的碳排放,主要来自柴油消耗。为了提升裙带菜产业的碳汇能力,建议通过改变能源形式、提高材料的使用寿命、选择低碳替代品等途径来降低裙带菜产业的碳排放量。

关键词:裙带菜; 碳足迹; 全生命周期; LCA 法

中图分类号:Q178.53

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2025)03-0346-06

Carbon footprint analysis of *Undaria pinnatifida* culture and processing industry based on the life cycle assessment method

SHEN Lingyu¹, GONG Ning², BAI Yu², WANG Changfa³, WANG Xiaofan²,
QU Yi⁴, WU Xiaohan², SHAO Kuishuang¹

(1.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2.Institute of Environmental System Biology, Dalian Maritime University, Dalian 116023, China; 3.Dalian Oceanography Center, Ministry of Natural Resources, Dalian 116015, China; 4.Dalian Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: In this paper, the life cycle assessment method (LCA) was used to analyze the carbon footprint of the whole cycle of *Undaria pinnatifida* aquaculture and processing industry. The types and extent of carbon emission sources in each link were identified. The results showed that the total carbon emission in 100 mu cultivation of *U. pinnatifida* and processing was 3.95×10^5 kg CO₂ e, which was much higher than carbon sequestration from 100 mu cultivation of *U. pinnatifida*. The results showed that the *U. pinnatifida* industry was not a carbon sink industry based on the analysis of the whole industry. The carbon emissions in the processing stage were the largest, followed by the storage stage. The emission sources in the processing stage were mainly from heavy use of paper shell, while those in the storage stage mainly were from the electricity consumption of refrigeration equipment. In the cultivation stage, the consumption of diesel is the main factor affecting carbon

收稿日期:2024-01-01, 修订日期:2024-04-26

基金项目:大连市高层次人才创新支持计划项目(尖端和领军人才项目)(2021RD04)

作者简介:沈玲羽(1995—),女,辽宁辽阳人,助理研究员,硕士,主要研究方向为海洋生物学, E-mail: sly951011@163.com

通信作者:邵魁双(1973—),男,辽宁凤城人,研究员,博士,主要研究方向为海藻生物学, E-mail: ksshao@nmemc.org.cn

emissions. Therefore, it is suggested to reduce the carbon emissions of *U. pinnatifida* industry and enhance the carbon sink capacity of *U. pinnatifida* industry by changing energy forms, improving the service life of materials and selecting low-carbon alternatives.

Key words: *Undaria pinnatifida*; carbon footprint; the whole life cycle; LCA method

由于大型经济藻类在栽培过程中能通过光合作用将大气中的二氧化碳(CO₂)固定,并经过养殖户收割后从海水中移出,因此,这种非投饵的海水养殖活动也被称为碳汇渔业^[1],这部分储存在养殖生物体内的碳被称为“可移出碳汇”^[2]。我国是海水养殖大国,具备极大的碳汇潜力。近年来,国内学者在沿海渔业碳汇(尤其是海藻养殖碳汇)核算方面开展了大量研究^[2-10]。然而,除了孙威等在海带碳汇核算中开展了碳足迹(carbon footprint)分析以外^[11],其他的碳汇核算均忽视了养殖活动本身的碳排放量。此外,海藻养殖只是其产业周期的一部分,在育苗、养殖、加工和存储过程中均会有CO₂的释放。因此,在进行碳汇核算时,应该基于产业全周期分析各个生产环节中CO₂的释放足迹,最后通过CO₂的净吸收量来评估产业的碳汇潜力。

碳足迹起源于生态足迹,是指在人类生产和消费活动中所排放的与气候变化相关的气体总量^[12]。对于碳足迹的定义及边界,各国学者有着各自不同的理解和认识,其中,Wiedmann和Minx所提出的碳足迹定义较为全面,即碳足迹包括某一产品或服务系统在其全生命周期所排放的CO₂总量或在某一活动过程中直接和间接排放的CO₂总量^[13]。碳足迹分析法是研究产品生产或人类社会活动过程中“碳排放”的量化分析方法,而不涉及碳吸收过程^[12]。碳足迹的计算方法主要包括投入产出法(I-O)和生命周期评价法(LCA)^[12],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^[12]。

在海水养殖行业中,有学者已开展了海带、对虾、鱼类、双壳类等养殖过程中的碳足迹分析^[11,14-15]。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、存储等过程中的碳排放情况。裙带菜是我国北方重要的海藻养殖品种,主要产地为大连、烟台和威海海域。尽管裙带菜在栽培过程中具备碳汇能力,但

裙带菜产业包括原料生产、加工、存储、销售等多个环节,所以仍需按照工业企业的模式开展全产业链的碳足迹分析。本研究基于LCA碳足迹模型构建,根据大连海域裙带菜产业特点,开展裙带菜产业的碳足迹分析,对各阶段碳排放量进行测算,以期为裙带菜产业固碳减排管理措施提供制定依据。

1 材料与方法

1.1 裙带菜育苗阶段碳足迹分析

裙带菜栽培加工产业包括育苗、海上栽培、加工和存储4个阶段,均为碳足迹研究的重点环节(图1)。

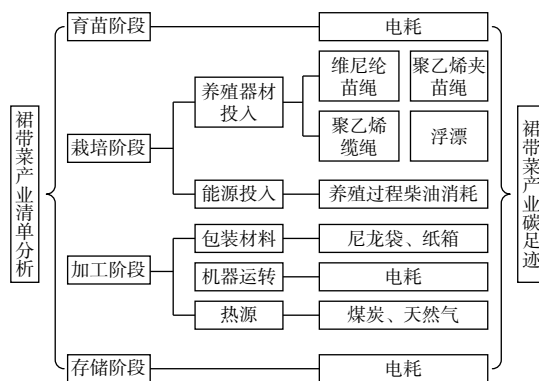


图1 裙带菜产业清单分析内容

Fig. 1 Analysis of *Undaria pinnatifida* industry

裙带菜育苗阶段的碳排放主要来自水泵电耗,计算公式如下:

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

式中: $Z_{\text{育苗}}$ 为育苗过程中碳排放量(kg); X 为水泵等设备的电耗(MWh); $\delta_{\text{电耗}}$ 为电网平均碳排放系数。

1.2 裙带菜栽培阶段碳足迹分析

裙带菜栽培阶段的碳排放包括所用各类养殖器材自身的碳排放,以及海上作业和运输阶段燃油消耗产生的碳排放。每个栽培周期中养殖器材的碳排放量为总排放量除以相应使用年限,其中,维尼纶苗绳的使用年限为1 a,浮漂的使用

年限为5 a, 聚乙烯夹苗绳与养殖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过程中产生的燃油消耗。

(1) 栽培阶段养殖器材使用产生的碳排放量, 计算公式如下:

$$Z_{\text{器材}} = \sum I_i \times C_i \quad (2)$$

式中: $Z_{\text{器材}}$ 为裙带菜栽培过程中所用养殖器材自身的碳排放量(kg); I_i 为裙带菜生产过程中的第 i 种器材投入量(kg); C_i 为第 i 种器材的碳排放系数。

(2) 栽培阶段燃油碳排放计算公式如下:

$$Z_{\text{栽培能耗}} = M_{\text{柴油}} \times \delta_{\text{柴油}} \quad (3)$$

式中: $Z_{\text{栽培能耗}}$ 为栽培阶段柴油消耗产生的碳排放量(kg); $M_{\text{柴油}}$ 为柴油消耗量(kg); $\delta_{\text{柴油}}$ 为柴油的碳排放系数(kgCO₂e/kg)。

(3) 栽培阶段的碳排放量计算公式如下:

$$Z_{\text{栽培}} = Z_{\text{器材}} + Z_{\text{栽培能耗}} \quad (4)$$

式中: $Z_{\text{栽培}}$ 为栽培阶段的碳排放量(kg); $Z_{\text{器材}}$ 为裙带菜栽培阶段所用养殖器材自身的碳排放量(kg); $Z_{\text{栽培能耗}}$ 为栽培阶段柴油消耗产生的碳排放量(kg)。

1.3 裙带菜加工阶段碳排放

加工阶段的碳排放主要来自烫菜环节中海水加热产生的热源消耗、烘干过程中机械设备运转产生的电能消耗以及包装材料消耗。

(1) 裙带菜加工过程中能耗产生的碳排放来自机器运行的电耗和热源材料的使用, 生产上使用的热源材料主要有天然气、煤炭、轮胎裂解油等, 计算公式如下:

$$Z_{\text{加工能耗}} = W_j \times \delta_j + X \times \delta_{\text{电耗}} \quad (5)$$

式中: $Z_{\text{加工能耗}}$ 为加工过程中能耗产生的碳排放量(kg); W_j 为 j 类型燃料消耗量(kg); δ_j 为 j 类型能源的碳排放系数; X 为加工机器的电耗(MWh); $\delta_{\text{电耗}}$ 为电网平均碳排放系数。

(2) 裙带菜加工过程中包装材料消耗产生的碳排放量计算公式如下:

$$Z_{\text{包装}} = \sum Y_k \times \delta_k \quad (6)$$

式中: $Z_{\text{包装}}$ 为加工过程中包装消耗所产生的碳排放量(kg); Y_k 为 k 种类型包装产品使用量(kg); δ_k 为 k 种材料的碳排放系数。

(3) 加工阶段的碳排放量计算公式如下:

$$Z_{\text{加工}} = Z_{\text{加工能耗}} + Z_{\text{包装}} \quad (7)$$

式中: $Z_{\text{加工}}$ 为加工阶段的碳排放量(kg); $Z_{\text{加工能耗}}$ 为裙带菜加工阶段能源消耗产生的碳排放量(kg); $Z_{\text{包装}}$ 为加工阶段包装材料消耗产生的碳排放量(kg)。

1.4 裙带菜存储阶段碳排放

加工后的裙带菜产品采用低温条件保存, 该阶段的碳排放主要来自冷库制冷设备的电耗, 计算公式如下:

$$Z_{\text{存储}} = X \times \delta_{\text{电耗}} \quad (8)$$

式中: $Z_{\text{存储}}$ 为存储过程中的碳排放量(kg); X 为制冷设备的电耗(MWh); $\delta_{\text{电耗}}$ 为电网平均碳排放系数。

1.5 裙带菜产业碳足迹分析

综上所述所有环节, 可得出裙带菜产业碳排放的测量模型, 计算公式如下:

$$Z = Z_{\text{育苗}} + Z_{\text{栽培}} + Z_{\text{加工}} + Z_{\text{存储}} \quad (9)$$

式中: Z 为裙带菜产业碳排放量(kg); $Z_{\text{育苗}}$ 为育苗阶段碳排放量(kg); $Z_{\text{栽培}}$ 为栽培阶段碳排放量(kg); $Z_{\text{加工}}$ 为加工阶段碳排放量(kg); $Z_{\text{存储}}$ 为存储阶段碳排放量(kg)。

1.6 数据来源

碳足迹核算的数据包括裙带菜产业中所用材料的种类、数量以及能源消耗量等。养殖器材使用量、能耗等数据, 通过问卷调查和实地调研获取。咨询的养殖加工企业包括大连兆海水产品养殖有限公司、青岛鑫扬制网有限公司等。在考察多个海域裙带菜生产状况的基础上, 设定百台(1台浮筏代表1亩)浮筏栽培的鲜菜平均产量为450 t。表1中碳排放因子的排放系数是通过查阅中国产品全生命周期温室气体排放系数库(CPCD)(<https://lca.cityghg.com/>)和生态环境部发布的相关文件^[16]得出的。

2 结果与讨论

2.1 裙带菜产业各阶段碳足迹

2.1.1 育苗阶段碳排放

裙带菜产业的碳足迹分析结果见表1。其中, 裙带菜育苗阶段的碳排放主要来自水泵运转产生的电耗, 裙带菜苗种培育产生的碳排放量

表1 裙带菜栽培加工产业的碳足迹计算结果

Tab.1 Carbon footprint on the *Undaria pinnatifida* culture and processing industry

生命周期阶段	项目	消耗量	碳排放系数/kgCO ₂ e·kg ⁻¹	CO ₂ 排放量/kg	各环节CO ₂ 合计排放量/kg
育苗阶段	水泵电耗	0.1 MWh	570.3 [*]	5.7×10 ²	5.70×10 ²
	聚乙烯缆绳	9.72×10 ² kg ^①	0.93	9.03×10 ²	
	维尼纶苗绳	0.21×10 ² kg	5.84	0.12×10 ³	
栽培阶段	聚乙烯夹苗绳	0.84×10 ² kg ^①	0.93	0.78×10 ²	3.02×10 ⁴
	浮漂	1.70×10 ³ kg ^②	0.93	1.58×10 ³	
	柴油	7.50×10 ³ kg	3.8	2.85×10 ⁴	
	塑料包装	5.60×10 ³ kg	4.73	2.65×10 ⁴	
加工阶段	纸箱包装	9.80×10 ⁴	1.81	1.77×10 ⁵	2.20×10 ⁵
	机器运转耗电	7.0 MWh	570.3 ^⑤	1.6×10 ⁴	
	天然气	1.14×10 ⁴ m ³	0.017 ^③	1.94×10 ²	
存储阶段	冷冻设备	255.5 MWh ^④	570.3 ^⑤	1.45×10 ⁵	1.45×10 ⁵

注:表中碳消耗量按照100亩裙带菜养殖计算。①为除去10年期限的使用量;②为除去5年期限的使用量;③单位为kgCO₂e / m³;④按冷库保存半年计算;⑤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0.5703 tCO₂/MWh

为5.7×10² kg CO₂e/亩,占全产业链CO₂排放量的0.1%。

2.1.2 栽培和运输阶段碳排放

裙带菜海上栽培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、收割和运输等。栽培环节碳排放源有两项,分别为养殖器材的投入和柴油消耗。

关于养殖器材,目前大连海域裙带菜栽培所用的养殖器材量如下:聚乙烯缆绳(φ24 mm)2×10⁴ m/亩、聚乙烯夹苗绳(φ5 mm)4×10⁴ m/亩、维尼纶苗绳1.1×10⁴ m/亩、浮漂3.5×10³个/亩,扣除相应的使用期限,乘以各自的碳排放系数,得出每年养殖器材合计碳排放量为2.68×10³ kg CO₂e/亩。

海上栽培阶段的柴油排放主要来自海上作业和运输。海上运输柴油消耗与栽培区离岸距离有关。本文中海上运输的燃油消耗综合了多家裙带菜养殖公司的数据,能代表大连海域大多数裙带菜栽培期间的燃油消耗情况。

由结果可知,在栽培阶段,碳排放总量为3.02×10⁴ kg CO₂e/亩,占全产业链碳排放量的7.6%。其中,养殖器材碳排放占比为5.6%,燃油排放占比为94.4%。

2.1.3 加工阶段碳排放

裙带菜加工包括原料加工和二次加工。原料加工是将原藻加工成盐渍梗和盐渍叶,入冷库保存,其工艺流程包括:(1)烫菜阶段,收获的鲜菜经加热沸水浸烫一定时间后,移入自然海水中冷却;(2)盐渍阶段,将浸烫裙带菜拌入一定比例的食盐腌渍5 d左右;(3)冷藏阶段,盐渍好的裙带菜在冷库低温冷藏;(4)干燥阶段,将裙带菜叶从盐渍藻体上撕下,移入用磷酸钠、冰醋酸配制的缓冲溶液中,浸泡30 min后用离心式脱水机脱水,最后用热风干燥机在最高为80℃的条件下干燥5 h,得到含水量为6%的干燥裙带菜,放入压榨框中,用压榨机压成特定形状,按照不同规格筛选后,装袋出售。二次加工形式较多,如调味裙带菜、裙带菜饮料等,由于加工企业较为分散,且规模普遍较小,耗能较低,因此,本文未考虑二次加工阶段的碳排放。

加工阶段中碳排放主要来自机器运行消耗、产品包装和海水加热的热源消耗,该阶段碳排放总量为2.20×10⁵ kg CO₂e/亩,占全产业链CO₂排放量的55.7%。其中,包装材料(主要包括尼龙袋包装和纸箱包装)产生的碳排放量为2.04×10⁵ kg CO₂e/亩,占CO₂排放量的92.5%;运行

设备使用电能的碳排放量为 1.6×10^4 kg CO₂e/百亩, 占 CO₂ 排放量的 7.2%。在热能使用方面, 天然气消耗产生的碳排放量为 1.94×10^2 kg CO₂e/百亩, 占 CO₂ 排放量的 0.1%。

2.1.4 存储阶段碳排放

存储阶段的碳排放主要来自制冷设备运行产生的电耗, 该阶段碳排放总量为 1.45×10^5 kg CO₂e/百亩, 占全产业链 CO₂ 排放量的 36.7%。

2.2 裙带菜产业碳足迹分析的边界确定

开展一个产业的碳足迹分析, 边界的划定是很重要的。如果考虑不全, 可能会低估产业的碳排放量, 如果边界过宽, 又会高估碳排放量。裙带菜产业需要大量土木设施(包括育苗室、加工车间、仓储车间等)的修建以及生产加工设备的购置安装等, 但这些作为产业的外延, 其出现的历史原因多种多样, 有的是从别的厂房或设备改造过来, 如果都纳入裙带菜产业的核算, 会增加很多的不确定性。但如果按照孙威等^[11]的方法仅关注育苗、栽培和运输阶段的碳足迹, 而不考虑加工、存储环节, 则明显低估了生命周期的碳排放量。因此, 为了合理地核算裙带菜产业的碳排放量, 本文以裙带菜本身为研究对象, 在生产环节开展其全生命周期的碳足迹分析, 而未考虑其他环节(如销售、烹饪等环节), 既突出了重点, 也减少了一些不确定的因素。

众所周知, 裙带菜栽培是一个碳汇活动^[1-2], 根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》规定的藻类成体收获碳储量计算公式^[17], 可得出裙带菜百亩栽培形成的可移出碳汇量约为 1.08×10^4 kg C, 即 3.96×10^4 kg CO₂。除可移出碳汇外, 裙带菜在生长过程中也会释放出溶解有机碳或颗粒有机碳, 溶解有机碳中有约 26% 转化为稳定的惰性有机碳^[18]。根据我们已开展的研究结果, 裙带菜惰性有机碳的产生量约为可移出碳汇量的 3.7 倍(另文发表), 颗粒有机碳的释放量以及海区埋藏量缺乏可靠数据, 现阶段不适合列入碳汇计算, 由此得出裙带菜栽培产生的实际碳汇量为 1.86×10^5 kg CO₂/百亩。由本文结果可知, 裙带菜栽培加工过程中碳排放总量为 3.95×10^5 kg CO₂e/百亩。很显然, 尽管裙带菜生长过程

中可以吸收大气 CO₂, 但低于产业各环节的碳排放总量, 因此, 从全产业链的尺度来看, 裙带菜产业并不是一个碳汇产业。

在裙带菜产业中, 只有少数规模较大的企业可以实现栽培和加工同步进行, 大部分个体养殖户或养殖企业只从事裙带菜的栽培。因此, 也可以将栽培环节从全产业链中独立出来, 单独进行裙带菜栽培碳汇量的核算, 此时只需扣除育苗和栽培阶段碳排放量, 得出净碳汇量。在养殖海藻碳汇核算领域, 目前得到官方认可的是可移出碳汇的核算^[17]。因此, 本文以可移出碳汇为依据, 计算裙带菜在栽培环节产生的净碳汇量为 0.94×10^4 kg CO₂/百亩。

2.3 裙带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二氧化碳碳排放总量, 以碳排放量来表示, 其中涉及排放的温室气体除 CO₂ 之外, 还有 N₂O 等气体。为便于计算, 本研究暂未考虑其他温室气体, 因此, 本文评价结果将会低于温室气体的实际排放量。

裙带菜产业包括育苗、栽培、加工、存储等一系列上下游环节, 研究裙带菜碳足迹需要将裙带菜全生命周期的碳排放量体现出来, 但在实际计算中, 人工操作和废弃等环节无法量化, 二次加工过程中的零散碳排放也不便统计, 这些因素导致核算的碳排放量会低于实际碳排放量。此外, 传统的裙带菜原料加工过程中采用煤炭作为热源, 但近年来由于环保要求, 除部分企业偷偷使用煤炭外, 大部分企业开始使用天然气, 也有部分企业使用不达标排放的轮胎裂解油, 多种能源形式并存也给碳排放的计算带来不确定性。但考虑到煤炭和轮胎裂解油不符合环保要求, 短期内将很快被淘汰, 所以本文中只列出了使用天然气作为热源的排放量。

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、生产工艺等密切相关, 由于裙带菜栽培和加工过程中所需材料并非单一材质, 而目前的碳排放系数的数据库还不够全面, 因此, 尽管本文所用各材料的碳排放系数来自最新研究, 但对结果还是会产生一定的影响。由前述可知, 裙带菜存储阶段碳排放占比较大, 在该阶段, 碳排放量与储存时间呈

正相关关系。受市场销售影响,盐渍裙带菜低温存储时间差异较大,多则几年少则几个月,因此,会造成全产业链碳排放总量的不确定性,为了便于计算,本文按照半年的时间来计算。

2.4 裙带菜产业的减排对策与建议

在裙带菜全产业链中,加工阶段的碳排放量占比最大,达到55.7%,包装材料纸箱的使用造成碳排放贡献度超过了机器运转电耗和热源消耗产生的碳排放量。在存储阶段,电能消耗是碳排放的主要贡献者。在栽培阶段,柴油消耗产生的碳排放贡献度占据该阶段的94.4%。

通过裙带菜全产业链碳足迹分析可以看出,能源的利用形式是碳排放的主要影响因素,无论是燃油还是天然气,对于碳排放降低几乎没有提升的空间,只有通过电能或氢能的使用才能显著降低碳排放,但现阶段以火力发电为主导的电能尚不能称为清洁能源,必须通过降低火电比例、增加风电、核电和水电的比例,降低电能的排放系数,才能充分享受电能的清洁红利,进而降低裙带菜全产业链的碳排放量。

此外,加工阶段包装材料的使用也是碳排放的重要影响因素,因此,提高包装材料的重复利用率,是减少碳排放的一条有效途径。

由上述分析可知,只有改变现有的能源利用形式、改革现有工艺、提高材料的利用率或使用寿命,才能发挥裙带菜的碳汇能力,使该产业成为真正意义上的碳汇产业。

3 结论

(1)裙带菜栽培加工过程中碳排放总量为 $3.95 \times 10^5 \text{ kg CO}_2\text{e/亩}$,高于裙带菜栽培形成的碳汇量($2.90 \times 10^5 \text{ kg CO}_2\text{/亩}$),结果表明,基于全产业链的分析,裙带菜产业尚不是一个碳汇产业。

(2)裙带菜储存阶段电能消耗、栽培阶段的柴油消耗、加工阶段的包装纸箱消耗是碳排放的主要贡献者。因此,建议通过改变能源形式、提高材料的使用寿命、选择低碳替代品等途径来降低裙带菜产业的碳排放量,提升碳汇能力。

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(2): 9-11.
- [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(1): 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, 董梦芸, 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] 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.
- [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] WIEDMANN T, MINX J C. A definition of 'Carbon Footprint' [M]//PERTSOVA C C. *Ecological Economics Research Trends: Chapter 1*. Hauppauge NY, USA: Nova Science Publishers, 2008: 1-11.
- [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. 杭州:《中国管理科学》编辑部, 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/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html.
- [17] HY/T 0305-2021, 养殖大型藻类和双壳贝类碳汇计量方法碳储量变化法[S].
- [18] XIE Y Y, SU J, SHAO K S, et al. Long-term response of the microbial community to the degradation of DOC released from *Undaria pinnatifida*[J]. *Marine Environmental Research*, 2024, 194: 106313.