

ICS 65.150
CCS B 50

团 体 标 准

T/FSF XXXXX—XXXX

龙须菜养殖碳汇监测与核算技术指南

Technical guidelines for carbon sink monitoring and accounting of *Gracilaria lemaneiformis* cultivation

(报批稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

福建省水产学会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 工作流程	2
5 龙须菜养殖区调查	3
5.1 养殖状况调查	3
5.2 养殖环境调查	3
6 龙须菜固碳量监测	4
6.1 实验设计	4
6.2 监测内容	4
7 水体有机碳监测	5
7.1 实验方法	5
7.2 监测内容	5
7.3 室内培养实验与 RDOC、RPOC 计量	5
8 沉积碳监测	6
8.1 采样装置与方法	6
8.2 采样时间与站位布设	6
8.3 分析方法	6
9 龙须菜养殖碳汇核算方法	6
9.1 总碳汇	6
9.2 外溢碳核算	8
10 数据管理与质量控制	9
附录 A (资料性) 龙须菜养殖情况调查表	10
附录 B (资料性) 龙须菜碳汇实验装置	11
附录 C (资料性) 沉积物样本取样和处理记录表	15
附录 D (资料性) 龙须菜碳汇核算参考取值	16

前　　言

本文件按照GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分： 标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由福建省水产学会提出。

本文件由福建省水产学会归口。

本标准起草单位：自然资源部第三海洋研究所，中国科学院青岛生物能源与过程研究所，中国水产科学研究院东海水产研究所。金

本标准主要起草人：汤坤贤、张飞、张永雨、黄博文、李和阳、魏晓琼、牟善莉、纪建达、马勇、程家骅、陈嘉伟、金艳。

龙须菜养殖碳汇监测与核算技术指南

1 范围

本文件提供了龙须菜养殖碳汇监测与核算的工作流程、养殖区调查、固碳量监测、水体有机碳监测、沉积碳监测、碳汇核算方法、质量控制等内容的指导。

本文件适用于龙须菜养殖碳汇的监测与核算工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 12763.9 海洋调查规范 第9部分：海洋生态调查指南

GB 17378.2 海洋监测规范 第2部分：数据处理与分析质量控制

GB 17378.3 海洋监测规范 第3部分：样品采集、贮存与运输

GB 17378.4 海洋监测规范 第4部分：海水分析

GB/T 30740 海洋沉积物中总有机碳的测定 非色散红外吸收法

HY/T 150 海水中有机碳的测定 非色散红外吸收法

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

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

固碳量 carbon sequestration amount

大型海藻养殖过程中通过光合作用从海水和空气中吸收并固定二氧化碳并将其转化为有机碳的量。

3.2

藻体碳 algal carbon

收获大型海藻藻体中的有机碳。

3.3

沉积碳 deposited carbon

大型海藻养殖过程中产生的沉积并封存于海底的颗粒有机碳。

3.4

惰性溶解有机碳 recalcitrant dissolved organic carbon

海水中性质稳定，难以被微生物降解或矿化，可在海水中长期储存的溶解有机碳。

3.5

转化碳汇 transferred carbon sink

大型海藻养殖过程中释放的溶解有机碳和脱落藻体在海水中转化形成的惰性有机碳的量。

3.6

外溢碳 spilled carbon

大型海藻通过光合作用固定的总碳量中，未形成可长期封存在水体与沉积物中的惰性有机碳的碳量。

注：用于评估大型海藻对海洋生态系统碳汇贡献。

3.7

养殖周期 culture period

龙须菜从苗种投放到养殖结束全过程所需的时间。

4 工作流程

采用室内实验与现场围隔实验，海区调查相结合的方法，定量获取龙须菜生长过程中的固碳量和藻体碳、水中惰性有机碳、沉积碳等含量的数据，制定龙须菜碳汇核算方法，评估龙须菜碳汇贡献。工作流程见图 1。

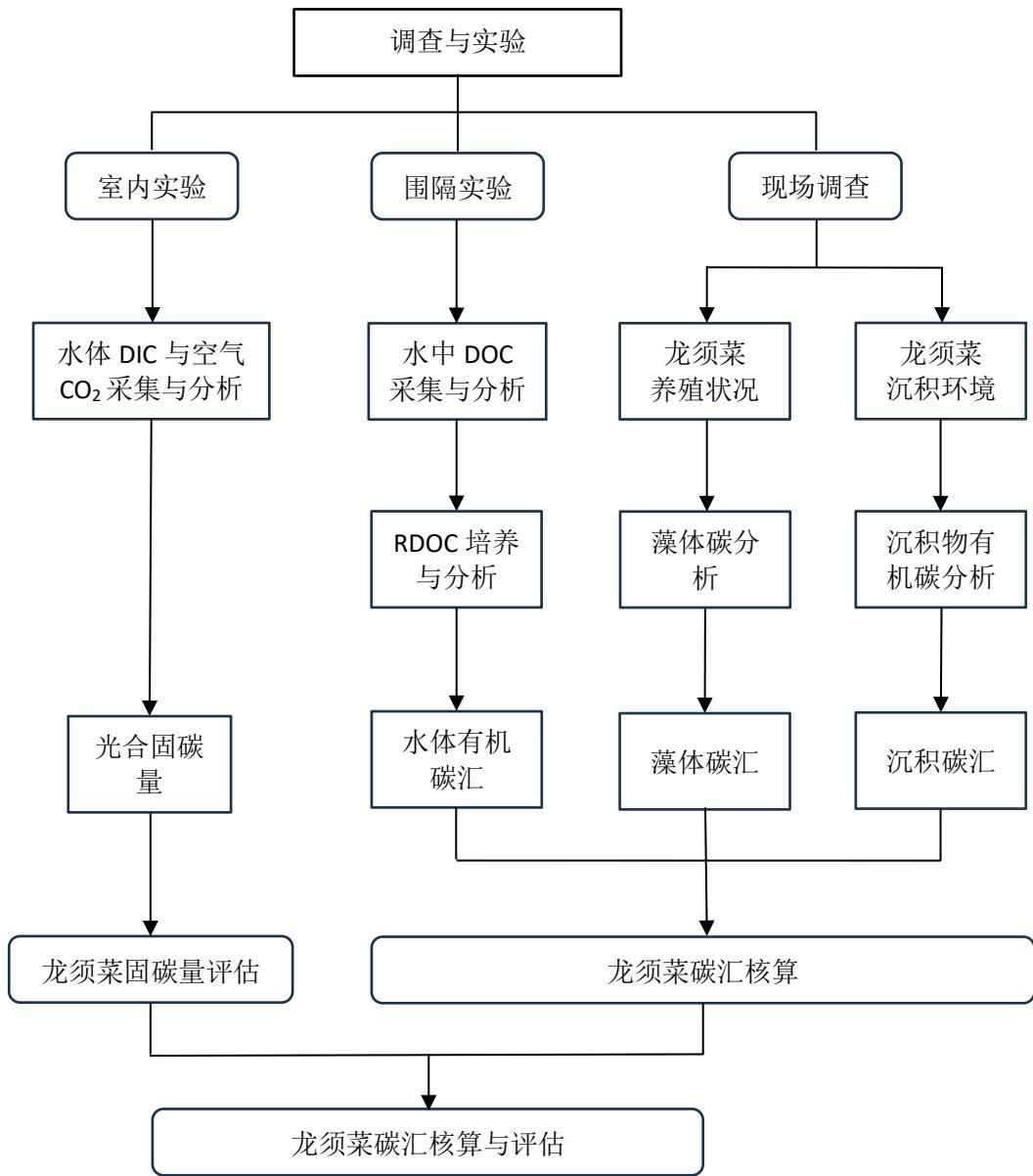


图 1 工作流程图

5 龙须菜养殖区调查

5.1 养殖状况调查

调查龙须菜养殖区的位置、面积和龙须菜养殖时间、养殖批次、养殖产量等，调查结果记录表见附录 A。测定龙须菜含水率和含碳量，调查和检测方法按照 HY/T 0305-2021 中 4.2.4 的规定执行。

5.2 养殖环境调查

5.2.1 调查内容

调查养殖期间的光强、水体透明度、水下光强、水中pH、溶解氧（DO）、溶解有机碳（DOC）、溶解无机碳（DIC）、颗粒有机碳（POC）、总碱度（TA）等指标。

5.2.2 调查与分析方法

调查龙须菜养殖区的环境状况，采样点布设宜按照GB/T 12763.9的规定执行，调查次数宜不少于2次，分别在养殖周期的初期放苗时、末期收获时进行；若条件允许，可在养殖中期增加1次～2次监测。水样分析按照GB 17378.4的规定执行。

6 龙须菜固碳量监测

6.1 实验设计

6.1.1 实验装置

利用水-气CO₂同步监测装置，该装置组成见图B.1。

6.1.2 实验用水

使用经过砂滤的天然海水或用天然海水晶配置的人工海水，溶解无机氮（DIN）、溶解无机磷（DIP）浓度宜分别调配为0.5 mg/L和0.05 mg/L。

6.1.3 实验生物

龙须菜取自养殖海区，经过滤海水清洗干净后用实验用水暂养。

6.1.4 实验设置

在30 L的实验容器中加入20 L的实验用水，放入龙须菜，龙须菜密度宜为0.5 g/L～1.0 g/L。

6.1.5 光强设置

光强梯度宜为0 lx、5000 lx、10000 lx、15000 lx、22000 lx、40000 lx。

6.1.6 光暗比

10h:14h，8:00～18:00作为光周期，18:00～+8:00作为暗周期为宜。

6.1.7 实验时间

48h。

6.1.8 采样与监测时间

每次光暗周期转换的开关灯时分别采集水样和监测空气CO₂浓度。

6.2 监测内容

6.2.1 空气CO₂浓度

通过盖板上气路连接CO₂分析仪，监测容器上部不同时间的空气CO₂的浓度。

6.2.2 水中DIC、DOC浓度

通过连接管路采集水样 300 mL~500 mL, 用水质多参数仪测定水中 pH 值和 DO 浓度等指标。水样经处理后测定水中 DOC、DIC 等浓度, 测定方法按照 GB 17378.4 中的规定执行。

6.2.3 生物量

实验后称量龙须菜的重量。

7 水体有机碳监测

7.1 实验方法

7.1.1 实验装置

利用自然海区现场实验围隔定量监测龙须菜DOC的释放速率。实验围隔由若干不锈钢管、围隔袋、实验框、CO₂监测装置组成, 围隔袋通过不锈钢管固定在网箱中, 放置实验生物的实验框固定在围隔袋中。海区现场实验围隔见图B.2。

7.1.2 实验准备

安装实验围隔, 布置实验生物, 实验组和对照组至少设置3个平行。具体操作如下:

- a) 安装实验围隔, 方法见 B.2;
- b) 利用带有流量计的水泵抽取原位海水灌装围隔袋, 海水经 20 μm 筛绢滤去大颗粒的碎屑与浮游生物, 每个围隔袋的海水体积宜为 1 m³;
- c) 将洗净的龙须菜系在苗绳上, 苗绳固定在实验框的上缘不锈钢架上。每个实验框中龙须菜的重量宜为 500 g~2000 g;
- d) 实验框通过绳索固定在不锈钢管上, 实验框宜位于水下 80 cm 的位置。

7.2 监测内容

7.2.1 水质指标

用水质多参数仪现场监测各围隔水中的温度、pH 值、DO 浓度、盐度等; 采集水样经处理后测定水中 DOC、POC、DIC 等浓度。样品采集、保存和运输等操作按照 GB 17378.3 中的规定执行, DOC、POC 测定按照 HY/T 150 的规定执行。DIC 测定方法按照 GB 17378.4 中规定的方法执行。

7.2.2 生物体

在实验开始和结束时分别称量各围隔龙须菜的重量; 取新鲜藻体带回实验室测量含水率、含碳量等指标, 实验方法见 5.1。

7.2.3 采样与监测时间

在每天日出后和日落前, 宜在上午 8:00 和下午 17:00 采集水样, 测定水体温度、盐度、pH 值、DO 和空气 CO₂ 浓度。

7.2.4 实验时间

宜选择连续数个晴天或阴天开展实验, 观测不同天气条件下的固碳与有机碳释放情况。实验时间宜为 2 d~3 d。

7.3 室内培养实验与 RDOC、RPOC 计量

现场围隔实验结束时，取水样至室内培养，实验过程如下：

- a) 每个围隔袋分别采集 5 L 海水，经 3 μm 聚碳酸酯膜过滤，在实验室进行龙须菜 DOC 的微生物降解实验，降解宜在避光、室温 20°C~25°C 下进行。
- b) 宜在第 0, 15, 30, 60, 90 天，采集不同时间间隔的水样分析 DOC、POC 浓度。
- c) 继续对微生物降解后的水样进行光降解，测定 DOC、POC 浓度，计算惰性溶解有机碳(RDOC)、惰性颗粒有机碳(RPOC) 分别占 DOC、POC 的比例。

8 沉积碳监测

8.1 采样装置与方法

水深小于 15 m 的采用连杆式柱状沉积物采集装置，安装与采样方法见 B.3。水深大于 15 m 的采用重力式柱状沉积物采样装置，采样方法按照 GB17378.3 柱状样的采集规定执行。沉积物取样和处理信息记录在表 C.1 中。

8.2 采样时间与站位布设

沉积物采样时间在龙须菜养殖周期的开始和结束期间。

采样站位选择在龙须菜养殖区中部，优先选择连续多年养殖龙须菜，且底部扰动较少的区域。每个养殖片区不少于3个。

8.3 分析方法

沉积物有机碳含量分析按照GB/T 30740规定的方法执行，沉积速率分析与计算按照《筏式养殖紫菜碳汇调查和核算技术规程》（T/FSF XXXXX-XXXX）规定的方法执行。

9 龙须菜养殖碳汇核算方法

9.1 总碳汇

9.1.1 藻体碳

养殖龙须菜藻体碳 (C_{aglae}) 核算按照HY/T 0305-2021中4.3.1的方法计算。

9.1.2 转化碳汇

龙须菜养殖过程中产生的转化碳汇包括惰性溶解有机碳和惰性颗粒有机碳，计算方法见公式（1）

$$C_{transferred} = (DOC \times \varepsilon 1 + POC \times \varepsilon 2) \times \sum_{i=1}^m (W_i / 2 \times A_i \times D_i) / 1000 \times 3.67 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$C_{transferred}$ ——转化碳汇，单位为吨二氧化碳 (t CO_2)；

DOC ——龙须菜的溶解有机碳释放速率，单位为千克碳每吨每天 (kg/ (t\cdot d))；

$\varepsilon 1$ ——DOC转化为RDOC的比例，无量纲；

POC ——龙须菜释放的颗粒有机碳，单位为千克碳每吨每天 (kg/ (t\cdot d))；

$\varepsilon 2$ ——POC转化为RPOC的比例，无量纲；

W_i ——第 i 批次龙须菜养殖期间的单位面积产量，单位为吨每公顷 (t/ha);

m ——每个龙须菜养殖周期的养殖批次；

A_i ——第 i 批次养殖龙须菜面积，单位为公顷 (ha);

D_i ——第 i 批次龙须菜养殖时间，单位为天 (d);

注：其中，DOC、POC的值和 ϵ_1 、 ϵ_2 的值根据培养实验的结果，DOC采用公式 (2) 计算，POC 的计算方法与DOC相同。若无实验结果，可参考附表D.1的值；用 $W_i/2$ 代表该批次的龙须菜平均存量。

DOC和POC的数据来自现场围隔实验的结果，DOC计算方法见公式 (2)

$$DOC = (DOC_2 - DOC_1) \times V_w / (W_1 + W_2) \times 2/T/1000 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

DOC ——龙须菜的 DOC 释放速率，单位为千克碳每吨每天 (kg/ (t·d));

DOC_2 ——实验结束时水中 DOC 浓度，单位为毫克每升 (mg/L);

DOC_1 ——实验开始时水中 DOC 浓度，单位为毫克每升 (mg/L);

V_w ——实验水体体积，单位为升 (L);

W_1 ——实验开始时龙须菜重量，单位为千克 (kg);

W_2 ——实验结束时龙须菜重量，单位为千克 (kg);

T ——实验时间，单位为天 (d);

9.1.3 沉积碳汇

龙须菜养殖区一个养殖周期有机碳埋藏量计算见公式 (3)

$$C_{deposited} = r \times \rho \times A \times TOC \times \frac{T}{365} \times 100 \times 3.67 \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$C_{deposited}$ ——龙须菜养殖区内一个养殖周期沉积物有机碳埋藏量，单位为吨二氧化碳 (t);

R ——龙须菜养殖区沉积物的沉积速率，单位为厘米每年 (cm/yr);

ρ ——龙须菜养殖区沉积物的干密度，单位为克每立方厘米 (g/cm³);

A ——龙须菜养殖区的面积，单位为公顷 (ha);

TOC ——龙须菜养殖区养殖周期沉积物中TOC的含量，单位为克每克 (g/g)；

T ——龙须菜养殖周期，单位为天 (d)。

9.1.4 总碳汇

龙须菜养殖过程中产生的总碳汇以藻体碳、沉积碳汇、转化碳汇3部分计算，见公式 (4)

$$C_{total} = C_{aglae} + C_{deposited} + C_{transferred} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

C_{total} ——指龙须菜养殖过程中产生的总碳汇，单位为吨二氧化碳 (t CO₂);

C_{aglae} ——指藻体碳，单位为吨二氧化碳 (t CO₂);

$C_{deposited}$ ——沉积碳汇，单位为吨二氧化碳 (t CO₂);

$C_{transferred}$ ——转化碳汇，单位为吨二氧化碳 (t CO₂)。

9.1.5 经验推算

在没条件进行系统调查、监测和定量实验的情况下，可采用经验系数，推算单位面积龙须菜养殖周期内的碳汇量。

龙须菜养殖总碳汇核算见公式(4), 其中, $C_{transferred}$ 计算见公式(5), $C_{deposited}$ 计算见公式(6)

$$C_{transferred} = W \times A \times D \times k1 \times 3.67 / 1000 \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

式中

$C_{transferred}$ ——龙须菜养殖区转化碳汇量，单位为吨二氧化碳 (t CO₂)；

W ——龙须菜的平均单位面积产量，单位为吨/公顷 (t/ha)；

A ——养殖龙须菜面积, 单位为公顷 (ha);

D ——龙须菜养殖时间, 单位为天 (d);

k₁——单位重量龙须菜的RDOC+RPOC转换系数，单位为克每千克每天(g/(kg·d))。

注：k₁若无实测值，可参考附表D.1的值。

$$C_{deposited} = W \times A \times k2 \times 3.67 / 1000 \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

式中

$C_{deposited}$ ——龙须菜养殖区内一个养殖周期沉积物有机碳埋藏量, 单位为吨二氧化碳(t);

W ——龙须菜的平均单位面积产量(鲜重), 单位为吨/公顷(t/ha);

A ——养殖龙须菜面积, 单位为公顷 (ha);

k2——单位面积龙须菜的沉积碳汇转换系数，单位为百分比（%）。

注：k₂若无实测值，可参考附表D.1的值。

9.2 外溢碳核算

龙须菜外溢碳量为光合固碳量与总碳汇量的差值，用于评估龙须菜对海洋生态系统产生额外贡献的碳量，计算方法见公式（7）

C_m ——龙须菜外溢碳量，单位为吨二氧化碳（t CO₂）；

C_p ——龙须菜的固碳量，单位为吨二氧化碳 (t CO₂)；

C_{total} ——指龙须菜养殖过程中产生的总碳汇量，单位为吨二氧化碳 (t CO₂)。

龙须菜固碳量(C_p)以养殖过程吸收的无机碳量计算, 方法见公式(8)

$$C_p = C_a \times \sum_{i=1}^m (W_i / 2 \times A_i \times D_i) / 1000 \dots \dots \dots \quad (8)$$

C_p ——龙须菜的固碳量，单位为吨二氧化碳（t CO₂）；

C_a ——龙须菜的固碳速率, 单位为毫克每克每天二氧化碳 (mg/(g · d));

W_i ——第 i 批次龙须菜养殖期间的单位面积产量，单位为吨每公顷 (t/ha)；

m ——每个龙须菜养殖周期的养殖批次；

A_i ——第 i 批次养殖龙须菜面积, 单位为公顷 (ha);

D_i ——第 i 批次龙须菜养殖时间, 单位为天 (d)。

注: Ca 根据养殖期间的天气状况对应不同光强的值, 若无实测数据, 晴天、阴天、雨天分别对应 15000 lx、10000 lx、5000 lx 的值。

龙须菜的固碳速率 (C_a) 以龙须菜通过光合作用对水中 DIC 和空气中 CO_2 的吸收量计算, 以 CO_2 计, 计算见公式 (9)

式中：

C_a ——龙须菜的固碳速率，单位为毫克每克每天二氧化碳 (mg/(g · d));

C_{wI} ——实验开始时水中 DIC 浓度, 单位为毫克每升 (mg/L);

C_{w2} ——实验结束时水中 DIC 浓度, 单位为毫克每升 (mg/L);

V_w ——实验水体体积, 单位为升(L);

C_{g1} ——实验开始时空气中 CO_2 浓度, 单位为毫克每升 (mg/L);

C_{g2} ——实验结束时空气中 CO_2 浓度, 单位为毫克每升 (mg/L);

V_g ——实验容器中空气体积, 单位为升 (L);

W_1 ——实验开始时龙须菜重量, 单位为克 (g);

W_2 ——实验结束时龙须菜重量, 单位为克 (g);

T ——实验时间, 单位为天 (d)。

10 数据管理与质量控制

采样记录表、分析记录表及调查报告等原始数据记录经校对、审核无误后，相关人员签字。

采样方案、采样记录表、分析记录表、调查报告等原始数据记录文件，定期统一归档。

建立全程质量控制程序，制定相应质量保证、质量控制、核证程序方案。监测数据处理和分析质量控制按 GB 17378.2 中相关规定执行。

附录 A

(资料性)

龙须菜养殖情况调查表

表 A.1 给出了龙须菜养殖情况调查表格式。

表A.1 龙须菜养殖情况调查表

养殖单位	
通信地址	
联系人/职务	
联系电话	
养殖时间	
养殖位置	
养殖面积	
养殖批次	
产量 吨	
产值 万元	
养殖年限	

填写人：

填写时间： 年 月 日

附录 B

(资料性)

龙须菜碳汇实验装置

B.1 水-气 CO₂ 同步监测装置

实验装置可以同时监测空气中 CO₂ 浓度与水中 DIC 浓度的变化情况，通过设置 LED 灯控制器以及遮光物能够模拟不同光强和光暗周期，可以根据野外环境条件设置不同的实验参数。水-气 CO₂ 同步监测装置，由圆柱形玻璃缸体、有机玻璃盖板、可调节不同光强的 LED 灯、空气监测管路等组成，见图 B.1。主要组成如下：

- a) 主体玻璃缸体积 20 L~30 L，内部装填一定量天然过滤海水或人工海水。玻璃缸体上部采用有机玻璃板与橡胶密封圈压力密封，缸体内水体和盖板之间形成一个体积确定气体空间；
- b) 通过盖板上气路连接外部分析仪（LI-7810 CH₄/CO₂/H₂O 微量气体分析仪）可获取 CH₄、CO₂ 等碳汇类相关气体的浓度变化；
- c) 缸体盖板上悬吊加装有 LED 灯，光强设置在 1000 lx~40000 lx 之间；
- d) 顶部盖板上另安装管路，可对装置内水体进行取样并进行相应参数的检测。

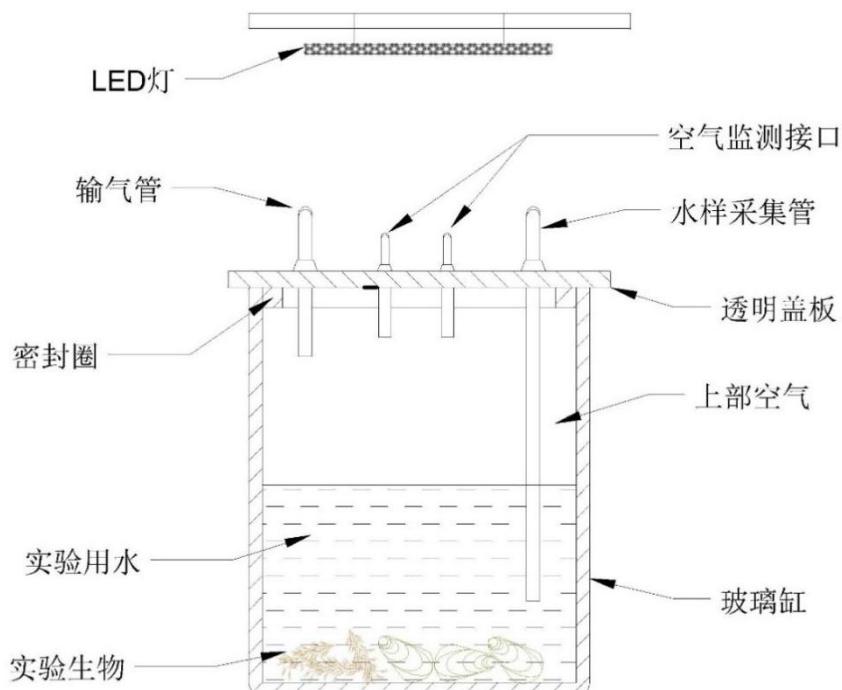


图 B.1 封闭式水-气 CO₂ 同步监测装置

B.2 自然海区现场实验围隔安装方法

自然海区现场实验围隔按照以下方法安装：

- a) 自然海区现场实验围隔由若干不锈钢管、围隔袋、实验框、CO₂监测装置组成。单个围隔示意图见图 B.2；
- b) 围隔袋采用透明塑料膜制作，底部为 1 m×1 m 的正方形，深 1.3 m~1.4 m，上方敞口，上边缘留有直径约 5 cm 的套孔，4 个角留有开口；
- c) 用 2 根长 4 m，直径 4 cm 的不锈钢管穿过每个围隔袋的对边套孔，每 3 个围隔袋串为一组，每 3 组围隔袋并排共 9 个置于一个 3.3 m×3.3 m 的网箱中。用直径 2 cm 的塑料管穿过围隔袋的另一组套孔，架在不锈钢管上；
- d) 网箱上口 3.3 m×3.3 m，底 3 m×3 m，深 1.3 m~1.4 m，底用 3 m×3 m 的不锈钢或镀锌管固定，上缘固定在 3.3 m×3.3 m 的网箱木板或塑料板上。网箱外围包裹一层高约 1.2 m 的非透水塑料布，下边固定在网箱底部的金属管上；
- e) 实验框主体为 416 不锈钢焊接而成 80 cm×80 cm×20 cm 方形框，内侧固定 80 cm×80 cm×20 cm 的 60 目筛绢袋。4 角通过带挂钩的绳索固定在不锈钢管上；
- f) CO₂ 监测装置由直径 30cm、高 50cm 的有机玻璃圆筒与 40 cm×40 cm 的有机玻璃盖板组成，之间紧密粘合不透气。盖板上方设有连接 CH₄/CO₂/H₂O 微量气体分析仪的管路。

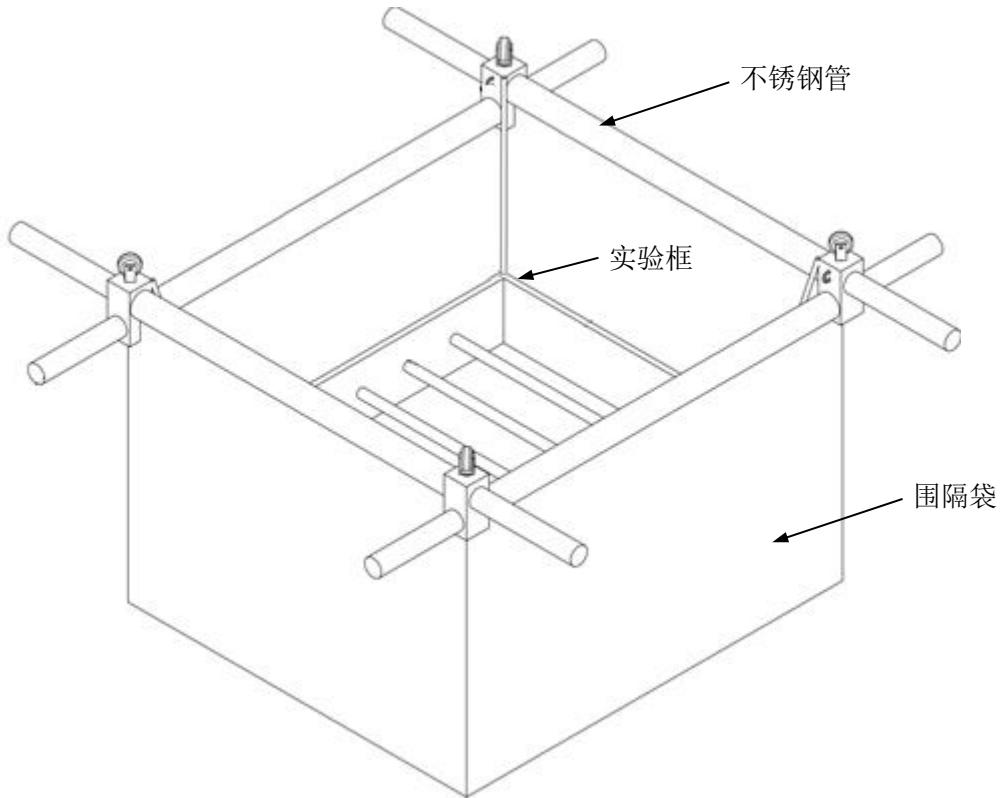


图 B.2 海区现场实验围隔

B.3 连杆式柱状沉积物采集装置

近岸连杆式柱状沉积物采集装置，包括取样管、转接头、以及与转接头顶部相连的连接组件、固定取样管的套环、封口塞、绳索等，结构见图 B. 3。采样步骤如下：

- a) 按图 B.3 安装采样装置，根据水深逐渐拼接连接杆，直到采样管接触海底；
- b) 缓慢匀速按压连接杆，使采样管缓慢插入沉积物中，直到无法下压或者插入深度接近采样管的长度；
- c) 稍微停顿使封口塞盖住采样管上口后，拔出采样管，保持采样管竖直向上移动，采样管离开水面后迅速用封口盖盖住采样管的下口；
- d) 卸下相关连接组件，用封口盖盖住采样管的上口，竖直安放，防止颠倒和泥样、水样泄漏；
- e) 沉积物柱状样取样后带回实验室分样。将取样管上覆海水移出，测量管中沉积物厚度，将沉积物柱状样分层切割，每层厚度宜为 1cm，沉积物样品贮存于聚乙烯袋中冷冻保存；
- f) 记录沉积物样品的颜色、气味和厚度等信息。

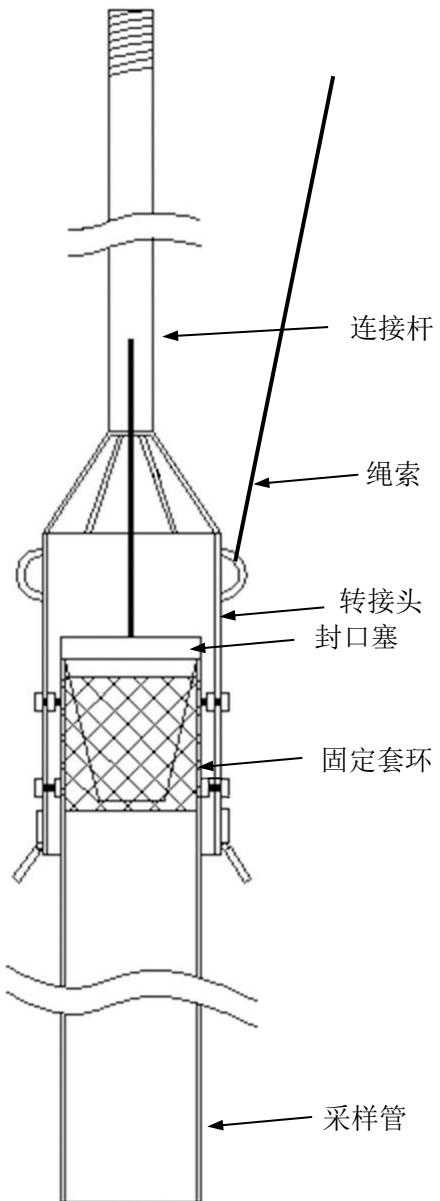


图 B.3 连杆式柱状沉积物采集装置

附录 C

(资料性) 沉积物样本取样和处理记录表

表C.1给出了沉积物取样的记录表。

表 C.1 沉积物采样记录表

共_____页第_____页

采样地点_____采样时间_____布设样点数_____

天气_____

序号	采样点 编号	样品 编号	沉积物 类型	厚度 cm	干密度 g/cm ³	颜色	气味	生物现象	其他特征
备注									

采样人_____记录人_____校对人_____

附录 D
(资料性)
龙须菜碳汇核算参考取值

表 D.1 给出了龙须菜碳汇核算的相关参考取值，在缺少调查、实验数据的情况下，开展龙须菜碳汇核算可采用相关参考取值。

表 D.1 比率经验值

项目	参考取值
龙须菜含碳率（以干重计）	33 %
DOC释放速率	0.373 kg/ (t·d)
POC释放速率	0.345 kg/ (t·d)
ε_1	56.5 %
ε_2	28.8 %
K_1	0.308 g/ (kg · d)
K_2	0.70 %