

ICS 07.060

CCS A 45

**HY**

# 中华人民共和国海洋行业标准

HY/T 0343.5—××××

## 海-气二氧化碳交换通量监测与评估技术规程 第5部分：卫星监测

Code of practice of air-sea CO<sub>2</sub> flux monitoring and assessment

Part 5: Satellite monitoring

(报批稿)

×××× - ×× - ××发布

×××× - ×× - ××实施

中华人民共和国自然资源部 发布

# 目 次

前 言 .....	II
引 言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 监测评估方法 .....	1
4.1 方法流程 .....	1
4.2 基础数据获取 .....	2
4.3 数据网格化处理 .....	2
4.4 海-气二氧化碳交换通量计算 .....	2
4.5 遥感结果精度评价 .....	4
4.6 净交换通量评估 .....	6
附录 A（资料性） 卫星和数值模式数据源及主要性能参数 .....	8
附录 B（资料性） 海水二氧化碳分压遥感模型 .....	9
附录 C（资料性） 海-气界面气体传输速率及风速补偿系数 .....	11
附录 D（资料性） 网格化海-气二氧化碳交换通量计算实例 .....	13
参考文献 .....	16

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《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。

本文件是HY/T 0343《海-气二氧化碳交换通量监测与评估技术规程》的第5部分。HY/T 0343已经发布了以下部分：

——第3部分：浮标监测；

——第4部分：基于分压差的通量评估；

——第7部分：现场监测二氧化碳分压数据处理。

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。

本文件由中华人民共和国自然资源部提出。

本文件由全国海洋标准化技术委员会（SAC/TC283）归口。

本文件起草单位：自然资源部第二海洋研究所、国家海洋环境监测中心、国家卫星海洋应用中心。

本文件主要起草人：白雁、何贤强、赵建华、邹斌、李腾、丁静、陈艳拢、赵化德、余舒洁、叶小敏、张思琪、龚芳、刘宇昕。

# 引 言

海洋碳循环是全球碳循环的重要组成部分，海-气二氧化碳交换通量是海洋碳循环研究的重点之一。海-气二氧化碳交换通量监测的主要方式包括船载走航式监测、浮标监测、岸基定点监测及卫星遥感监测等。我国海-气二氧化碳交换通量监测日益业务化和常态化，亟待相关操作规程，来规范海-气二氧化碳交换通量监测和源汇评估。HY/T 0343《海-气二氧化碳交换通量监测与评估技术规程》旨在统一、规范海-气二氧化碳交换通量监测和数据处理，提高监测数据和源汇评估结果的科学性和国际可比性。

HY/T 0343《海-气二氧化碳交换通量监测与评估技术规程》由 7 个部分构成：

- 第 1 部分：断面监测；
- 第 2 部分：浮标选址；
- 第 3 部分：浮标监测；
- 第 4 部分：基于分压差的通量评估；
- 第 5 部分：卫星监测；
- 第 6 部分：二氧化碳分压测定 非色散红外法；
- 第 7 部分：现场监测二氧化碳分压数据处理。

# 海-气二氧化碳交换通量监测与评估技术规程 第5部分：卫星监测

## 1 范围

本文件规定了利用卫星遥感监测和评估海-气二氧化碳交换通量的方法。

本文件适用于区域海洋或全球海洋无冰区的海-气二氧化碳交换通量和净交换通量的评估。

## 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。

HY/T 0343.4-2022 海-气二氧化碳交换通量监测与评估技术规程 第4部分：基于分压差的通量评估

## 3 术语和定义

HY/T 0343.4-2022界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**海-气二氧化碳净交换通量 net air-sea CO<sub>2</sub> flux**

给定空间范围和时间范围内的海-气界面海水吸收或排放二氧化碳的净交换总量。

## 4 监测评估方法

### 4.1 方法流程

海-气二氧化碳交换通量卫星遥感监测是利用在轨或历史的多源卫星遥感数据，基于海-气二氧化碳分压差的计算方法，对监测海区的海-气二氧化碳交换通量进行业务化监测和评估。所用数据来源均为遥感或数值模式数据产品。按照图1流程进行监测海区的海-气二氧化碳交换通量业务化监测和评估。

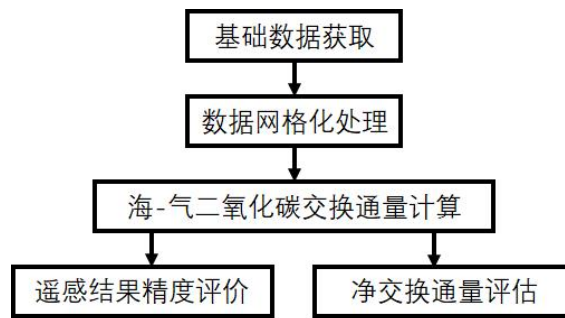


图1 海-气二氧化碳交换通量业务化监测和评估流程图

## 4.2 基础数据获取

基础数据包括遥感监测获取的表层海水二氧化碳分压、海表温度、海面之上10m高度风速、大气二氧化碳浓度、海表盐度和海面气压等。其中，大气二氧化碳浓度、海表盐度和海面气压在缺乏遥感数据的情况下，可采用模式或再分析数据产品。常用的卫星遥感和数值模式数据产品参见附录A。海水二氧化碳分压遥感模型参见附录B。

## 4.3 数据网格化处理

### 4.3.1 处理流程

根据监测区域的范围及时空变化特性，设定所需的分辨率和时间分辨率，然后对获取的各种基础数据进行网格化处理，实现时空分辨率统一。

### 4.3.2 区域截取

从卫星或数值模式数据中截取出监测区域的数据块，保持数据原有时空分辨率。

### 4.3.3 时间分辨率统一

根据设定的时间分辨率，使用时间平均或线性、最近邻域等插值方法，将区域截取后的各要素数据生成统一时间分辨率的产品。监测频率一般采用月平均，也可根据需要设为单天、8天平均等。

### 4.3.4 空间分辨率统一

使用空间平均或线性、最近邻域等插值方法，对统一时间分辨率后的数据进行空间重采样，生成统一时空分辨率的网格化产品。中国海域及省区海域一般采用1/24°，也可根据需要设为1/12°、1/8°、1/4°等。

## 4.4 海-气二氧化碳交换通量计算

4.4.1 海-气二氧化碳交换通量计算采用海-气二氧化碳分压差法，按公式（1）计算：

$$FCO_2 = \frac{k \times C_i \times 24 \times K_H^{CO_2} \times \rho \times \Delta pCO_2}{1.01325 \times 10^4} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$FCO_2$ —海-气二氧化碳交换通量，单位为毫摩尔碳每平方米每天（ $mmol C \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ）；

$k$ —海-气界面气体传输速率，单位为厘米每小时（ $cm \cdot h^{-1}$ ）；

$C_i$  — 平均风速补偿系数;

$K_H^{CO_2}$  — 二氧化碳的溶解度系数, 单位为摩尔每千克海水每标准大气压 ( $\text{mol} \cdot (\text{kg} \cdot \text{atm})^{-1}$ );

$\rho$  — 表层海水密度, 单位为千克每立方米 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$\Delta p_{CO_2}$  — 海-气二氧化碳分压差, 单位为帕斯卡 (Pa)。

4.4.2  $k$  按公式 (2) 计算, 其他  $k-U_{10}$  关系式见附录 C:

$$k = 0.266 \times \overline{U_{10}}^2 \times (Sc/600)^{-0.5} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$k$  — 海-气界面气体传输速率, 单位为厘米每小时 ( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ );

$\overline{U_{10}}$  — 单位周期内平均海面之上10m高度的风速, 单位为米每秒 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$Sc$  — 水中溶解气体的施密特数。

4.4.3  $Sc$ 按公式 (3) 计算:

$$Sc = 2073.1 - 125.62 \times SST + 3.6276 \times SST^2 - 0.043219 \times SST^3 \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$Sc$  — 水中溶解气体的施密特数;

$SST$  — 卫星遥感海表温度数据, 90温标 (ITS-90), 单位为摄氏度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

4.4.4 公式 (2) 中  $k$  与  $U_{10}$  是平方关系, 因此公式 (1) 中的  $C_i$  为  $C_2$ , 按公式 (4) 计算:

$$C_2 = \frac{\overline{((U_{10})_J)^2}}{(\overline{U_{10}})^2} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$C_2$  —  $k$  与  $U_{10}$  平方关系下的平均风速补偿系数;

$\overline{U_{10}}$  — 单位周期内平均海面之上10m高度的风速, 单位为米每秒 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$J$  — 该月内第  $J$  个遥感观测海面之上10米高度风速数据的索引;

$(U_{10})_J$  — 该月内第  $J$  个遥感观测海面之上10米高度风速, 单位为米每秒 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$\overline{((U_{10})_J)^2}$  — 该月内所有遥感观测的海面之上10米高度风速平方的平均值, 单位为米每秒的平方 ( $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2$ )。

4.4.5  $K_H^{CO_2}$  按公式 (5) 计算:

$$\begin{aligned} \ln(K_H^{CO_2}) = & -60.2409 + 93.4517 \times \frac{100}{(273.15+SST)} + 23.3585 \times \ln\left(\frac{273.15+SST}{100}\right) + SSS \times \\ & (0.023517 - 0.023656 \times \frac{(273.15+SST)}{100} + 0.0047036 \times \frac{(273.15+SST)^2}{100^2}) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

式中:

$K_H^{CO_2}$  — 二氧化碳的溶解度系数, 单位为摩尔每千克海水每标准大气压 ( $\text{mol} \cdot (\text{kg} \cdot \text{atm})^{-1}$ );

$SST$  — 卫星遥感海表温度数据, 90温标 (ITS-90), 单位为摄氏度 ( $^{\circ}\text{C}$ );

$SSS$  — 海水表层盐度数据 (1978实用盐度标度)。

4.4.6  $\rho$  按公式 (6) 计算:

$$\begin{aligned} \rho = & 999.842594 + 0.06793952 \times SST - 9.09529 \times 10^{-3} \times SST^2 + 1.001685 \times 10^{-4} \times SST^3 \\ & - 1.120083 \times 10^{-6} \times SST^4 + 6.536336 \times 10^{-9} \times SST^5 + (0.824493 - 0.0040899 \times SST + 7.6438 \times 10^{-5} \times SST^2 - 8.24 \end{aligned}$$

$$67 \times 10^{-7} \times SST^3 + 5.3875 \times 10^{-9} \times SST^4 \times SSS + (-0.00572466 + 1.0227 \times 10^{-4} \times SST - 1.6546 \times 10^{-6} \times SST^2) \times SSS^{1.5} + 4.8314 \times 10^{-4} \times SSS^2 \dots \dots \dots (6)$$

式中:

- $\rho$  — 表层海水密度, 单位为千克每立方米 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );
- $SST$  — 卫星遥感海表温度数据, 90温标 (ITS-90), 单位为摄氏度 ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $SSS$  — 海水表层盐度数据 (1978实用盐度标度)。

4.4.7  $\Delta p\text{CO}_2$ 按公式(7)计算:

$$\Delta p\text{CO}_2 = p\text{CO}_2^{\text{Seawater}} - p\text{CO}_2^{\text{Air}} \dots \dots \dots (7)$$

式中:

- $\Delta p\text{CO}_2$  — 海-气二氧化碳分压差, 单位为帕斯卡 (Pa);
- $p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$  — 海水二氧化碳分压, 单位为帕斯卡 (Pa);
- $p\text{CO}_2^{\text{Air}}$  — 大气二氧化碳分压, 单位为帕斯卡 (Pa)。

4.4.8 将卫星观测或模式模拟的大气二氧化碳浓度, 换算成大气二氧化碳分压, 按公式(8)计算:

$$p\text{CO}_2^{\text{Air}} = x\text{CO}_2 \times (P - p\text{H}_2\text{O}^{\text{Air}}) \dots \dots \dots (8)$$

式中:

- $p\text{CO}_2^{\text{Air}}$  — 大气二氧化碳分压, 单位为帕斯卡 (Pa);
- $x\text{CO}_2$  — 干空气中二氧化碳的摩尔分数, 单位为微摩尔每摩尔 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ );
- $P$  — 海面大气压, 单位为帕斯卡 (Pa);
- $p\text{H}_2\text{O}^{\text{Air}}$  — 海面大气饱和水蒸气压, 单位为帕斯卡 (Pa)。

4.4.9 海面大气饱和水蒸气压按公式(9)计算:

$$p\text{H}_2\text{O}^{\text{Air}} = e^{\left[24.4543 - \frac{6745.09}{SST+273.15} - 4.8489 \times \ln\left(\frac{SST+273.15}{100}\right) - 5.44 \times 10^{-4} \times SSS\right]} \times 1.01325 \times 10^5 \dots (9)$$

式中:

- $p\text{H}_2\text{O}^{\text{Air}}$  — 海面大气饱和水蒸气压, 单位为帕斯卡 (Pa);
- $SST$  — 卫星遥感海表温度数据, 90温标 (ITS-90), 单位为摄氏度 ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $SSS$  — 海水表层盐度数据 (1978实用盐度标度)。

4.4.10 若无合适的卫星观测或模式模拟的干空气中二氧化碳的摩尔分数, 则用邻近现场监测等效数据, 根据公式(8)计算大气二氧化碳分压。

## 4.5 遥感结果精度评价

### 4.5.1 验证数据获取与处理

获取卫星观测周期内的实测海水二氧化碳分压等数据, 根据HY/T 0343.4-2022的6.3计算海-气二氧化碳交换通量, 用于遥感结果验证。

对验证数据进行网格化处理, 时空分辨率与卫星遥感海水二氧化碳分压或海-气二氧化碳交换通量产品相同。每个数据或站位只能属于一个网格; 对不少于三个数据点的网格, 计算其平均值 $\bar{X}$ 和标准差 $\sigma$ ,  $[\bar{X}-3\sigma, \bar{X}+3\sigma]$ 范围以外的数值识别为异常数值剔除, 剩余数据的平均值作为该网格的真实值。标准差 $\sigma$ 根据公式(10)计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \dots \dots \dots (10)$$

式中:



- $\sigma$  — 网格内样本标准差；
- $N$  — 样本数；
- $i$  — 第  $i$  个样本索引；
- $X_i$  — 第  $i$  个样本的数值；
- $\bar{X}$  — 样本平均值。

#### 4.5.2 精度检验匹配数据集构建

以每个验证数据所在的网格点为中心，寻找其周围3×3或5×5空间网格窗口的遥感海水二氧化碳分压或遥感海-气二氧化碳交换通量有效数据。若窗口内遥感有效数据量占比大于50%且空间变异系数（窗口内有效遥感数据的标准差 $\sigma$ 与平均值 $\bar{X}$ 之比）小于0.25，则该遥感数据具有空间代表性，与相应的验证数据进行匹配，形成精度检验匹配数据集。

#### 4.5.3 遥感产品精度评估

##### 4.5.3.1 总体要求

精度检验匹配数据集中的验证数据应具有时空代表性，且数值不能过于集中，变异系数应大于0.25。以验证数据作为标准值，评价遥感产品精度，遥感数据和实测数据相关系数应大于0.7。对海水二氧化碳分压产品，以均方根误差小于2帕斯卡为合格；在实测数据时空变化幅度较大时（变异系数大于0.3），可放宽至3.5帕斯卡。对海-气二氧化碳交换通量产品，验证样本集的实测数据均值 $|\overline{FCO_2}| < 10$ 毫摩尔碳每平方米每天的海区，以RMSE小于4毫摩尔碳每平方米每天为合格； $|\overline{FCO_2}| > 10$ 毫摩尔碳每平方米每天的海区，以RMSE与 $|\overline{FCO_2}|$ 之比小于40%为合格。

##### 4.5.3.2 相关系数和均方根误差计算

4.5.3.2.1 相关系数根据公式（11）计算：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots(11)$$

式中：

- $R$ —相关系数；
- $N$  — 样本数；
- $i$  — 第  $i$  个样本索引；
- $x_i$  — 第  $i$  个实测数据样本的数值；
- $y_i$  — 第  $i$  个遥感产品样本的数值；
- $\bar{x}$  — 实测数据样本平均值；
- $\bar{y}$  — 遥感产品样本平均值。

4.5.3.2.2 均方根误差根据公式（12）计算：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \dots\dots\dots(12)$$

式中：

- RMSE—均方根误差；
- $N$  — 样本数；
- $i$  — 第  $i$  个样本索引；
- $x_i$  — 第  $i$  个实测数据样本的数值；
- $y_i$  — 第  $i$  个遥感产品样本的数值。

## 4.6 净交换通量评估

### 4.6.1 总体要求

将4.4节计算得到的海-气二氧化碳交换通量网格数据进行面积、时间积分，获得监测海区某时间段内的净交换通量（通常为季节或年）。

### 4.6.2 计算流程

4.6.2.1 各网格的日平均海-气二氧化碳交换通量根据公式（13）计算：

$$FCO_{2(avg)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (FCO_2)_i \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中：

$FCO_2$ —海-气二氧化碳交换通量，单位为毫摩尔碳每平方米每天（ $mmol \ C \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ）；

$FCO_{2(avg)}$  — 网格日均海-气二氧化碳交换通量，单位为毫摩尔碳每平方米每天（ $mmol \ C \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ）；

$N$  — 网格目标时间段内有效海-气二氧化碳交换通量观测数量；

$i$  — 网格目标时间段内第*i*个有效观测；

$(FCO_2)_i$  — 网格第*i*次观测的海-气二氧化碳交换通量，单位为毫摩尔碳每平方米每天（ $mmol \ C \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ）；

网格应在目标时间段内各个时期均有代表数值。

4.6.2.2 有效网格的目标时间段内平均海-气二氧化碳交换通量面积积分根据公式（14）计算：

$$FCO_{2(integ\_valid)} = \sum_{i=1}^M (FCO_{2(avg)})_i \times A_i \times 10^6 \quad \dots\dots\dots(14)$$

式中：

$FCO_2$ —海-气二氧化碳交换通量，单位为毫摩尔碳每平方米每天（ $mmol \ C \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ）；

$FCO_{2(integ\_valid)}$  — 有效网格海-气二氧化碳交换通量面积积分，单位为毫摩尔碳每天（ $mmol \ C \cdot d^{-1}$ ）；

$M$  — 监测区域内有效网格数量；

$i$  — 监测区域内第*i*个有效网格；

$FCO_{2(avg)}$  — 网格日均海-气二氧化碳交换通量，单位为毫摩尔碳每平方米每天（ $mmol \ C \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ）；

$(FCO_{2(avg)})_i$  — 第*i*个有效网格的目标时间段内平均海-气二氧化碳交换通量，单位为毫摩尔碳每平方米每天（ $mmol \ C \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ）；

$A_i$  — 第*i*个有效网格的面积，单位为平方千米（ $km^2$ ）。

4.6.2.3 第*i*个有效网格的面积按公式（15）计算：

$$A_i = \sin \left[ \left( 90 - Lat_0 \right) \times \frac{\pi}{180} \right] \times \left( \frac{k_0 \pi}{180} \right)^2 \times \frac{(R_{maj} \times R_{min})^2}{R_{maj}^2 \times \sin^2 \left( Lat_0 \times \frac{\pi}{180} \right) + R_{min}^2 \times \cos^2 \left( Lat_0 \times \frac{\pi}{180} \right)} \dots\dots\dots(15)$$

式中：

$A_i$  — 第*i*个有效网格的面积，单位为平方千米（ $km^2$ ）；

$Lat_0$  — 网格中心对应的纬度，单位为度（°）；

$k_0$  — 网格空间分辨率，单位为度（°）；

$R_{maj}$  — 地球的赤道半径，6378.140 km；

$R_{min}$  — 地球的极半径，6356.755 km  $Lat_0$ 。

4.6.2.4 监测海区目标时间段内净交换通量按公式（16）计算：

$$FCO_{2(integ)} = FCO_{2(integ\_valid)} \times \frac{\sum_{i=1}^T A_i}{\sum_{i=1}^M A_i} \times D \times 1.2 \times 10^{-5} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

$FCO_2$ —海-气二氧化碳交换通量，单位为毫摩尔碳每平方米每天（ $mmol\ C \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ）；

$FCO_{2(integ)}$  — 监测海区目标时间段内净交换通量，单位为千克碳（ $kg\ C$ ）；

$FCO_{2(integ\_valid)}$  — 有效网格海-气二氧化碳交换通量的面积积分，单位为毫摩尔碳每天（ $mmol\ C \cdot d^{-1}$ ）；

$T$ — 监测海区内扣除陆地网格的网格数量；

$M$ — 监测海区内有效遥感数据网格数量；

$A_i$  — 第*i*个有效网格的面积，单位为平方千米（ $km^2$ ）；

$D$ — 目标时间段内的时长，单位为天（ $d$ ）。

#### 4.6.3 评估要求

监测区域内各关键海区均应有代表数据，且关键海区内有效遥感数据网格面积占比

$(\frac{\sum_{i=1}^M A_i}{\sum_{i=1}^T A_i})$  以高于75%为优，通常不应低于50%。

海-气二氧化碳交换通量遥感监测、精度评价和海区净交换通量计算示例见附录D。

附录 A

(资料性)

卫星和数值模式数据源及主要性能参数

表 A.1 和表 A.2 给出了卫星数据及主要性能参数表和数值模式数据及主要性能参数表。

表 A.1 卫星数据及主要性能参数表

遥感参数	卫星平台	传感器	数据时间范围	星下点空间分辨率 (°)	星下点空间分辨率 (km)
海表温度	HY-1 系列卫星	水色水温扫描仪 (COCTS)	2002 年~2004 年; 2007 年~2016 年; 2018 年至今	1/100	1
	TERRA/AQUA	中分辨率成像光谱仪 (MODIS)	2000 年至今	1/100	1
	NOAA 系列卫星	高级甚高分辨率辐射计 (AVHRR)	1981 年至今	1/100	1
	SNPP/NOAA-20	可见光红外成像辐射仪 (VIIRS)	2012 年至今	1/133	0.75
海表盐度	SMAP	土壤湿度主被动探测遥感器 (SMAP)	2016 年至今	1/2.5	40
	Aquarius/SAC-D	L 波段辐射计	2011 年~2015 年	1/2	50
	SMOS	微波成像仪 (MIRAS)	2009 年至今	1/12	8.33
海面风速	HY-2 系列卫星	微波散射计 (SCAT)	2011 年至今	1/4	25
	QuikSCAT	海风探测器 (SeaWinds)	1999 年~2009 年	1/4	25
	METOP 系列卫星	先进散射计 (ASCAT)	2006 至今	1/4	25
	CCMP	多源数据再分析资料	1987 年~2017 年	1/4	25
大气二氧化碳浓度	GOSAT	傅里叶变化分光计	2009 年~2019 年	1	100
	OCO-2	三通道成像光栅光度计	2014 年至今	1	100
	OCO-3	三通道成像光栅光度计	2019 年至今	1	100
海水二氧化碳分压	多源卫星产品或 SatCO2 平台	多源载荷资料	1998 年至今	1/24	4.16
	哥白尼海洋环境监测服务中心 (CMEMS)	多源数据再分析资料	1985 年~2020 年	1	100
	日本气象厅 (JMA)	多源数据再分析资料	1998 年~2019 年	1	100

表 A.2 数值模式数据及主要性能参数表

模式参数 (单位)	数值模式来源	空间分辨率 (°)
海面气压	美国国家环境预报中心 (NCEP)	1/4
大气二氧化碳浓度	美国国家海洋和大气管理局 CarbonTracker 数据集	3 (经向) × 2 (纬向)
海表盐度	美国全球海洋数据同化实验 (GODAE) HYCOM 数据集	1/12
	哥白尼海洋环境监测服务中心 (CMEMS)	1/12

## 附录 B

(资料性)

### 海水二氧化碳分压遥感模型

#### B.1 模型建立

##### B.1.1 单参数拟合模型

利用现场观测数据,建立海水二氧化碳分压与海表温度、盐度、叶绿素a浓度等单个要素之间的多项式拟合关系,按公式(B.1)计算:

$$pCO_2^{Seawater} = a_0 + a_1 \times X + a_2 \times X^2 + \dots \dots \dots (B.1)$$

式中:

$pCO_2^{Seawater}$ —海水二氧化碳分压,单位为帕斯卡(Pa);

$a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ —区域化经验系数;

$X$ —海表温度、盐度或叶绿素a浓度等。

注:当 $X$ 表示海表温度时,单位为摄氏度(°C);当 $X$ 表示盐度或叶绿素a浓度时,单位为微克每升( $\mu g \cdot L^{-1}$ )。

##### B.1.2 多参数拟合模型

利用现场观测数据,建立海水二氧化碳分压与海表温度、盐度、叶绿素a浓度等多个要素之间的线性或非线性拟合关系,按公式(B.2)计算:

$$pCO_2^{Seawater} = a_0 + a_1 \times X_1 + a_2 \times X_1^2 + a_3 \times X_2 + a_4 \times X_2^2 + \dots \dots \dots (B.2)$$

式中:

$pCO_2^{Seawater}$ —海水二氧化碳分压,单位为帕斯卡(Pa);

$a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ —区域化经验系数;

$X_1$ 、 $X_2$ —海表温度、盐度或叶绿素a浓度等。

注:当 $X$ 表示海表温度时,单位为摄氏度(°C);当 $X$ 表示盐度或叶绿素a浓度时,单位为微克每升( $\mu g \cdot L^{-1}$ )。

##### B.1.3 机器学习模型

基于现场观测的海水二氧化碳分压数据、匹配遥感或模式获取的海表盐度、海表温度、叶绿素a浓度、遥感反射率、混合层深度等多个要素,构建匹配数据集;利用神经网络、随机森林等机器学习模型,对数据集进行训练,通过尝试不同输入参数组合及机器学习方法,选取具有较高精度和稳定性的模型。

##### B.1.4 半解析模型

分析监测海区海水二氧化碳分压的主要调控机制,包括热力学作用、生物作用、水团混合作用等,建立各种主控因子的定量化遥感模型。然后,将不同控制因子引起的 $pCO_2^{Seawater}$ 变化量进行叠加,最终建立基于遥感可获取参数的 $pCO_2^{Seawater}$ 变化量遥感模型,按公式B.3算:

$$pCO_2 = \overline{pCO_2} + \left( \frac{\partial pCO_2 @ therm}{\partial V_{therm}} \right) \Delta V_{therm} + \left( \frac{\partial pCO_2 @ mix}{\partial V_{mix}} \right) \Delta V_{mix} + \left( \frac{\partial pCO_2 @ bio}{\partial V_{bio}} \right) \Delta V_{bio} + \left( \frac{\partial pCO_2 @ bio}{\partial V_{flux}} \right) \Delta V_{flux} + \dots + \left( \frac{\partial pCO_2 @ factor-n}{\partial V_{factor-n}} \right) \Delta V_{factor-n} + \epsilon \dots (B.3)$$

式中:

$pCO_2$ —海水二氧化碳分压,单位为帕斯卡(Pa);

$\overline{pCO_2}$ —研究海区气候态海水二氧化碳分压背景值,单位为帕斯卡(Pa);

$\partial pCO_2 @ factor-n$ —不同控制因子引起的 $pCO_2^{Seawater}$ 变化量,单位为帕斯卡(Pa);

$V_{factor-n}$ —某控制因子;

$\varepsilon$ — 残差，为泰勒展开式中的高阶量，单位为帕斯卡 (Pa)。

控制海表  $p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$  的主要因子为：1) 温度作用 (*therm*)，2) 混合作用 (*mix*)，3) 生物作用 (*bio*)，4) 海-气二氧化碳交换通量作用 (*flux*)。

## B.2 模型选择

根据4.5的方法，对模型结果进行精度评价及合格性判断，在合格模型中选取相关系数 (R) 较大且均方根误差 (RMSE) 较小的模型作为监测海区的海水二氧化碳分压遥感模型。

## 附录 C

(资料性)

### 海-气界面气体传输速率及风速补偿系数

#### C.1 海-气界面气体传输速率与海面之上 10m 高度风速的关系

在与其他文献结果或实测数据比较时，应采用与其相同的 $k-U_{10}$ 关系式进行计算，根据海-气界面的气体传输速率 ( $k$ ) 与海面之上10m高度的风速 ( $U_{10}$ ) 的关系，计算 $k$ 的常用公式如表C.1所示。

表C.1  $k$ 与 $U_{10}$ 的关系

序号	公式	适用风速
1	$k_{600} = 0.266 \times U_{10}^2$	不限制
2	$k_{660} = 0.27 \times U_{10}^2$	不限制
3	$k_{660} = 0.24 \times U_{10}^2$	不限制
4	$k_{660} = 0.251 \times U_{10}^2$	不限制
5	$k_{600} = 0.17 \times U_{10}$	$U_{10} < 3.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
6	$k_{660} = 0.0283 \times U_{10}^3$	不限制
7	$k_{600} = 2.85 \times U_{10} - 9.65$	$3.6 < U_{10} < 13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
8	$k_{600} = 5.9 \times U_{10} - 49.3$	$U_{10} > 13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

按公式 (C.1) 或 (C.2) 计算 $k$ ，按公式 (3) 计算 $Sc$ ：

$$k = k_{600} \times (Sc/600)^{-0.5} \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

$k$  — 海-气界面气体传输速率，单位为厘米每小时 ( $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ )；

$k_{600}$  — 施密特数 $Sc$ 为600时的交换速率，单位为厘米每小时 ( $\text{cm h}^{-1}$ )；

$Sc$  — 监测条件下水中溶解气体的施密特数。

$$k = k_{660} \times (Sc/660)^{-0.5} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

$k$  — 海-气界面气体传输速率，单位为厘米每小时 ( $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ )；

$k_{660}$  — 施密特数 $Sc$ 为660时的交换速率，单位为厘米每小时 ( $\text{cm h}^{-1}$ )；

$Sc$  — 监测条件下水中溶解气体的施密特数。

#### C.2 平均风速补偿系数

C.2.1 用公式 (1) 计算 $FCO_2$ 时，如果采用 $k$ 与 $U_{10}$ 的立方关系，则平均风速补偿系数 $C_3$ 应为 $C_3$ ，按公式 (C.3) 计算：

$$C_3 = \frac{\overline{(U_{10})^3}}{(U_{10})^3} \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

$C_3$ — $k$ 与 $U_{10}$ 立方关系下的平均风速补偿系数；

$U_{10}$ —海面之上10m高度的风速，单位为米每秒 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )；

$J$ — 该月内第 $J$ 个遥感观测海面之上10m高度风速数据的索引；

$(U_{10})_j$  — 该月内第J个遥感观测海面之上10m高度风速，单位为米每秒 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )；

$\overline{((U_{10})_j)^3}$  — 该月内所有遥感观测的海面之上 10m 高度风速立方的平均值，单位为立方米每秒的三次方 ( $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^3$ )。

C. 2. 2 如果采用 $k$ 与 $U_{10}$ 的线性关系，则 $C_1$ 值为1。

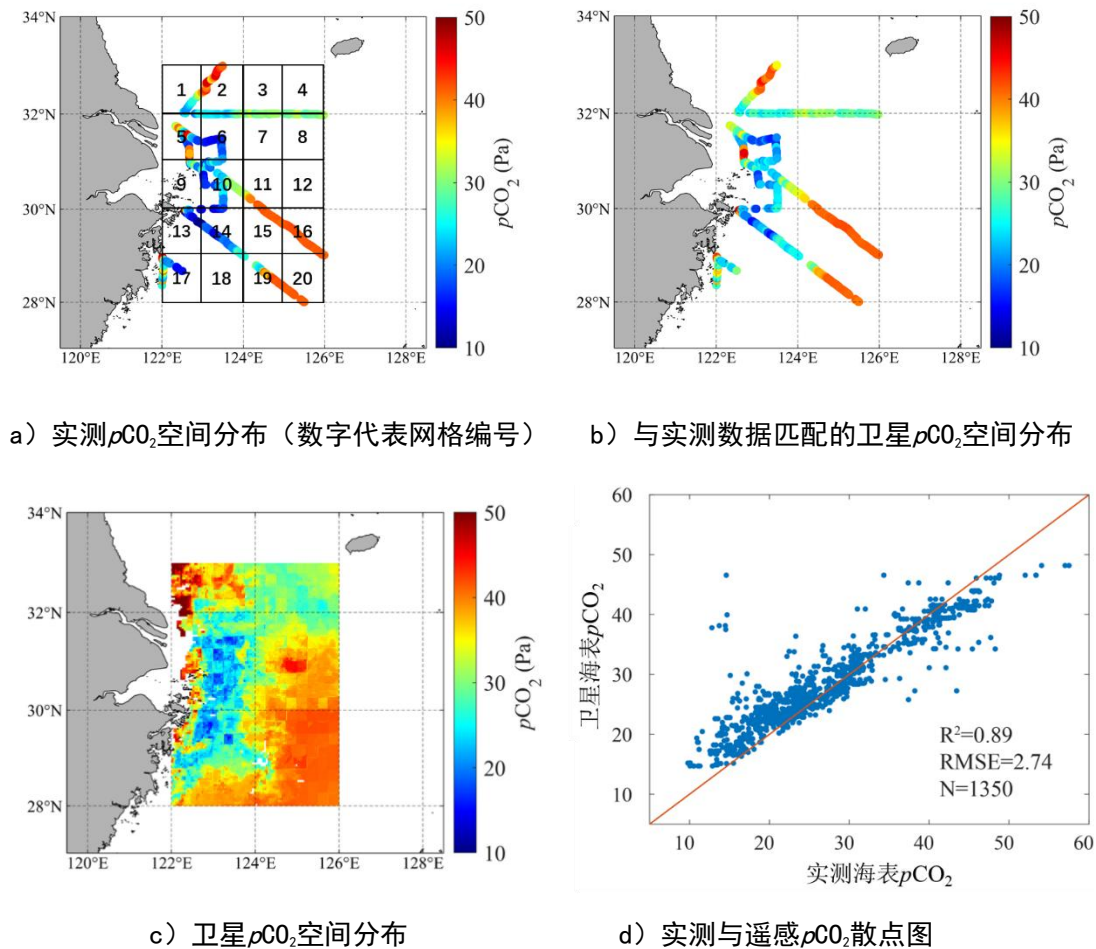


## 附录 D

(资料性)

### 网格化海-气二氧化碳交换通量计算实例

以东海2009年8月的海水二氧化碳分压 $p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$ 和大气二氧化碳分压 $p\text{CO}_2^{\text{Air}}$ 监测数据为例计, 计算该海区的海-气二氧化碳交换通量。该航次获得的遥感反演海水 $p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$ 空间分布见图D.1。经检验, 精度验证匹配数据集变异系数为0.33, 遥感数据和实测数据相关系数(R)为0.89, 均方根误差(RMSE)为2.74帕斯卡, 符合海水二氧化碳分压遥感产品精度要求。



图C.1 东海2009年8月实测 $p\text{CO}_2$ 与卫星 $p\text{CO}_2$ 精度验证图

计算步骤如下:

- 为方便结果展示, 把调查区域划分成 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格;
- 计算每个网格的平均海水二氧化碳分压 $p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$ 、干空气中二氧化碳摩尔分数 $x\text{CO}_2$ 、海表温度 $SST$ 、海表盐度 $SSS$ 、海面之上10米高度风速 $U_{10}$ 、大气压 $P$ ;
- 按公式(2)和(3)计算每个网格的水中溶解二氧化碳的施密特数 $Sc$ 和海-气界面气体传输速率 $k$ ;

- d) 按公式（4）计算每个网格的平均风速补偿系数 $C_2$ ;
- e) 按公式（5）计算每个网格的二氧化碳溶解度系数 $K_H^{CO_2}$ ;
- f) 按公式（6）计算每个网格的表层海水密度 $\rho$ ;
- g) 根据公式（8）和（9）每个网格的大气二氧化碳分压 $pCO_2^{Air}$ ;
- h) 按公式（7）计算每个网格的平均海-气二氧化碳分压差 $\Delta pCO_2$ ;
- i) 按公式（1），用网格平均 $\Delta pCO_2$ 、 $k$ 、 $C_2$ 、海水密度和 $K_H^{CO_2}$ 计算每个网格平均海-气二氧化碳交换通量 $FCO_2$ ;
- j) 按公式（13）-（16）计算2009年8月东海监测海区的海-气二氧化碳净交换通量;
- k) 2009年8月东海监测海区 $FCO_2$ 平均值为 $-3.94 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;
- l) 2009年8月东海监测海区是大气二氧化碳的汇，净交换通量为吸收 $2.93\times 10^8 \text{ kg C}$ 。

各步骤计算示例见表D.1。

表 D.1 东海 2009 年 8 月东海的海-气二氧化碳交换通量计算结果示例

网格 编号	$SSS$	$SST$ (°C)	$pCO_2^{Seawater}$ (Pa)	$xCO_2$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	$P$ (Pa)	$U_{10}$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$pCO_2^{Air}$ (Pa)	$pCO_2$ (Pa)	$\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$K_H^{CO_2}$ ( $\text{mol}\cdot(\text{kg}\cdot\text{atm})^{-1}$ )	$C_2$	$k$ ( $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$Sc$	$FCO_2$ ( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
1	27.91	24.57	40.61	387.68	100624.5	6.37	37.84	2.77	1018.12	0.03	1.16	11.41	535.44	2.66
2	31.84	24.33	34.94	385.12	100664.3	6.32	37.63	-2.69	1021.15	0.03	1.15	11.17	541.57	-2.51
3	31.87	25.07	29.79	384.88	100673.7	6.32	37.55	-7.76	1020.96	0.03	1.14	11.38	522.88	-7.30
4	32.55	25.73	30.40	384.63	100683.1	6.36	37.49	-7.09	1021.27	0.03	1.15	11.73	506.32	-6.94
5	21.52	25.61	31.16	388.11	100527.3	6.52	37.77	-6.61	1013.01	0.03	1.18	12.28	509.3	-6.89
6	32.13	25.63	26.14	385.2	100632.6	6.46	37.53	-11.39	1020.98	0.03	1.16	12.05	508.69	-11.55
7	33.12	26.26	33.10	384.9	100648.2	6.2	37.46	-4.36	1021.54	0.03	1.16	11.26	493.26	-4.13
8	33.27	26.64	33.79	384.61	100663.9	5.9	37.41	-3.62	1021.53	0.03	1.18	10.3	483.99	-3.20
9	28.23	26.05	31.63	387.75	100379.3	6.5	37.64	-6.01	1017.92	0.03	1.22	12.35	498.3	-6.55
10	33.18	26.84	25.79	385.27	100592.3	6.48	37.43	-11.64	1021.4	0.03	1.2	12.5	479.12	-12.67
11	33.25	27.32	36.45	385.03	100608	6.08	37.37	-0.92	1021.3	0.03	1.21	11.13	467.44	-0.90
12	33.31	27.56	39.03	384.8	100623.7	5.61	37.34	1.69	1021.27	0.03	1.26	9.53	461.6	1.47
13	32.2	27.09	27.98	387.19	100324.4	6.28	37.49	-9.51	1020.59	0.03	1.31	11.82	473.1	-10.68
14	33.2	27.69	28.23	385.37	100550.2	6.42	37.35	-9.12	1021.14	0.03	1.27	12.53	458.56	-10.53
15	33.2	27.82	38.28	385.2	100565.5	6.02	37.33	0.95	1021.1	0.03	1.29	11.06	455.38	0.99
16	33.15	28.14	41.38	385.03	100580.8	5.57	37.3	4.08	1020.96	0.03	1.31	9.57	447.65	3.71
17	33.09	27.98	32.51	386.42	100364.6	6.4	37.36	-4.85	1020.97	0.03	1.49	12.57	451.48	-6.58
18	33.11	28.03	35.85	385.5	100506.3	6.34	37.32	-1.47	1020.97	0.03	1.43	12.35	450.25	-1.88
19	33.18	28.31	38.24	385.39	100520.7	6.04	37.29	0.95	1020.93	0.03	1.38	11.29	443.47	1.08
20	33.22	28.55	40.96	385.29	100535.2	5.72	37.27	3.69	1020.88	0.03	1.35	10.2	437.85	3.69

## 参考文献

- [1] Ho D.T., Law C.S., Smith M.J., Schlosser P., Harvey M., Hill P., Measurements of air-sea gas exchange at high wind speeds in the Southern Ocean: Implications for global parameterizations. *Geophysical Research Letters*, 33(16): L16611, doi:10.1029/2006GL026817, 2006.
  - [2] Sweeney C., Gloor E., Jacobson A. R., Key R. M., McKinley G., Sarmiento J. L., Wanninkhof R., Constraining global air-sea gas exchange for CO<sub>2</sub> with recent bomb C-14 measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(2): GB2015, doi:10.1029/2006GB002784, 2007.
  - [3] Dickson A. G., Sabine C.L. and Christian J.R. (Eds.). Guide to best practices for ocean CO<sub>2</sub> measurements [M]. PICES Special Publication 3, 2007.
  - [4] Pierrot D., Neill C., Sullivan K., et al. Recommendations for autonomous underway pCO<sub>2</sub> measuring systems and data-reduction routines. *Deep-Sea Research II*, 56, 512-522, 2009.
  - [5] Weiss R. F. and Price B. A. Nitrous oxide solubility in water and seawater. *Marine Chemistry*, 8, 347-359, 1980,
  - [6] Bai Y., Cai W.-J., He X., Zhai W., Pan D., Dai M., Yu P., A mechanistic semi - analytical method for remotely sensing sea surface pCO<sub>2</sub> in river - dominated coastal oceans: A case study from the East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, doi:10.1002/2014JC010632, 2015.
  - [7] Guo X.H, Zhai W.D., Dai M.H., Zhang C., Bai, Y., Xu, Y., Li Q., Wang G.Z., Air-sea CO<sub>2</sub> fluxes in the East China Sea based on multiple-year underway observation. *Biogeosciences*, 12, 5495-5514, 2015.
  - [8] Wanninkhof R., Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 97(C05): 7373-7382, 1992.
  - [9] Wanninkhof R., Doney S. C., Takahashi T., McGillis, W., The effect of using time-averaged winds on regional air-sea CO<sub>2</sub> fluxes, in: *Gas Transfer at Water Surfaces*, edited by: Donelan M., *Geophys. Monogr. Ser.*, American Geophysical Union, Washington, D.C., 127, doi:10.1029/GM127p0351, 351–357, 2002.
-