

基于走航监测的海-气二氧化碳交换
通量评估技术规程
(试行)

国家海洋局生态环境保护司

2015 年 10 月

目次

1 范围	1
2 术语和定义	1
3 $p\text{CO}_2$ 数据同化.....	2
3.1 大气 $p\text{CO}_2$ 的数据同化	2
3.2 海水 $p\text{CO}_2$ 的数据同化	2
4 $p\text{CO}_2$ 平均值的计算.....	2
4.1 单次监测平均 $p\text{CO}_2$ 的计算	2
4.2 多航次监测平均 $p\text{CO}_2$ 的计算	4
4.3 平均 $p\text{CO}_2$ 不确定性的评估	4
5 海-气 CO_2 交换通量 ($F\text{CO}_2$) 的计算模型.....	4
5.1 基本原理	4
5.2 采用瞬时风速计算 $F\text{CO}_2$	5
5.3 采用月平均风速计算 $F\text{CO}_2$	5
6 $F\text{CO}_2$ 平均值的计算.....	6
附录 A (资料性附录) 平均 $p\text{CO}_2$ 和 $F\text{CO}_2$ 不确定性评估.....	7
附录 B (资料性附录) 海-气气体交换液膜扩散原理	10
附录 C (资料性附录) 海-气 CO_2 交换速率与风速的关系.....	11
附录 D (资料性附录) 不同海-气交换速率与风速的关系计算平均 $F\text{CO}_2$ 的误差传递公式.....	12

1 范围

本规程规定了基于走航监测的海-气二氧化碳 (CO₂) 交换通量评估的数据处理和计算方法。

本规程适用于基于走航监测的陆架边缘海海-气CO₂交换通量的评估, 开阔大洋海-气CO₂交换通量的评估也可参照本规程执行。

2 术语和定义

下列术语和定义适用于本规程。

2.1 大气二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2^{\text{Air}}$) partial pressure of CO₂ in the atmosphere, or atmospheric $p\text{CO}_2$

一定温度下CO₂气体单独存在且占有与大气相同体积时的压力, 单位为Pa。

2.2 海水二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2^{\text{Water}}$) partial pressure of CO₂ in seawater

海水与大气中的CO₂达到水-气平衡时, 大气中CO₂的分压, 单位为Pa。

2.3 海-气二氧化碳分压差 ($\Delta p\text{CO}_2$) $p\text{CO}_2$ difference between the surface seawater and the atmosphere

海水与大气CO₂分压的差值, 单位为Pa。

2.4 海-气二氧化碳交换通量 ($F\text{CO}_2$) flux between the seawater and the atmosphere

单位时间单位面积上海水与大气CO₂的净交换量, 单位为mmol m⁻² d⁻¹。

2.5 海-气界面的气体传输速率或交换速率 (k) gas transfer velocity, or Piston coefficient

气体以分子扩散的形式通过海-气界面的速率, 单位为cm h⁻¹。

2.6 二氧化碳的溶解度系数 ($K_{\text{H}}^{\text{CO}_2}$) dissociation efficient of CO₂

一定压力下每千克海水中能溶解CO₂的摩尔数, 单位为mol kg⁻¹ atm⁻¹。

2.7 水中溶解气体组分的施密特数 (Sc) Schmidt number

海水的运动粘度与气体扩散系数的比值, 无量纲。

2.8 10米风速 (u_{10}) Wind speed at 10 m above sea level

海平面以上10米处的风速, 单位为m s⁻¹。

2.9 亚区域 sub-region

监测区域海水二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2^{\text{Water}}$) 的空间变化大且主要调控机制不同时, 将监测区域按物理-生物地球化学特征划分的若干小区域。

注: 如果监测区域海水二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2^{\text{Water}}$) 空间变化较小或监测区域范围较小, 则可不分亚区域计算单次监测的平均 $p\text{CO}_2^{\text{Water}}$ 。

3 $p\text{CO}_2$ 数据同化

3.1 大气 $p\text{CO}_2$ 的数据同化

在计算海-气 CO_2 交换通量时, 可根据需要对大气 $p\text{CO}_2$ 数据进行同化处理, 按照监测海区大气 $p\text{CO}_2$ 的升高速率将不同年份测定的大气 $p\text{CO}_2$ 校正到某一特定年份 (目标年份), 大气 $p\text{CO}_2$ 时间校正 (同化) 按式 (1) 进行:

$$p\text{CO}_2^{\text{目标年份}} = p\text{CO}_2^{\text{测定年份}} + \text{升高速率} \times (\text{目标年份} - \text{测定年份}) \quad (1)$$

3.2 海水 $p\text{CO}_2$ 的数据同化

对于不同年份测定的水体 $p\text{CO}_2$, 在计算海-气 CO_2 交换通量时, 可根据监测海区水体 $p\text{CO}_2$ 的升高速率将不同年份测定的海水 $p\text{CO}_2$ 校正到某一特定年份 (目标年份), 数据同化方法同大气 $p\text{CO}_2$ 的同化 (式 1)。

4 $p\text{CO}_2$ 平均值的计算

4.1 单次监测平均 $p\text{CO}_2$ 的计算

4.1.1 不分亚区域的平均 $p\text{CO}_2$ 的计算

4.1.1.1 监测区域网格化

依据监测区域的大小和监测站位的疏密划分网格, 一般采用 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格, 如果监测区域经度和纬度跨度小于 5° , 则可采用 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的网格。

4.1.1.2 单个网格内 $p\text{CO}_2$ 的算术平均值 ($p\text{CO}_{2,i}$) 的计算

第 i 个网格内 $p\text{CO}_2$ 的算术均值 ($p\text{CO}_{2,i}$) 计算见式 (2):

$$p\text{CO}_{2,i} = \frac{\sum_{j=1}^b p\text{CO}_{2,j}}{b} \quad (2)$$

式中:

$p\text{CO}_{2,j}$ ——走航监测航线上的第 i 个网格内的第 j 个 $p\text{CO}_2$ 值;

b ——网格内 $p\text{CO}_2$ 数据的数量。

4.1.1.3 监测区域平均 $p\text{CO}_2$ ($p\text{CO}_{2,A}$) 的计算

求算各网格 $p\text{CO}_2$ 平均值的算术平均值, 作为监测区域的平均 $p\text{CO}_2$ ($p\text{CO}_{2,A}$),

计算方法见式 (3):

$$pCO_{2,A} = \frac{\sum_{i=1}^M pCO_{2,i} \times S_i}{\sum_{i=1}^M S_i} \quad (3)$$

式中:

M ——监测区域划分的网格总数;

S_i ——监测区域第 i 个网格的面积。

4.1.2 分亚区域的平均 pCO_2 的计算

4.1.2.1 亚区域的划分原则

根据监测区域的物理、生物地球化学特征及 pCO_2 的空间变化规律和主要调控机制, 将监测区域分为若干亚区域。

4.1.2.2 网格化监测区域

原则上依据监测区域的大小和监测站位的疏密划分网格, 一般采用 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格, 如果监测区域经度和纬度的跨度小于 5° , 则可采用 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的网格。

4.1.2.3 单个网格内 pCO_2 的算术平均值 ($pCO_{2,i}$) 的计算

按式 (2) 计算第 i 个网格内 pCO_2 的算术均值 ($pCO_{2,i}$)。

4.1.2.4 单个亚区域的平均 pCO_2 ($pCO_{2,n}$) 的计算

第 n 个亚区域的平均 pCO_2 ($pCO_{2,n}$), 即亚区域中所有网格 $pCO_{2,i}$ 的算术平均值计算见式 (4):

$$pCO_{2,n} = \frac{\sum_{i=1}^{Dn} pCO_{2,i} \times S_i}{\sum_{i=1}^{Dn} S_i} \quad (4)$$

式中:

Dn ——第 n 个亚区域中网格的数量;

S_i ——第 n 个亚区域中第 i 个网格的面积。

4.1.2.5 监测区域的平均 pCO_2 ($pCO_{2,A}$) 的计算

按式 (5) 计算监测区域的平均 pCO_2 ($pCO_{2,A}$):

$$pCO_{2,A} = \frac{\sum_{n=1}^K pCO_{2,n} \times S_n}{\sum_{n=1}^K S_n} \quad (5)$$

式中：

K ——划分的亚区域的总数；

S_n ——第 n 个亚区域的面积。

4.2 多航次监测平均 pCO_2 的计算

4.2.1 不分亚区域的多航次监测平均 pCO_2 的计算

首先求算每个航次的平均 pCO_2 ，然后求算相同季节中不同航次的平均 pCO_2 （季节平均），以不同季节平均 pCO_2 的算术平均值作为该区域的年均 pCO_2 。

4.2.2 分亚区域的多航次监测平均 pCO_2 的计算

求算每个航次中每个亚区域的平均 pCO_2 ，然后求算每个亚区域相同季节中不同航次的平均值（季节平均），步骤如下：

——在“4.1.2分亚区域的平均 pCO_2 的计算”的基础上，求算相同季节不同航次每个亚区域中 pCO_2 的平均值作为该亚区域的季节平均；

——由每个亚区域的 pCO_2 季节平均值计算该亚区域的年均 pCO_2 （四个季节的算术平均值）。

计算不同季节的算术平均值作为该区域的年均 pCO_2 。

4.3 平均 pCO_2 不确定性的评估

可采用误差传递的方法计算平均 pCO_2 的不确定性（见附录A）。

5 海-气 CO_2 交换通量 (FCO_2) 的计算模型

5.1 基本原理

基于走航监测 pCO_2 数据估算海-气 CO_2 交换通量的理论基础是界面传质的液膜扩散理论（见附录 B），海-气 CO_2 交换通量 (FCO_2) 的计算见式 (6)：

$$\begin{aligned} FCO_2 &= -D \times d[CO_2]/dZ = -D/Z_{\text{Film}} \times (K_H^{CO_2} \times pCO_2^{\text{Air}} - [CO_2]_{\text{sw}}) \\ &= D/Z_{\text{Film}} \times K_H^{CO_2} \times (pCO_2^{\text{Water}} - pCO_2^{\text{Air}}) \\ &= k \times K_H^{CO_2} \times \Delta pCO_2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中：

D ——分子扩散速率；

$d[\text{CO}_2]$ ——液膜两侧的 CO_2 浓度差;

dZ ——液膜厚度, 即 Z_{Film} ;

k ——海-气 CO_2 交换速率, 计算方法详见附录 C。

5.2 采用瞬时风速计算 $F\text{CO}_2$

考虑到量纲, 将式 (6) 按式 (7) 进行转换:

$$F\text{CO}_2 = \frac{k \times 24 \times K_{\text{H}}^{\text{CO}_2} \times \rho \times \Delta p\text{CO}_2}{1.01325 \times 100000} \quad (7)$$

式中:

ρ ——海水密度, 表层水温 ($\text{SST}, ^\circ\text{C}$)、盐度 (S) 的函数, 单位为 kg m^{-3} 。

按式 (8) 计算:

$$\begin{aligned} \rho = & 999.842594 + 0.06793952 \times \text{SST} - 9.09529 \times 10^{-3} \times \text{SST}^2 + 1.001685 \times 10^{-4} \times \text{SST}^3 \\ & - 1.120083 \times 10^{-6} \times \text{SST}^4 + 6.536332 \times 10^{-9} \times \text{SST}^5 + (8.24493 - 0.0040899 \times \text{SST} \\ & + 7.6438 \times 10^{-5} \times \text{SST}^2 - 8.2467 \times 10^{-7} \times \text{SST}^3 + 5.3875 \times 10^{-9} \times \text{SST}^4) \times S \\ & + (-0.00572466 + 1.0227 \times 10^{-4} \times \text{SST} - 1.6546 \times 10^{-6} \times \text{SST}^2) \times S^{1.5} \\ & + 4.8314 \times 10^{-4} \times S^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$K_{\text{H}}^{\text{CO}_2}$ —— CO_2 的溶解度系数, 单位为 $\text{mol kg}^{-1} \text{atm}^{-1}$, 按式 (9) 计算:

$$\begin{aligned} \ln(K_{\text{H}}^{\text{CO}_2}) = & -60.2409 + 93.4517 \times \frac{100}{\text{SST}} + 23.3585 \times \lg\left(\frac{\text{SST}}{100}\right) + S \times (0.023517 \\ & - 0.023656 \times \frac{\text{SST}}{100} + 0.0047036 \times \frac{\text{SST}^2}{100^2}) \end{aligned} \quad (9)$$

在式 (9) 中, S 是表层海水的盐度, SST 是表层海水的温度 (K)。

5.3 采用月平均风速计算 $F\text{CO}_2$

采用卫星遥感、监测站或浮标的月平均风速 (算术平均) 计算 $F\text{CO}_2$ 时, 假设风速的分布遵从正态分布, 短时间尺度的风速变化对月平均风速的影响系数 C_2 定义为:

$$C_2 = \frac{(U_j^2)_{\text{mean}}}{(U_{\text{mean}})^2} \quad (10)$$

式中:

U_j ——用于计算平均风速的所有瞬时风速, 单位为 m s^{-1} ;

U_{mean} ——月平均风速, 单位为 m s^{-1} 。

全球平均 C_2 为 1.27, 引入 C_2 后, 用月平均风速计算海-气 CO_2 交换通量,

式 (7) 转变为式 (11):

$$FCO_2 = \frac{k \times C_2 \times 24 \times K_H^{CO_2} \times \rho \times \Delta pCO_2}{1.01325 \times 100000} \quad (11)$$

式 (11) 中各符号意义同式 (7)。

6 FCO_2 平均值的计算

FCO_2 平均值的计算方法参照 pCO_2 平均值的计算方法, 将式 (2)、式 (3)、式 (4) 和式 (5) 中的 pCO_2 替换为 FCO_2 。

可采用误差传递的方法计算平均 FCO_2 的不确定性 (见附录A)。

附录 A

(资料性附录)

平均 $p\text{CO}_2$ 和 $F\text{CO}_2$ 不确定性评估

A.1 标准偏差法

在计算每个亚区域的平均 $p\text{CO}_2$ 或 $F\text{CO}_2$ 时，计算相应的标准偏差；在计算不同航次或不同季节的平均 $p\text{CO}_2$ 或 $F\text{CO}_2$ 时，采用误差传递的方法计算总的标准偏差，计算方法见式 (A.1) 和式 (A.2)：

$$\delta p\text{CO}_2 = \sqrt{\frac{[(\delta p\text{CO}_{2,1})^2 + (\delta p\text{CO}_{2,2})^2 + (\delta p\text{CO}_{2,3})^2 + \dots]}{M}} \quad (\text{A.1})$$

$$\delta F\text{CO}_2 = \sqrt{\frac{[(\delta F\text{CO}_{2,1})^2 + (\delta F\text{CO}_{2,2})^2 + (\delta F\text{CO}_{2,3})^2 + \dots]}{M}} \quad (\text{A.2})$$

式中：

$p\text{CO}_{2,x}$ ——不同网格或不同航次中 $p\text{CO}_2$ 的标准偏差 ($x = 1, 2, 3, \dots$)；

$F\text{CO}_{2,x}$ ——不同网格或不同航次中 $F\text{CO}_2$ 的标准偏差 ($x = 1, 2, 3, \dots$)；

M ——计算标准偏差的数据的数量。

A.2 $p\text{CO}_2$ 误差来源的评估方法

平均 $p\text{CO}_2$ 的不确定性主要有三个来源：

——在测定和数据处理过程中产生的测定误差 (analytical error, E_m)；

——由 $p\text{CO}_2$ 空间变化导致的平均值不确定性，即空间变异 (spatial variance, σ_s^2)；

——采样不足导致的误差 (bias resulted from under sampling, σ_u^2)。

注：走航监测未能覆盖整个监测区域，且航线在监测区域内分布不均匀，导致部分区域数据不足产生的误差为采样不足带来的误差。

根据式 (A.1) 计算网格化平均后的测定误差。计算空间变异 (σ_s^2) 和采样不足带来的误差 (σ_u^2) 应采用高空间覆盖率的遥感 $p\text{CO}_2$ 数据 (为与走航 $p\text{CO}_2$ 区分，遥感 $p\text{CO}_2$ 用 $p\text{CO}_2^R$ 表示) 来求算，基本原理如图 A.1 所示。

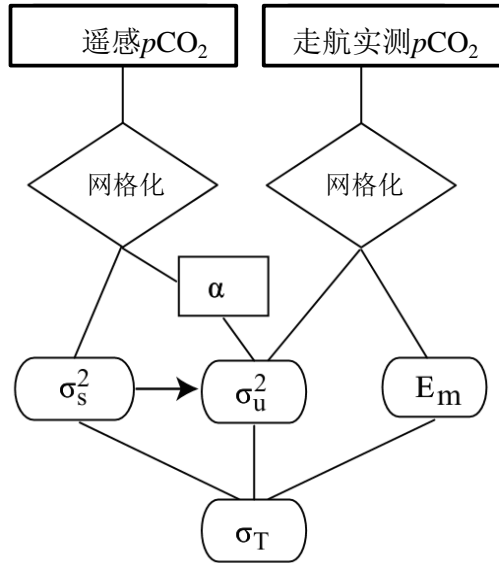


图 A.1 海表 $p\text{CO}_2$ 网格化数据不确定性估算流程示意图

(E_m 代表 $p\text{CO}_2$ 仪器测定误差, σ_s 代表空间变异性, σ_u 代表采样不足造成的误差, σ_T 代表总不确定性, α 表示在一个网格中监测点之间的相关性)

空间变异 (σ_s^2) 利用遥感 $p\text{CO}_2$, 按式 (A.3) 计算:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \quad (\text{A.3})$$

式中:

N ——网格中的遥感采样监测数量, 且 $N \geq 4$;

P_i ——每次监测的 $p\text{CO}_2^R$;

\bar{P} ——网格中 $p\text{CO}_2^R$ 的平均值。

采样不足造成的误差 (σ_u^2) 利用走航和遥感 $p\text{CO}_2$, 按式 (A.4) 计算:

$$\sigma_u^2 = (\alpha \times \sigma_s^2) / K \quad (\text{A.4})$$

式中:

α ——相关因子, 表示在一个网格中监测点 ($p\text{CO}_2^R$) 之间的相关性, 由最小二乘法计算得到;

K ——一个网格中走航 $p\text{CO}_2$ 的监测数量。

总不确定性 (σ_T) 由式 ((A.5)) 计算:

$$\sigma_T = \sqrt{E_m^2 + \sigma_s^2 + \sigma_u^2} \quad (\text{A.5})$$

在计算不同航次平均值的过程中, 用式 (A.1) 计算总的标准偏差。

A.3 $p\text{CO}_2$ 不确定性到 $F\text{CO}_2$ 不确定性的传递

海-气 CO_2 分压差是海水和大气 $p\text{CO}_2$ 之差, 即 $\Delta p\text{CO}_2 = p\text{CO}_2^{\text{Water}} - p\text{CO}_2^{\text{Air}}$, $\Delta p\text{CO}_2$ 的不确定性 ($\delta\Delta p\text{CO}_2$) 源于海水和大气 $p\text{CO}_2$ 的不确定性 (分别用 $\delta p\text{CO}_2^{\text{Water}}$ 和 $\delta p\text{CO}_2^{\text{Air}}$ 表示), 计算方法见式 (A.6):

$$\delta\Delta p\text{CO}_2 = \sqrt{(\delta p\text{CO}_2^{\text{Water}})^2 + (\delta p\text{CO}_2^{\text{Air}})^2} \quad (\text{A.6})$$

由平均 $\Delta p\text{CO}_2$ 和月平均风速用式 (11) 计算平均 CO_2 通量时, 根据误差传递的方法, 计算由 $\Delta p\text{CO}_2$ 的不确定性和 u_{10} 的不确定性 (δu_{10}) 计算 CO_2 通量的不确定性 ($\delta F\text{CO}_2$), 计算方法见式 (A.7):

$$\delta F\text{CO}_2 = F\text{CO}_2 \times \sqrt{\left(\frac{2 \times \delta u_{10}}{u_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta p\text{CO}_2}{\Delta p\text{CO}_2}\right)^2} \quad (\text{A.7})$$

式 (A.7) 是根据海-气交换速率 k 与风速 (u_{10}) 的平方关系得出的不确定性传递公式。如果 k 与 u_{10} 的关系不是平方关系, 则根据 k 与 u_{10} 的实际关系按照随即误差的传递原则推倒误差传递公式, 详见附录D。

附录 B

(资料性附录)

海-气气体交换液膜扩散原理

海-气 CO_2 交换的速度限制过程是 CO_2 以分子扩散的形式在液膜中的传输。图 B.1 中 $[\text{CO}_2]_{\text{sw}}$ 是表层海水中的 CO_2 浓度， C_g 是表层海水与大气达到水-气平衡时表层海水能溶解的 CO_2 浓度。

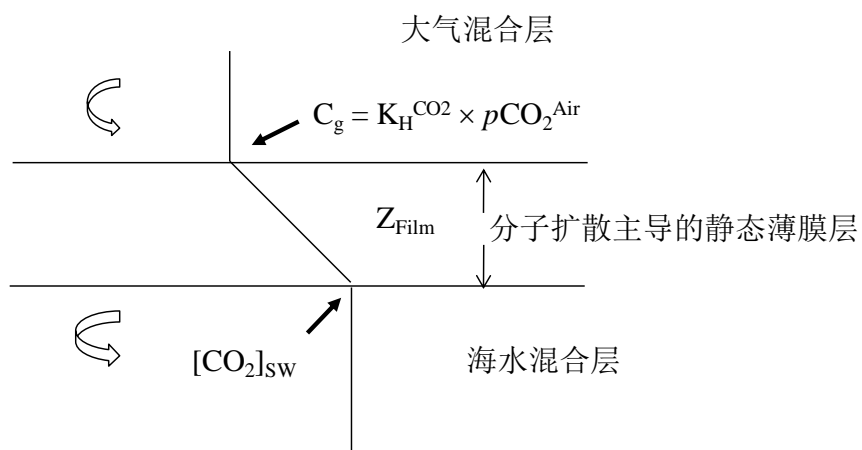


图 B.1 海-气 CO_2 交换液膜扩散模式示意图

附录 C

(资料性附录)

海-气 CO₂ 交换速率与风速的关系

界面气体传输速率与CO₂分压的同步监测难以实现，当前绝大多数相关研究在计算海-气CO₂交换通量时都要利用 k 与海平面以上10米高度的水平风速 (u_{10}) 的关系，通过测定风速来估算，海洋中常用的气体传输速率 (k) 与风速 (u_{10}) 的函数关系式如表C.1所示。

表C.1 海-气CO₂交换速率 (k) 与风速的关系

序号	公式	参考文献
1	$k_{660} = 0.31 \times u_{10}^2$ (瞬时风速) $k_{660} = 0.39 \times u_{10}^2$ (长期平均风速)	Wanninkhof (1992)
2	$k_{600} = 0.266 \times u_{10}^2$	Ho et al. (2006)
3	$k_{660} = 0.27 \times u_{10}^2$	Sweeney et al. (2007)
4	$k_{600} = 0.333 \times u_{10} + 0.222 \times u_{10}^2$	Nightingale et al. (2000)
5	$k_{660} = 3.3 + 0.026 \times u_{10}^3$	McGillis et al. (2001)
6	$k_{660} = 8.2 + 0.014 \times u_{10}^3$	McGillis et al. (2004)
7	$k_{660} = 0.24 \times u_{10}^2$	Wanninkhof et al. (2009)
8	$k_{660} = 1.09 \times u_{10} - 0.333 \times u_{10}^2 + 0.078 \times u_{10}^3$ (长期平均风速)	Wanninkhof and McGillis (1999)
9	$k_{660} = 0.0283 \times u_{10}^3$ (瞬时风速或稳定风速)	Wanninkhof and McGillis (1999)
10	$k_{600} = 0.17 \times u_{10}$ ($u_{10} < 3.6$ m/s)	Liss and Merlivat (1986)
11	$k_{600} = 2.85 \times u_{10} - 9.65$ ($3.6 < u_{10} < 13$ m/s)	Liss and Merlivat (1986)
12	$k_{600} = 5.9 \times u_{10} - 49.3$ ($u_{10} > 13$ m/s)	Liss and Merlivat (1986)

表C.1中， k_{660} 或 k_{600} 指的是施密特数Sc分别为660和600时的交换速率。现场条件下的 k 由式 (C.1) 和 (C.2) 计算：

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

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

在 (0-30) °C 范围内，CO₂在海水 (S = 35) 中的施密特数按C.3计算：

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

对于开阔海区的海-气CO₂交换通量计算，目前较常用的是公式表C.1中的序号1和序号3的 k - u_{10} 关系式。

附录 D

(资料性附录)

不同海-气交换速率与风速的关系计算平均 FCO_2 的误差传递公式

按附录C中序号1、序号2、序号3和序号7的 $k-u_{10}$ 公式计算的 k （即 k 与 u_{10} 是平方关系），由 pCO_2 和 u_{10} 的不确定性到 FCO_2 的不确定性的传递按式（A.7）计算。

按附录C中序号9公式计算的 k （即三次方关系），相应不确定性传递按式（D.1）计算：

$$\delta FCO_2 = FCO_2 \times \sqrt{\left(\frac{3 \times \delta u_{10}}{u_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta p CO_2}{\Delta p CO_2}\right)^2} \quad (D.1)$$

按附录C中序号10公式计算的 k （即一次方关系），相应的不确定性传递按式（D.2）计算：

$$\delta FCO_2 = FCO_2 \times \sqrt{\left(\frac{\delta u_{10}}{u_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta p CO_2}{\Delta p CO_2}\right)^2} \quad (D.2)$$

按附录C中序号11和序号12公式计算的 k ，相应的不确定性传递分别按式（D.3）和（D.4）计算：

$$\delta FCO_2 = FCO_2 \times \sqrt{\left(\frac{2.85 \times \delta u_{10}}{2.85 \times u_{10} - 9.65}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta p CO_2}{\Delta p CO_2}\right)^2} \quad (D.3)$$

$$\delta FCO_2 = FCO_2 \times \sqrt{\left(\frac{5.9 \times \delta u_{10}}{5.9 \times u_{10} - 49.3}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta p CO_2}{\Delta p CO_2}\right)^2} \quad (D.4)$$