

ICS 07.060

CCS A45

HY

中华人民共和国海洋行业标准

HY/T XXXX.4-XXXX

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

Protocol of air-sea CO₂ flux monitoring and assessment

Part 4: Flux estimation based on $p\text{CO}_2$ difference

（报批稿）

（本稿完成日期：2021 年 11 月 10 日）

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中华人民共和国自然资源部 发布

目 次

前 言	III
引 言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 总则	2
4.1 计算流程.....	2
4.2 平均值和标准偏差计算.....	2
5 网格化海-气二氧化碳交换通量	3
5.1 海水二氧化碳分压.....	3
5.1.1 监测区域网格化.....	3
5.1.2 网格平均二氧化碳分压和标准偏差.....	3
5.2 大气二氧化碳分压.....	3
5.3 海-气二氧化碳交换通量	3
5.3.1 海-气二氧化碳交换通量平均值.....	3
5.3.2 海-气二氧化碳交换通量标准偏差.....	5
6 非网格化海-气二氧化碳交换通量	5
6.1 海水二氧化碳分压.....	5
6.2 大气二氧化碳分压.....	5
6.3 海-气二氧化碳交换通量	6
7 监测区域源汇评估.....	6
附录 A（资料性） 海-气交换速率及转换系数	7
附录 B（资料性） 标准偏差传递公式	10
附录 C（资料性） 网格化海-气二氧化碳交换通量计算实例	12
参考文献.....	14

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。

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。

本文件是 HY/T XXXX-2XXX《海-气二氧化碳交换通量监测与评估技术规程》的第 4 部分。HY/T XXXX-2XXX 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。

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：厦门大学、国家海洋环境监测中心。

本文件主要起草人：郭香会、赵化德、郑楠、王桂芝、郭利果、徐雪梅、戴民汉。

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 XXXXX-2XXX《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 XXXXX-2XXX《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 4 部分：基于分压差的通量评估

1 范围

本文件规定了基于海-气二氧化碳分压差, 计算海-气二氧化碳交换通量及其平均值和标准偏差的方法。

本文件适用于不同季节、多年平均的海-气二氧化碳交换通量的源汇格局及其时空变异的评估。

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, 注明日期的引用文件, 仅该日期对应的版本适用于本文件; 不注明日期的引用文件, 其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

HY/T XXXXX.7-XXXX 海-气二氧化碳交换通量监测与评估技术规程 第 7 部分: 现场监测二氧化碳分压数据处理。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

大气二氧化碳分压 partial pressure of CO₂ in atmosphere

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。

3.2

海水二氧化碳分压 partial pressure of CO₂ in seawater

一定温度和盐度下, 海水与空气的 CO₂ 分压达到平衡时空气的 CO₂ 分压。

3.3

海-气二氧化碳交换通量 air-sea CO₂ flux

单位时间单位面积上海水与大气 CO₂ 的净交换量。

注: 正值表示海洋向大气释放 CO₂ (海洋是大气 CO₂ 的源); 负值表示海洋从大气吸收 CO₂ (海洋是大气 CO₂ 的汇), 零值表示海洋与大气 CO₂ 平衡。

3.4

海-气界面的气体传输速率或交换速率 gas transfer velocity; Piston coefficient

气体以分子扩散的形式通过海-气界面的速率。

3.5

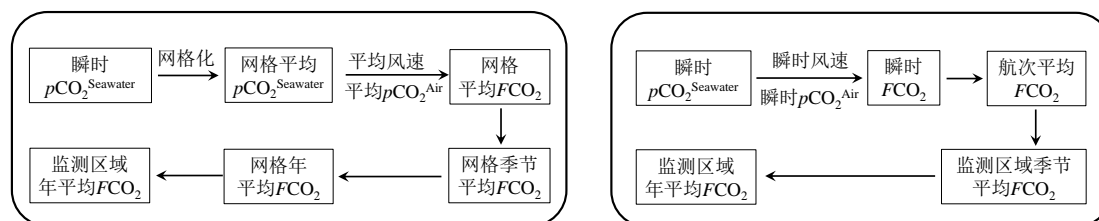
二氧化碳的溶解度系数 solubility coefficient of CO₂

一定压力下，每千克海水中能溶解 CO₂ 的摩尔数。

4 总则

4.1 计算流程

按照图 1 (a) 进行网格化海-气 CO₂ 交换通量 (FCO₂) 计算，按照图 1 (b) 进行非网格化 FCO₂ 计算。本部分推荐优先采用网格化 FCO₂ 计算方式。



a) 网格化 FCO₂ 计算方法

b) 非网格化 FCO₂ 计算方法

注：

$p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$ —— 海水 CO₂ 分压

$p\text{CO}_2^{\text{Air}}$ —— 大气 CO₂ 分压

图 1 海-气 CO₂ 交换通量计算流程

4.2 平均值和标准偏差计算

按照公式 (1) 计算平均值。对于网格化计算，按照公式 (2) 计算网格内数据的标准偏差；按照公式 (3) 计算航次、季节、年平均及空间标准偏差；对于非网格化计算，按照公式 (2) 计算航次标准偏差，按照公式 (3) 计算季节和年标准偏差。

平均值计算公式：

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

\bar{X} — 样本平均值；

i — 第 i 个样本；

X_i — 第 i 个样本的数值；

N — 样本数。

\bar{X} 的单位同 X_i 的单位，即要计算算数平均值的参数的单位。

标准偏差计算公式：

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

式中：

s — 网格内样本标准偏差（网格化计算）或航次标准偏差（非网格化计算）；

N — 样本数；

i — 第 i 个样本；

X_i — 第 i 个样本的数值；

\bar{X} — 样本平均值。

s 和 \bar{X} 的单位同 X_i 的单位，即要计算标准偏差的参数的单位。

标准偏差平均值的计算公式：

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

δ — 标准偏差平均值；

N — 样本数；

i — 第 i 个样本；

s — 网格内样本标准偏差（网格化计算）或航次标准偏差（非网格化计算）。

δ 和 s 的单位同 X_i 的单位，即要计算标准偏差平均值的参数的单位。

5 网格化海-气二氧化碳交换通量

5.1 海水二氧化碳分压

5.1.1 监测区域网格化

依据监测区域的大小和站位的疏密划分成 $0.25 \times 0.25^\circ$ 、 $0.5 \times 0.5^\circ$ 或 $1 \times 1^\circ$ 的网格，每个数据或站位只能属于一个网格。网格大小的划分依据是每个网格里的数据量不小于 4，且空白网格率不大于 50%。如果划分 $1 \times 1^\circ$ 网格，空白网格率仍大于 50%，则用 $1 \times 1^\circ$ 的网格。

5.1.2 网格平均二氧化碳分压和标准偏差

对每个航次的监测数据，按照公式(1)，根据网格内的瞬时海水 CO_2 分压 ($p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$) 计算网格平均 $p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$ ，按照公式(2) 计算每个网格 $p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$ 的标准偏差。

5.2 大气二氧化碳分压

对每个航次的监测数据，根据公式(1) 计算每个网格的平均大气 CO_2 分压 ($p\text{CO}_2^{\text{Air}}$)，根据公式(2) 计算每个网格 $p\text{CO}_2^{\text{Air}}$ 的标准偏差。

若监测数据不能满足每个非空白网格都有 $p\text{CO}_2^{\text{Air}}$ ，则计算该航次所有仪器校正大气 CO_2 摩尔分数的平均值 ($x\text{CO}_2^{\text{Corr}}$) 作为每个监测点的 $x\text{CO}_2^{\text{Corr}}$ ，根据《HY/T XXXXX.7-XXXX 第 7 部分：现场监测二氧化碳分压数据处理》的方法计算 $p\text{CO}_2^{\text{Air}}$ 。

若航次未监测大气 $x\text{CO}_2^{\text{Corr}}$ ，则用邻近大气监测站的月平均 $x\text{CO}_2^{\text{Corr}}$ 或等效数据作为每个监测点的数据，根《HY/T XXXXX.7-XXXX 第 7 部分：现场监测二氧化碳分压数据处理》的方法计算 $p\text{CO}_2^{\text{Air}}$ 。

5.3 海-气二氧化碳交换通量

5.3.1 海-气二氧化碳交换通量平均值

对每个航次，网格平均海-气 CO_2 交换通量 ($F\text{CO}_2$) 用公式(4) 计算：

$$F\text{CO}_2 = \frac{k \times C_i \times 24 \times K_H^{\text{CO}_2} \times \rho \times \Delta p\text{CO}_2}{1.01325 \times 10^4} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

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

C_i — 平均风速补偿系数;

$K_H^{\text{CO}_2}$ — CO_2 的溶解度系数, 单位为摩尔每千克每大气压 ($\text{mol}\cdot(\text{kg}\cdot\text{atm})^{-1}$);

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

$\Delta p\text{CO}_2$ — 海-气 CO_2 分压差 ($\Delta p\text{CO}_2 = p\text{CO}_2^{\text{Seawater}} - p\text{CO}_2^{\text{Air}}$), 单位为帕斯卡 (Pa);

$K_H^{\text{CO}_2}$ 按公式 (5) 计算:

$$\ln(K_H^{\text{CO}_2}) = -60.2409 + 93.4517 \times \frac{100}{(273.15+SST)} + 23.3585 \times \ln\left(\frac{273.15+SST}{100}\right) + SSS \times (0.023517 - 0.023656 \times \frac{(273.15+SST)}{100} + 0.0047036 \times \frac{(273.15+SST)^2}{100^2}) \dots\dots\dots (5)$$

式中:

SST — 表层海水温度 (90温标), 单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$);

SSS — 表层海水盐度 (1978实用盐度标度)。

ρ 按公式 (6) 计算:

$$\rho = 999.842594 + 0.06793952 \times SST - 9.09529 \times 10^{-3} \times SST^2 + 1.001685 \times 10^{-4} \times SST^3 - 1.120083 \times 10^{-6} \times SST^4 + 6.536336 \times 10^{-9} \times SST^5 + (0.824493 - 0.0040899 \times SST + 7.6438 \times 10^{-5} \times SST^2 - 8.2467 \times 10^{-7} \times SST^3 + 5.3875 \times 10^{-9} \times SST^4) \times SSS + (-0.00572466 + 1.0227 \times 10^{-4} \times SST - 1.6546 \times 10^{-6} \times SST^2) \times SSS^{1.5} + 4.8314 \times 10^{-4} \times SSS^2 \dots\dots\dots (6)$$

式中:

SST — 表层海水温度 (90温标), 单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$);

SSS — 表层海水盐度 (1978实用盐度标度)。

用航次平均 U_{10} 根据公式 (7) 计算 k :

$$k = 0.266 \times U_{10}^2 \times (Sc/600)^{0.5} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

U_{10} — 海面上 10 米高度风速, 单位为米每秒 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

Sc — 水中溶解气体的施密特数。

Sc 按公式 (8) 计算:

$$Sc = 2073.1 - 125.62 \times SST + 3.6276 \times SST^2 - 0.043219 \times SST^3 \dots\dots\dots (8)$$

式中:

SST — 表层海水温度 (90温标), 单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)。

公式 (7) 中 k 与 U_{10} 是平方关系, 因此公式 (4) 中的 C_i 为 C_2 , 用公式 (9) 计算:

$$C_2 = \frac{(U_j^2)_{\text{mean}}}{(U_{\text{mean}})^2} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

j — 第 j 个瞬时风速数据;

U_j — 第 j 个瞬时风速的大小, 单位为米每秒 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

$(U_j^2)_{\text{mean}}$ — 第 j 个瞬时风速平方的平均值米每秒的平方 ($(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^2$);

U_{mean} — 航次平均 U_{10} , 单位为米每秒 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

评估河口等海域的海-气 CO_2 交换通量时可选择采用其他 $k-U_{10}$ 关系式, 详见附录 A。

如果无船测风速，可用卫星遥感风速计算。如果测定风速不是 U_{10} ，可根据附录 A 转换成 U_{10} 。

对每个网格，根据公式（1）计算季节内所有航次 FCO_2 的平均值作为季节平均 FCO_2 ；计算所有季节平均 FCO_2 的平均值作为年平均 FCO_2 。

计算监测区域内所有网格年平均 FCO_2 的平均值作为调查区域的年平均 FCO_2 。

5.3.2 海-气二氧化碳交换通量标准偏差

FCO_2 的标准偏差 (δFCO_2) 由 $pCO_2^{Seawater}$ 的标准偏差 ($\delta pCO_2^{Seawater}$)、 pCO_2^{Air} 的标准偏差 (δpCO_2^{Air}) 和 U_{10} 的标准偏差 (δU_{10}) 计算。

根据公式（10）用 $\delta pCO_2^{Seawater}$ 和 δpCO_2^{Air} 计算 ΔpCO_2 的标准偏差：

$$\delta \Delta pCO_2 = \sqrt{(\delta pCO_2^{Seawater})^2 + (\delta pCO_2^{Air})^2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$\delta \Delta pCO_2$ — ΔpCO_2 的标准偏差，单位为微大气压 (μatm)；

$\delta pCO_2^{Seawater}$ — 海水 pCO_2 的标准偏差，单位为微大气压 (μatm)；

δpCO_2^{Air} — 大气 pCO_2 的标准偏差，单位为微大气压 (μatm)。

根据公式（11）用 $\delta \Delta pCO_2$ 和 δU_{10} 计算 δFCO_2 ：

$$\delta FCO_2 = |FCO_2| \times \sqrt{\left(\frac{2 \times \delta U_{10}}{U_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta pCO_2}{\Delta pCO_2}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

δFCO_2 — FCO_2 的标准偏差，单位为毫摩尔每平方米每天 ($mmol m^{-2} d^{-1}$)；

$|FCO_2|$ — FCO_2 的绝对值，单位为毫摩尔每平方米每天 ($mmol m^{-2} d^{-1}$)；

U_{10} — 海面上 10 米高度风速，单位为米每秒 ($m s^{-1}$)；

δU_{10} — U_{10} 的标准偏差，单位为米每秒 ($m s^{-1}$)；

ΔpCO_2 — 海-气 CO_2 分压差，单位为微大气压 (μatm)；

$\delta \Delta pCO_2$ — ΔpCO_2 的标准偏差，单位为微大气压 (μatm)。

对每个航次，根据公式（2）计算 U_{10} 的网格标准偏差，根据（3）计算 U_{10} 的航次标准偏差 (δU_{10})。

公式（11）是根据 k 与 U_{10} 的平方关系得出的标准偏差传递公式。如果采用 k 与 U_{10} 的非平方关系，需选择附录 B 中相应的公式。

对每个网格，根据公式（3）计算季节内所有航次标准偏差的平均值作为季节标准偏差；计算所有季节标准偏差的平均值作为年标准偏差。

计算监测区域内所有网格年标准偏差的平均值（公式 3）作为监测区域的年平均标准偏差。

6 非网格化海-气二氧化碳交换通量

6.1 海水二氧化碳分压

采用每个航次每个监测点的瞬时 $pCO_2^{Seawater}$ 。

6.2 大气二氧化碳分压

计算航次同区域所有大气 xCO_2^{Corr} 的平均值作为每个监测点的大气 xCO_2^{Corr} ，根据

《HY/T XXXX 第 7 部分：现场监测二氧化碳分压数据处理》的方法计算 $p\text{CO}_2^{\text{Air}}$ 。

若航次未监测大气 $x\text{CO}_2^{\text{Corr}}$ ，则用邻近大气监测站的月平均大气 $x\text{CO}_2^{\text{Corr}}$ 或等效数据作为每个监测点的数据，根据《HY/T XXXX 第 7 部分：现场监测二氧化碳分压数据处理》的方法计算 $p\text{CO}_2^{\text{Air}}$ 。

6.3 海-气二氧化碳交换通量

按照公式 (12) 计算瞬时 FCO_2 ：

$$FCO_2^{\text{Ins}} = \frac{k \times 24 \times K_H^{\text{CO}_2} \times \rho \times \Delta p\text{CO}_2^{\text{Ins}}}{1.01325 \times 10^4} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

Ins — 瞬时；

k — 海-气界面气体传输速率，用瞬时风速按照公式 (7) 计算，单位为厘米每小时 ($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)；

$K_H^{\text{CO}_2}$ — CO_2 的溶解度系数，单位为摩尔每千克每大气压 ($\text{mol} \cdot (\text{kg}\cdot\text{atm})^{-1}$)，按公式 (5) 计算；

ρ — 表层海水密度，单位为千克每立方米 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)，按公式 (6) 计算；

$\Delta p\text{CO}_2$ — 海-气 CO_2 分压差，单位为帕斯卡 (Pa)。

根据公式 (1) 计算每个监测点 FCO_2 的平均值作为航次平均 FCO_2 ，根据公式 (2) 计算航次标准偏差。分别根据公式 (1) 和 (3) 计算季节和年平均 FCO_2 及相应的标准偏差。

7 监测区域源汇评估

在空间上，如果某网格或调查区域的平均 FCO_2 为正值，则该网格或区域为大气 CO_2 的源，强度为 FCO_2 的数值；如果 FCO_2 为负值，则该网格或调查区域为大气 CO_2 的汇，强度为 FCO_2 的绝对值；如果 FCO_2 为 0，则该网格或调查区域的海水 CO_2 与大气平衡。

在时间上，如果某航次、季节或年均 FCO_2 为正值，则在该航次期间、季节或年尺度是大气 CO_2 的源，强度为 FCO_2 的数值；如果 FCO_2 为负值，则在该航次期间、季节或年尺度是大气 CO_2 的汇，强度为 FCO_2 的绝对值；如果 FCO_2 为 0，则海洋 CO_2 在该航次期间、季节或年尺度与大气平衡。

网格化海-气 CO_2 通量计算和 CO_2 源汇评估示例见附录 C。

附录 A

(资料性)

海-气交换速率及转换系数

A.1 海-气界面气体交换速率与 10 米高度风速的关系

根据海-气界面的气体交换速率 (k) 与 10 米高度风速 (U_{10}) 的关系, 计算 k 的常用公式如表 A.1 所示。

表 A.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 (A.1) 和 (A.2) 计算 k :

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

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

式中:

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

Sc — 监测条件下的施密特数, 按公式 (8) 计算。

A.2 非 10 米高度风速的转换系数

如果船载监测的风速不是 10 米高度风速, 则根据公式 (A.3) 计算 U_{10} :

$$U_{10} = U_Z \times K_Z \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

Z — 测风高度, 单位为米 (m);

U_Z — 在海平面以上 Z 米测得的风速, 单位为米每秒 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

K_Z — 风速的高度转换系数。 K_Z 随高度而变, 具体数值见表 A.2。

表A.2 不同高度的风速转换系数 K_z

Z (m)	K_z	
	$U_z > 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$U_z < 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
1.0	1.60	1.37
1.5	1.45	1.29
2.0	1.36	1.23
2.5	1.29	1.20
3.0	1.24	1.17
3.5	1.21	1.14
4.0	1.18	1.12
4.5	1.15	1.10
5.0	1.13	1.09
5.5	1.11	1.07
6.0	1.09	1.06
6.5	1.08	1.05
7.0	1.06	1.04
7.5	1.06	1.03
8.0	1.04	1.03
8.5	1.03	1.02
9.0	1.02	1.01
9.5	1.01	1.01
10.0	1.00	1.00
10.5	0.99	0.99
11.0	0.98	0.99
11.5	0.98	0.98
12.0	0.97	0.98
12.5	0.96	0.97
13.0	0.96	0.97
13.5	0.95	0.96
14.0	0.95	0.96
14.5	0.94	0.95
15.0	0.94	0.95
15.5	0.93	0.95
16.0	0.93	0.95
16.5	0.92	0.95
17.0	0.92	0.94
17.5	0.92	0.94
18.0	0.91	0.94
18.5	0.91	0.94
19.0	0.91	0.93
19.5	0.90	0.92
20.0	0.90	0.91

A.3 平均风速补偿系数

用公式(4)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_i 为 C_3 ,用公式(A.4)计算:

$$C_3 = \frac{(U_j^3)_{\text{mean}}}{(U_{\text{mean}})^3} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

j — 第 j 个瞬时风速数据;

U_j — 第 j 个瞬时风速的大小,单位为米每秒 (m s^{-1});

$(U_j^3)_{\text{mean}}$ — 第 j 个瞬时风速立方的平均值,单位为立方米每秒的三次方 ($(\text{m s}^{-1})^3$);

U_{mean} — 航次平均 U_{10} ,单位为米每秒 (m s^{-1})。

如果采用 k 与 U_{10} 的线性关系,则 C_i 为1。

附录 B

(资料性)

标准偏差传递公式

平均 FCO_2 的标准偏差由 $\delta\Delta pCO_2$ 和 δU_{10} 计算。

用附录A中序号5公式计算的 k (即一次方关系), 标准偏差传递用公式用 (B.1)

计算:

$$\delta FCO_2 = [FCO_2] \times \sqrt{\left(\frac{\delta U_{10}}{U_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta pCO_2}{pCO_2}\right)^2} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

δFCO_2 — FCO_2 的标准偏差, 单位为毫摩尔每平方米每天 ($mmol\ m^{-2}\ d^{-1}$);

$[FCO_2]$ — FCO_2 的绝对值, 单位为毫摩尔每平方米每天 ($mmol\ m^{-2}\ d^{-1}$);

U_{10} — 海面上 10 米高度风速, 单位为米每秒 ($m\ s^{-1}$);

δU_{10} — U_{10} 的标准偏差, 单位为米每秒 ($m\ s^{-1}$);

ΔpCO_2 — 海-气 CO_2 分压差, 单位为微大气压 (μatm);

$\delta\Delta pCO_2$ — ΔpCO_2 的标准偏差, 单位为微大气压 (μatm)。

用附录A中序号6公式计算的 k (即三次方关系), 标准偏差传递用公式用 (B.2)

计算:

$$\delta FCO_2 = [FCO_2] \times \sqrt{\left(\frac{3 \times \delta U_{10}}{U_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta pCO_2}{pCO_2}\right)^2} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

δFCO_2 — FCO_2 的标准偏差, 单位为毫摩尔每平方米每天 ($mmol\ m^{-2}\ d^{-1}$);

$[FCO_2]$ — FCO_2 的绝对值, 单位为毫摩尔每平方米每天 ($mmol\ m^{-2}\ d^{-1}$);

U_{10} — 海面上 10 米高度风速, 单位为米每秒 ($m\ s^{-1}$);

δU_{10} — U_{10} 的标准偏差, 单位为米每秒 ($m\ s^{-1}$);

ΔpCO_2 — 海-气 CO_2 分压差, 单位为微大气压 (μatm);

$\delta\Delta pCO_2$ — ΔpCO_2 的标准偏差, 单位为微大气压 (μatm)。

用附录A中序号7和序号8公式计算的 k , 标准偏差传递用公式分别用公式 (B.3)

和 (B.4) 计算:

$$\delta FCO_2 = [FCO_2] \times \sqrt{\left(\frac{2.85 \times \delta U_{10}}{2.85 \times U_{10} - 9.65}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta pCO_2}{pCO_2}\right)^2} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

δFCO_2 — FCO_2 的标准偏差, 单位为毫摩尔每平方米每天 ($mmol\ m^{-2}\ d^{-1}$);

$[FCO_2]$ — FCO_2 的绝对值, 单位为毫摩尔每平方米每天 ($mmol\ m^{-2}\ d^{-1}$);

U_{10} — 海面上 10 米高度风速, 单位为米每秒 ($m\ s^{-1}$);

δU_{10} — U_{10} 的标准偏差, 单位为米每秒 ($m\ s^{-1}$);

$\Delta p\text{CO}_2$ — 海-气 CO_2 分压差, 单位为微大气压 (μatm);
 $\delta\Delta p\text{CO}_2$ — $\Delta p\text{CO}_2$ 的标准偏差, 单位为微大气压 (μatm)。

$$\delta F\text{CO}_2 = [F\text{CO}_2] \times \sqrt{\left(\frac{5.9 \times \delta U_{10}}{5.9 \times U_{10} - 49.3}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta p\text{CO}_2}{p\text{CO}_2}\right)^2} \dots\dots\dots (\text{B.4})$$

式中:

$\delta F\text{CO}_2$ — $F\text{CO}_2$ 的标准偏差, 单位为毫摩尔每平方米每天 ($\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

$[F\text{CO}_2]$ — $F\text{CO}_2$ 的绝对值, 单位为毫摩尔每平方米每天 ($\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

U_{10} — 海面上 10 米高度风速, 单位为米每秒 (m s^{-1});

δU_{10} — U_{10} 的标准偏差, 单位为米每秒 (m s^{-1});

$\Delta p\text{CO}_2$ — 海-气 CO_2 分压差, 单位为微大气压 (μatm);

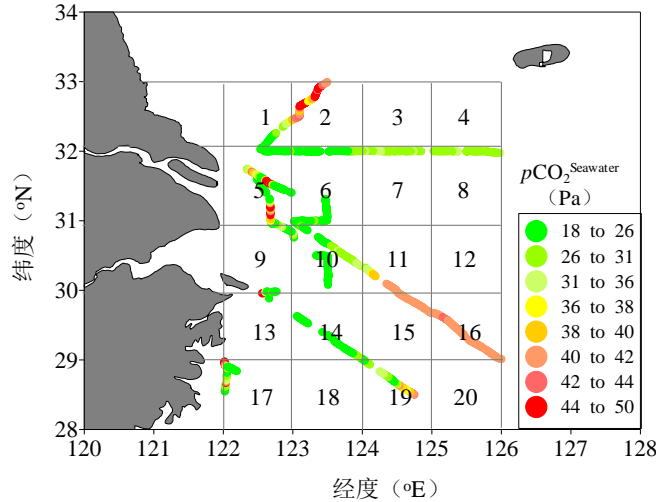
$\delta\Delta p\text{CO}_2$ — $\Delta p\text{CO}_2$ 的标准偏差, 单位为微大气压 (μatm)。

附录 C

(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 $p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$ 和 $p\text{CO}_2^{\text{Air}}$ 监测数据为例计, 计算该航次的海-气 CO_2 交换通量。该航次获得的海水 $p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$ 空间分布见图C.1。



图C.1 2009年8月东海海表 $p\text{CO}_2$ 空间分布
(数字代表网格编号)

计算步骤如下:

- 把调查区域划分成 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格。
- 用公式(1)和(2)计算每个网格的平均 $p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$ 和 $p\text{CO}_2^{\text{Air}}$, 及标准偏差(同时计算SST、SSS的平均值)。
- 计算每个网格的平均 $\Delta p\text{CO}_2$ 。
- 根据公式(1)和(2)计算每个网格的平均风速和标准偏差; 根据公式(1)和(3)计算航次平均风速(U_{mean})和标准偏差(δU_{10})。
- 根据公式(9)计算 C_2 。
- 根据公式(8)计算每个网格的 Sc ; 根据公式(7)计算每个网格的 k 。
- 根据公式(5)计算每个网格的平均 $K_H^{\text{CO}_2}$; 根据公式(6)计算每个网格的平均表层海水密度。
- 根据公式(4), 用网格平均 $\Delta p\text{CO}_2$ 、 k 、海水密度和 $K_H^{\text{CO}_2}$ 计算每个网格平均 $F\text{CO}_2$ 。
- 根据公式(10)由每个网格的 $\delta p\text{CO}_2^{\text{Seawater}}$ 和 $\delta p\text{CO}_2^{\text{Air}}$ 计算 $\delta \Delta p\text{CO}_2$; 根据公式(11)由每个网格的 $\delta \Delta p\text{CO}_2$ 和航次的 δU_{10} 计算 $\delta F\text{CO}_2$ 。
- 根据公式(1)和(3)分别计算监测区域的平均 $F\text{CO}_2$ 和标准偏差, 计算结果见表C.1。由于采用航次平均风速计算网格平均 $F\text{CO}_2$, 因此表C.1中 U_{10} 一栏填写的是航次平均风速, 而非网格平均风速。
- 航次调查期间, 调查区域 $F\text{CO}_2$ 平均值为 $-4.20 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 标准偏差为 $3.06 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。
- 航次期间调查区域是大气 CO_2 的汇, 强度为 $4.20 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。

各步计算示例见表C.1。

表C.1 东海2009年8月东海的 FCO_2 计算结果示例

网格 编号	SSS		SST (°C)		$pCO_2^{Seawater}$ (Pa)		pCO_2^{Air} (Pa)		ΔpCO_2 (Pa)		ρ ($kg\ m^{-3}$)	$K_H^{CO_2}$ ($mol\ (kg\ atm)^{-1}$)	U_{10} ($m\ s^{-1}$)		C_2	k ($cm\ h^{-1}$)	Sc	FCO_2 ($mmol\ m^{-2}\ d^{-1}$)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	-	-	Mean	SD	-	-	-	Mean	SD
1	31.87	0.35	25.76	0.28	41.5	0.1	37.1	0.1	4.4	0.2	1020.7	0.0283	4.99	1.20	1.14	7.57	505.7	2.59	1.25
2	29.75	0.23	28.30	0.15	28.7	0.3	36.7	0.3	-8.0	0.5	1018.4	0.0269	4.99	1.20	1.14	8.08	443.8	-4.78	2.31
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	28.29	1.49	26.62	0.36	32.8	0.3	37.0	0.3	-4.1	0.4	1017.8	0.0282	4.99	1.20	1.14	7.73	484.4	-2.49	1.22
6	27.12	3.61	26.65	1.31	26.8	1.1	36.7	1.0	-9.9	1.5	1016.9	0.0284	4.99	1.20	1.14	7.74	483.6	-5.94	3.00
7	30.84	1.10	26.89	0.64	28.2	0.4	36.9	0.4	-8.7	0.6	1019.6	0.0277	4.99	1.20	1.14	7.78	477.8	-5.15	2.50
8	30.51	0.33	28.01	0.24	30.3	0.2	36.8	0.2	-6.5	0.3	1019.0	0.0270	4.99	1.20	1.14	8.01	450.8	-3.87	1.87
9	28.50	1.25	29.76	1.03	20.0	1.1	36.7	1.1	-16.7	1.5	1016.9	0.0261	4.99	1.20	1.14	8.42	408.4	-10.08	4.94
10	31.16	0.99	30.06	0.18	28.3	0.2	36.7	0.2	-8.4	0.3	1018.8	0.0256	4.99	1.20	1.14	8.50	401.1	-5.03	2.42
11	33.61	0.05	29.72	0.20	41.7	0.3	36.7	0.3	5.0	0.4	1020.8	0.0255	4.99	1.20	1.14	8.41	409.3	2.97	1.45
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	33.48	0.14	29.99	0.15	40.6	0.1	36.7	0.1	3.9	0.2	1020.6	0.0254	4.99	1.20	1.14	8.48	402.8	2.33	1.13
14	33.77	0.10	29.87	0.11	41.4	0.2	36.7	0.2	4.7	0.2	1020.8	0.0254	4.99	1.20	1.14	8.45	405.6	2.80	1.35
15	31.21	0.87	29.46	0.07	28.9	0.1	36.7	0.1	-7.8	0.1	1019.1	0.0260	4.99	1.20	1.14	8.35	415.7	-4.64	2.23
16	25.53	3.63	28.15	1.43	20.8	1.2	36.9	1.2	-16.1	1.7	1015.2	0.0276	4.99	1.20	1.14	8.05	447.4	-9.80	4.83
17	29.70	0.30	28.61	0.75	26.5	0.7	36.7	0.7	-10.3	1.0	1018.2	0.0267	4.99	1.20	1.14	8.15	436.4	-6.14	3.01
18	29.36	0.13	30.20	0.26	15.3	0.2	36.5	0.2	-21.3	0.3	1017.4	0.0258	4.99	1.20	1.14	8.53	397.5	-12.85	6.18
19	31.44	1.21	30.01	0.39	24.8	0.3	36.6	0.3	-11.8	0.5	1019.1	0.0256	4.99	1.20	1.14	8.48	402.2	-7.07	3.41
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
航次平均	-	-	-	-	29.8	-	-	-	-	-	-	-	4.99	-	-	-	-	-	-
标准偏差	-	-	-	-	-	0.6	-	-	-	-	-	-	-	1.20	-	-	-	-	3.06

注：Mean: 平均值；SD: 标准偏差；-: 无数据

参考文献

- [1] 陈永利, 赵永平, 张必成, 杨连素, 吴术礼, 宋珊, 海上不同高度风速换算关系研究, 海洋科学, 1989年5月第3期, 27-31, 1989.
- [2] Weiss E.F., Price, R.A., Nitrous oxide solubility in water and sea water. *Marine Chemistry*, 8: 347-359, 1980
- [3] Liss P.S., Merlivat L., Air-sea gas exchange rates: introduction and synthesis. In: P. Buat-Menard (Editor), *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*. Reidel, Hingham, MA, 113-129, 1986.
- [4] Wanninkhof R., Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 97(C05): 7373-7382, 1992.
- [5] Wanninkhof R., McGillis W. R., A cubic relationship between air-sea CO₂ exchange and wind speed. *Geophysical Research Letters* 26(13), 1889-1892, 1999.
- [6] Wanninkhof R., Doney S. C., Takahashi T., McGillis, W., The effect of using time-averaged winds on regional air-sea CO₂ 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.
- [7] 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.
- [8] Sweeney C., Gloor E., Jacobson A. R., Key R. M., McKinley G., Sarmiento J. L., Wanninkhof R., Constraining global air-sea gas exchange for CO₂ with recent bomb C-14 measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(2): GB2015, doi:10.1029/2006GB002784, 2007.
- [9] Wanninkhof R., Asher W.E., Ho D.T., Sweeney C., McGillis W.R., Advances in quantifying air-sea gas exchange and environmental forcing, *Annual Review of Marine Science*, 213-244, 2009.
- [10] Millero F., *Chemical Oceanography* (4th Edition), CRC Press, Taylor & Francis Group, International Standard Book Number-13: 978-1-4665-1255-9 (eBook - PDF), 2013.
- [11] Wanninkhof R., Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited, *Limnology and oceanography: Methods*, 12: 351-362, 2014.
- [12] Guo X.H., Zhai W.D., Dai M.H., Zhang C., Bai, Y., Xu, Y., Li Q., Wang G.Z., Air-sea CO₂ fluxes in the East China Sea based on multiple-year underway observation. *Biogeosciences*, 12, 5495-5514, 2015.
-