

《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》  
编制说明

(2019 年 12 月 28 日)

## （一） 制定标准的背景、目的和意义

海洋碳循环是全球碳循环的重要组成部分，海-气界面的  $\text{CO}_2$  交换是海洋碳循环的重要环节。准确评估我国近海的海-气  $\text{CO}_2$  通量，获得准确的源汇清单不仅是国家进行国际气候谈判的需要，也是提高我国在碳循环研究领域国际地位的需要。基于海-气  $\text{CO}_2$  分压差评估海-气界面  $\text{CO}_2$  通量是目前海-气  $\text{CO}_2$  通量监测最广泛应用的方法。由于该法是间接测定法，由海-气界面的  $\text{CO}_2$  分压差和  $\text{CO}_2$  的传输速率 ( $k$ ) 相乘得到。海、气两相的  $\text{CO}_2$  分压 ( $p\text{CO}_2$ ) 测定准确度很高，可达到  $\pm 2 \mu\text{atm}$ ，但是气体传输速率却非常不容易同步测定，所以一般采用气体传输速率与风速的经验公式计算，而不同经验公式计算得到的气体传输速率的差异可高达几倍，这就导致采用不同的气体传输速率会得到不同的  $\text{CO}_2$  通量，因此建立优化的  $\text{CO}_2$  通量计算方法是提高我国海-气  $\text{CO}_2$  通量监测数据统一性和提高  $\text{CO}_2$  通量评估准确度的基础。此外，我国海洋国土幅员辽阔，纵跨温带和热带， $\text{CO}_2$  通量的时空变化巨大，而走航  $\text{CO}_2$  通量测定的时间和空间覆盖率有限，因此如何在有限的调查基础上获得较为准确的  $\text{CO}_2$  通量是获得我国近海准确的碳源汇清单的关键。同时，为解决船载走航监测时间覆盖度低的问题，近十年来我国浮标  $\text{CO}_2$  监测也取得长足进展。原国家海洋局大力推进我国管辖海域的  $p\text{CO}_2$  监测网的建设，获得了大批实测数据，急需引入科学的评估方法。

Surface Ocean Carbon Atlas (SOCAT) 是国际上致力于边缘海海-气  $\text{CO}_2$  通量研究的学术组织 (厦门大学是中国大陆区的成员)，致力于提高全球边缘海海-气  $\text{CO}_2$  通量评估的准确性。 $\text{CO}_2$  通量评估相关的情况如下：(1) SOCAT 有推荐的  $p\text{CO}_2$  数据处理规范。(2)  $\text{CO}_2$  传输速率 (交换速率) 的选择尚不统一。(3)  $p\text{CO}_2$  和  $\text{CO}_2$  通量平均值的计算方法尚不统一，有人用航迹上的算术平均值，有人用面积加权平均值，有人用网格化平均的方法。(4) 海-气  $\text{CO}_2$  通量不确定性的评估尚无推荐的方法。近海  $\text{CO}_2$  通量评估的难点在于空间变化巨大，不少研究者把空间变化作为不确定性；也有研究者用分解误差来源的方法 (Wang et al., 2014)。2015 年项目组完成了基于多年走航  $\text{CO}_2$  分压差的东海  $\text{CO}_2$  通量评估 (Guo et al., 2015)；2018 年完成了基于杭州湾浮标  $\text{CO}_2$  监测结果的评估；2019 年完成了基于多年走航  $\text{CO}_2$  分压差监测的南海  $\text{CO}_2$  通量评估；2019 年完成了基于东海陆架  $\text{CO}_2$  浮标监测的通量评估。本部分规程总结目前国际学术组织建议的数据

处理方法、国际上本领域内的共识和编制组近十几年积累的研究成果，并在此基础上进行改进和提高，形成本部分规程。

## （二）工作简况

本部分规程的编写任务来源于原国家海洋局发布的《全国海洋标准化“十二五”发展规划中尚未立项的 348 项国家标准和行业标准目录》，任务编号为 268，名称为《基于走航观测的海-气二氧化碳通量评估指南》。负责起草单位是厦门大学，参加起草的单位是国家海洋环境监测中心。

厦门大学在确定要申报《基于走航观测的海-气二氧化碳通量评估指南》后，联系合作单位（国家海洋环境监测中心），成立标准申报/编写工作组，根据标准的内容和标准申报/编写的程序进行任务分工，并根据编写的进展和遇到的问题进行不定期的讨论。由总负责人将不同成员的任务内容进行汇总，形成标准草案稿和编制说明。在立项、修改等过程中，仍然由总负责人负责，并按照分工推进工作的进行。

在 2015 年收到立项通知（计划项目编号：201504023-T，国海科字[2015]141 号），本指南与其他 6 个 CO<sub>2</sub> 相关标准归为《海-气二氧化碳交换通量监测与评估技术规程》系列，本部分的名称为《海-气二氧化碳交换通量监测与评估技术规程 第 4 部分：走航观测》。编写组立即组织人员进行讨论和标准草稿的编写，并由总负责人汇总。由于各海洋环境监测单位迫切需要这个规范，而标准的制定和发布耗时较长，因此，在标准草稿的基础上经过多次讨论、修改，形成了《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）”，2015 年送原国家海洋局环境保护司（海洋局环保司）报批，2015 年 10 月 22 日发布（海环字[2015]33 号）。

在上述技术规程中，不确定性评估是一个单独的部分，包括两个方法，一个是标准偏差法，另一个是分解误差来源的方法。前者计算简单，后者计算复杂，但更加科学。2015 年，厦门大学团队根据（2006~2011）年东海的  $p\text{CO}_2$  走航监测数据，用该技术规程的评估方法估算了东海的海-气 CO<sub>2</sub> 通量，得出东海的年均碳汇量为  $6.9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，东海每年从大气吸收 1300 万吨碳(Guo et al., 2015)。

值得一提的是，由于无法获得东海大部分航次期间遥感或模式  $p\text{CO}_2$  数据（空间覆盖度非常大的  $p\text{CO}_2$  数据），因此不能用分解误差来源的不确定性评估方法（3.5 不确定性评估），只能用标准偏差法。2018 年，基于（2000~2018）年南海的走航监测  $p\text{CO}_2$  数据，厦门大学团队再次用该技术规程评估南海的海-气  $\text{CO}_2$  通量，遇到了同样的问题，无法采用更科学的分解误差来源的不确定性评估方法。通过这两次经历，编写组意识到，采用分解误差来源的不确定性评估方法的时机还不成熟。基于此，编写组对本部分规程的内容进行了重大修改，删除了解析误差来源的不确定性评估方法，只保留了标准偏差法；同时，删除了“不确定性评估方法”部分，而是把标准偏差的计算方法融合到每个步骤中；删除了不常用的  $k\text{-}U_{10}$  关系。以上修改提高了本部分规程的实用性、可读性和可操作性。

2018 年 4 月，本部分规程的草案稿发送到国家海洋局东海环境监测中心（以下简称东海监测中心）、国家海洋局第二海洋研究所（以下简称海洋二所）和国家海洋局第三海洋研究所（以下简称海洋三所）进行验证。验证的过程是分发一批模拟  $\text{CO}_2$  分压、海表温度、盐度、风速等数据，请各验证单位按照本部分规程的步骤进行海-气  $\text{CO}_2$  通量计算，最终得到该区域的年均海-气  $\text{CO}_2$  通量。模拟数据包括东海四个季节的数据，有的季节包括两个航次。2018 年 4 月和 5 月收到上述三家单位的验证报告。三家单位分别用微软 Excel 2010 版和 2013 版进行了计算，与主要编制人用 Excel 2013 版计算的结果完全一致。这表明本部分规程的数据处理方法科学、易懂；计算结果重现性好。东海监测中心认为，本部分规程有效解决了相关监测单位数据处理标准化和规范化问题。海洋二所认为，本部分规程语言表达简明扼要、术语和定义规范科学、海数据处理合理、计算流程简便，适合海洋监测和科研单位作为海-气  $\text{CO}_2$  交换通量监测与评估的通用方法。海洋三所认为，本部分规程计算方法科学、计算流程简便，易于操作，适合相关监测单位和科研院所作为数据处理的通用方法。此外，海洋二所还建议增加 Wanninkhof(2014)关于海-气  $\text{CO}_2$  通量交换速率与风速关系的公式；福建海洋大学建议增加非 10 米风速转换成 10 米风速的转换系数。编写组接受了这些建议，在 2018 年 7 月形成的征求意见稿中，把上述公式和转换系数加入本部分规程中。

2018 年 7 月，编写组把征求意见稿和编制说明寄至国家海洋局第一海洋研究所（以下简称海洋一所）、海洋二所、海洋三所、宁波海洋环境监测中心站、

中国海洋大学、山东大学等 20 家单位征求意见。2018 年 8 月收到 19 份回函，回函率 95%。回函的单位普遍认为本部分规程规范了海-气 CO<sub>2</sub> 通量的计算及不确定性传递，语言表达简明扼要，术语和定义科学规范，数据处理合理、计算流程简便，适合海洋监测单位作为海-气 CO<sub>2</sub> 通量评估的通用方法。同时，各单位也基于各自的经验提出了修改意见。此外，部分专家认为本部分规程的标题不准确。编写组认真研究了每个修改意见，并做了相应的修改和补充，详见《标准意见汇总》。2018 年 10 月形成本部分规程送审稿。

2019 年 9 月 9 日，国家海洋标准化技术委员会海洋环境保护分技术委员会（以下简称分委会）在国家海洋环境监测中心组织召开了内部审查会。会上编制组向专家简要汇报了本部分规程编制的进展情况，并详细汇报了本部分规程的详细内容。专家就本部分规程表达的规范性、一致性、准确性、结构的科学性等方面提出了修改意见和建议，主要问题是分区可操作性差，数据归一化容易引起误解等问题。9 月 10 日，编写组认真讨论了专家的修改意见，并达成修改意向：增加流程图；在附录 1 的附表 A.1 增加“适用性”说明；把标准偏差传递方法合并到 CO<sub>2</sub> 通量计算部分。此外，考虑到监测区域分区只用于研究 CO<sub>2</sub> 通量的主要调控机制，而对 CO<sub>2</sub> 通量计算基本无意义，而分区的可操作性又较差，因此剔除了分区部分。编制组经过几轮修改，于 9 月 20 日形成新的送审稿。

2019 年 10 月 7 日分委会组织专家召开了审查会，与会专家逐条讨论了本部分规程的内容，提出了具体的修改意见；同时建议把标题修改为“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”。编写组根据专家的修改意见进行了修改，于 2019 年 12 月形成了报批稿。

本部分规程的主要起草人有：

郭香会（厦门大学），总负责人，主要负责标准草稿的起草、大气及海水  $p\text{CO}_2$  的数据归一化和风速对 CO<sub>2</sub> 通量影响的评估；

赵化德（国家海洋环境监测中心），主要负责大气和海水  $p\text{CO}_2$  的不确定性到 CO<sub>2</sub> 通量的传递方法；

郑楠（国家海洋环境监测中心），主要负责评价体系的业务化试运行和用户意见的收集；

王桂芝（厦门大学）：主要负责海水  $p\text{CO}_2$  空间变异的评估；

郭利果（厦门大学）：主要负责海-气 CO<sub>2</sub> 通量计算模型的优化；

徐雪梅（国家海洋环境监测中心）：主要负责用户走访；  
戴民汉（厦门大学），顾问。

### （三）标准编制原则和确定标准主要内容

#### 3.1 标准编制原则

本部分规程编写过程中遵循以下原则：

- 1) 符合性：本部分规程符合国家和行业有关方针、政策、法律、法规。
- 2) 适用性：在调研了我国海-气  $\text{CO}_2$  通量计算和源汇评估的基础上，初步确定了本部分规程的计算方法，在海洋研究所及自然资源部监测系统内推进本部分规程的方法验证工作。
- 3) 先进性：本部分规程编写初期，查阅了大量的国内外关于海洋碳循环特别是海-气  $\text{CO}_2$  通量计算方法的资料，重点参考近几年来国际上推荐的通量计算方法，在归纳总结以上资料的基础上完成本部分规程的编写，以保证其先进性。
- 4) 目的性：规范了基于海水和大气  $\text{CO}_2$  分压监测数据的海-气  $\text{CO}_2$  通量的计算方法，有利于促进我国管辖海域海-气  $\text{CO}_2$  通量监测及研究工作的规范化运行。
- 5) 协调性：本部分规程与相关国家和行业标准协调一致。

#### 3.2 标准主要内容的确定依据

本部分规程要求制定从海水和大气  $p\text{CO}_2$  计算海-气  $\text{CO}_2$  通量，并计算监测区域平均值和标准偏差的方法。

本部分规程的内容包括监测区域网格化、 $p\text{CO}_2$  和  $\text{CO}_2$  通量平均值和标准偏差的计算、平均  $\text{CO}_2$  通量计算的不确定性传递等。相关内容的解释说明如下。

##### 3.2.1 海-气 $\text{CO}_2$ 通量计算的基本原理

基于表层海水和大气  $p\text{CO}_2$  数据计算海-气  $\text{CO}_2$  交换通量的理论基础是界面传质的膜扩散理论。海-气  $\text{CO}_2$  交换的速度限制过程是  $\text{CO}_2$  以分子扩散的形式在液膜中的传输。图 S.1 中  $[\text{CO}_2]_{\text{sw}}$  是表层海水中的  $\text{CO}_2$  浓度， $C_g$  是表层海水与大气达到分压平衡时表层海水能溶解的  $\text{CO}_2$  浓度。

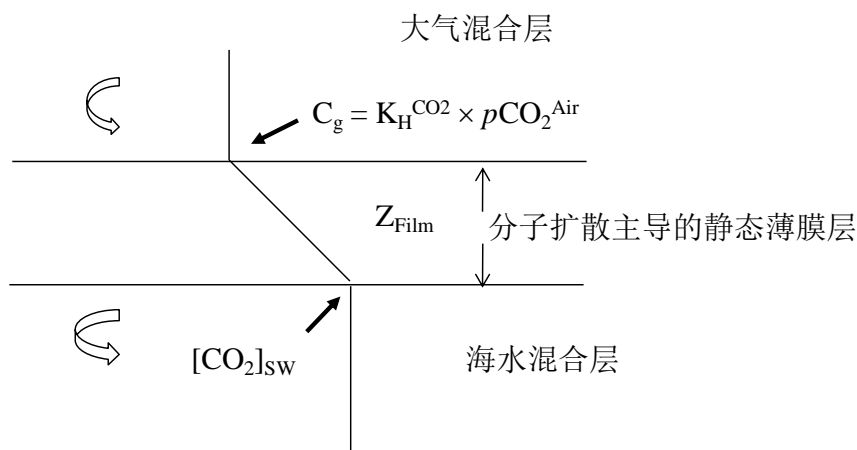


图 S.1 海-气 CO<sub>2</sub> 交换液膜扩散模式示意图

海-气 CO<sub>2</sub> 交换通量 (FCO<sub>2</sub>) 的计算公式为:

$$\begin{aligned}
 FCO_2 &= -D \times d[CO_2]/dZ = -D/Z_{\text{Film}} \times (K_H^{\text{CO}_2} \times pCO_2^{\text{Air}} - [CO_2]_{\text{sw}}) \\
 &= D/Z_{\text{Film}} \times K_H^{\text{CO}_2} \times (pCO_2^{\text{Seawater}} - pCO_2^{\text{Air}}) \\
 &= k \times K_H^{\text{CO}_2} \times \Delta pCO_2 \quad (\text{S.1})
 \end{aligned}$$

其中:

D——分子扩散速率;

d[CO<sub>2</sub>]——液膜两侧的CO<sub>2</sub>浓度差;

dZ——液膜厚度, 即Z<sub>Film</sub>;

K<sub>H</sub><sup>CO<sub>2</sub></sup>——CO<sub>2</sub>溶解度系数;

pCO<sub>2</sub><sup>Air</sup>——大气中的CO<sub>2</sub>分压;

[CO<sub>2</sub>]<sub>sw</sub>——海水中CO<sub>2</sub>浓度;

k——海-气界面的CO<sub>2</sub>传输速率;

ΔpCO<sub>2</sub>——海-气界面的CO<sub>2</sub>分压差。

由于海-气CO<sub>2</sub>通量 (FCO<sub>2</sub>) 的单位为mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, k的单位为cm · h<sup>-1</sup>, K<sub>H</sub><sup>CO<sub>2</sub></sup>的单位为mol · (kg · atm)<sup>-1</sup>, 用Weiss (1974)的公式计算, ΔpCO<sub>2</sub>的单位为Pa, 为保持公式 (S.1) 的两侧的量纲一致, 公式 (S.1) 的形式变成公式 (S.2, 本部分规程文本中的公式4)。其中, ρ是海水密度, 单位为kg · m<sup>-3</sup>, 用Millero (2013) 的密度与海水温度和盐度的关系计算。

$$FCO_2 = \frac{k \times 24 \times K_H^{\text{CO}_2} \times \rho \times \Delta pCO_2}{1.01325 \times 10^4} \quad (\text{S.2})$$

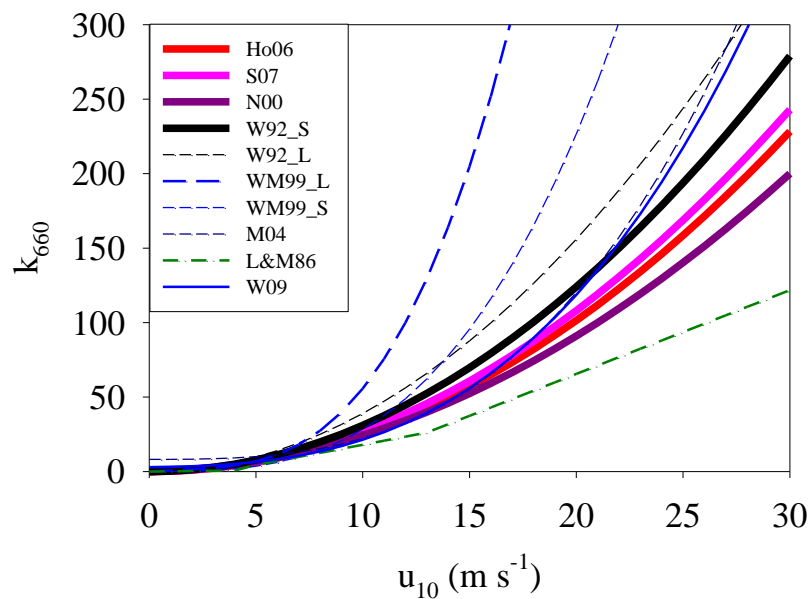
公式 (S.2) 是用瞬时风速计算的瞬时k计算的FCO<sub>2</sub>。如果用平均风速, 还需要乘以风速的变化系数C<sub>i</sub> (Wanninkhoff et al., 2002), FCO<sub>2</sub>的计算公式就变成了公式 (S.3, 即本部分规程文本中的公式8)。

$$FCO_2 = \frac{k \times C_i \times 24 \times K_H^{\text{CO}_2} \times \rho \times \Delta pCO_2}{1.01325 \times 10^4}$$

### 3.2.2 CO<sub>2</sub> 通量计算中海-气界面气体传输速率与风速关系的选择

由于海-气界面的气体传输速率很难与CO<sub>2</sub>分压同步监测,当前绝大多数相关研究在计算海-气CO<sub>2</sub>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,即通过测定风速来计算 $k$ 。图S2是文献建议的海洋中常用的气体传输速率 ( $k$ ) 与风速 ( $U_{10}$ ) 的函数关系式。比较的结果表明,在相同风速下,不同公式计算所得的 $k$ 值差别非常大,最高值比最低值高几倍。这主要是由于不同区域 $k$ 的影响因素不同,但是全都归因于风速变化造成的。尽管变化范围非常大,但还是可以找到一些共性。

Ho et al. (2006)用<sup>3</sup>He/SF<sub>6</sub>双示踪剂法在新西兰东南部的太平洋测定得到结果与Nightingale et al. (2000)用相同方法在北海得到的结果非常接近; Sweeney et al. (2007)用全球大洋中来源于核试验的 $\Delta^{14}\text{C}$ 的物质衡算法得到的结果与Ho et al. (2006)的结果高度一致。这三个公式的结果比Wanninkhof (1992)瞬时风速的结果略低。但总地来说,这四个公式的计算结果是最接近的(图S.2)。



图S.2 文献报道海洋中常用的海-气界面气体传输速率与10米风速的关系

(Ho06来自Ho et al. (2006); S07来自Sweeney et al. (2007); N00来自Nightingale et al. (2000); W92\_S来自Wanninkhof (1992)瞬时风速; W92\_L来自Wanninkhof (1992)长期平均风速; WS99\_L来自Wanninkhof and McGillis (1999)的长期平均风速; WS99\_S来自Wanninkhof and McGillis (1999)的瞬时风速; M04



来自McGilli et al. (2004); L&M86来自Liss and Merlivat (1986); W09来自  
Wanninkhot et al. (2009))

1992年以来, 多数相关研究在计算海-气CO<sub>2</sub>通量时采用Wanninkhof (1992)提出的气体传输速率 ( $k$ ) 与U<sub>10</sub>平方关系的计算式:

$$k_{660} = f \times U_{10}^2 \quad (\text{S.4})$$

其中,

$$k = k_{660} \times (\text{Sc}/660)^{-0.5} \quad (\text{S.5})$$

将公式 (S.2) 和 (S.3) 合并起来即,

$$k = f \times U_{10}^2 \times (\text{Sc}/660)^{-0.5} \quad (\text{S.6})$$

公式 (S.3) 中, Sc是CO<sub>2</sub>在海水 (S = 35) 中的施密特 (Schmidt) 数; 660是CO<sub>2</sub>在20°C的海水中的施密特数;  $f$  是一个比例系数。水中溶解气体组分的Schmidt数是水的运动粘度与该气体扩散系数的商, 通常可表达为表层水温 (SST, °C) 和盐度 (S) 的函数。

2006~2007年发表的两篇研究论文(Ho et al., 2006; Sweeney et al., 2007), 通过不同方法, 得到另一个几乎相同的海-气交换速率与风速的关系:

$$k_{600} = 0.266 \times U_{10}^2 \quad (\text{S.7})$$

以上汇总的信息表明, 公式 (S.7) 将在今后若干年被广泛使用, 例如, Takahashi et al. (2009)基于全球风场6小时平均风速数据集的再分析结果认为, 最合理的 $f$  系数应该是0.26; 同时他们也指出, 这一系数在全球范围的不确定水平大概是±30%。因此, 今后我们评估海域的海-气通量 (不包括河口区域) 时, 应该顺应这一潮流, 采用公式 (S.7) 计算海-气界面气体传输速率。

### 3.2.3 监测区域网格划分

为更科学计算监测区域的平均  $p\text{CO}_2$  和 CO<sub>2</sub> 通量, 把研究区域划分成均匀的网格。先计算网格内的平均值, 然后再计算监测区域所有网格的平均值。本部分规程建议采用 0.25°×0.25°、0.5°×0.5°或 1°×1°的网格。网格的划分要考虑监测区域的大小和监测站位 (或航线) 的疏密程度。网格太小, 则网格内的数据量可能太少, 影响不确定性评估, 而且空白网格率可能太大; 网格太大, 则网格数可能太小, 失去划分网格的意义。本部分规程建议按照网格里的数据数量≥4, 且空

空白网格率 $\leq 50\%$ 的原则划分网格。如果划分  $1 \times 1^\circ$  网格，空白网格率仍 $< 50\%$ ，则用  $1 \times 1^\circ$  的网格，不再增大网格。每个网格里的数据量 $\geq 4$  是分解不确定来源的误差评估的基本要求。尽管本部分规程不建议采用此方法，但未来遥感  $p\text{CO}_2$  业务化运行后该不确定性评估方法就成为可能。因此本部分规程留有与未来新方法衔接的余地。空白网格率 $< 50\%$ 是为保证监测区域的有效网格数量，提高通量评估的科学性。

### 3.2.4 网格化平均 $p\text{CO}_2$ 的不确定性评估

目前  $p\text{CO}_2$  网格化平均不确定性评估主要有两种方法，一种是标准偏差法；另一种是分解误差来源的方法，即把不确定性和误差分解成三部分：测定误差、空间变异和采样不足导致的误差(Wang et al., 2014)。从原理上，分解误差来源的方法更科学，然而这个方法除了待评估的监测数据，还需要一组高空间分辨率、高空间覆盖度的数据，例如模式或遥感  $p\text{CO}_2$  数据，用这组高空间覆盖度的数据评估空间变异。目前，模式或遥感  $p\text{CO}_2$  仍处于研究阶段，尚无成熟的产品，因此分解误差来源的不确定性评估方法在业务化运行中仍不能实现。因此，本部分采用标准偏差法评估  $p\text{CO}_2$  和  $\text{CO}_2$  通量的不确定性。

### 3.2.5 $p\text{CO}_2$ 不确定性到 $F\text{CO}_2$ 不确定性的传递公式的推导

把本部分规程文本的公式 (7) 带入公式 (4) 中，变形成公式 (S.8)。不考虑  $K_H$ 、 $\rho$  和  $S_c$  的不确定性； $C_2$  无误差，因此  $F\text{CO}_2$  的不确定性由  $\Delta p\text{CO}_2$  的不确定性和  $U_{10}$  的不确定性决定，误差传递的推导如下。

$$F\text{CO}_2 = \left[ \frac{0.266 \times C_2 \times 24 \times K_H^{\text{CO}_2} \times \rho}{1.01325 \times 100000 \times \sqrt{\frac{S_c}{660}}} \right] \times U_{10}^2 \times \Delta p\text{CO}_2 \quad (\text{S.8})$$

对公式 (S.8) 两边取自然对数，得公式 (S.9)，

$$\ln(F\text{CO}_2) = \ln \left[ \frac{0.266 \times C_2 \times 24 \times K_H^{\text{CO}_2} \times \rho}{1.01325 \times 100000 \times \sqrt{\frac{S_c}{660}}} \right] + 2\ln(U_{10}) \times \ln(\Delta p\text{CO}_2) \quad (\text{S.9})$$

将  $\ln(F\text{CO}_2)$  分别对  $U_{10}$  和  $\Delta p\text{CO}_2$  求一阶导数，有

$$\frac{\partial \ln(F\text{CO}_2)}{\partial U_{10}} = \frac{2}{U_{10}} \quad (\text{S.10})$$

$$\frac{\partial \ln(F\text{CO}_2)}{\partial \Delta p\text{CO}_2} = \frac{1}{\Delta p\text{CO}_2} \quad (\text{S.11})$$

因此， $FCO_2$  的标准偏差传递公式为

$$\delta FCO_2 = |FCO_2| \times \sqrt{\left(\frac{2 \times \delta U_{10}}{U_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta p CO_2}{\Delta p CO_2}\right)^2} \quad (S.12)$$

公式 S.12 即本部分规程文本中的公式 11。

### 3.2.6 非 10 米高度风速的转换

本部分规程采用海平面以上 10 米高度的风速 ( $U_{10}$ )。由于部分调查船的风速仪安装高度可能不是 10 米，因此需要把非 10 米高度转换成  $U_{10}$ 。编写组查阅了大量文献资料，发现不同高度测定的风速与  $U_{10}$  并非简单的线性关系。编写组经过比较，最终采用了陈永利等 (1989) 提出的不同高度、不同风速范围的转换系数，列在附录 A 中作为参考。

#### (三) 主要试验 (或验证) 的分析、综述，技术经济论证、预期的经济效果。

基于分压差的通量评估的海-气  $CO_2$  通量评估，包括监测区域网格化、海水  $pCO_2$  平均值和标准偏差计算、 $CO_2$  通量计算及不确定性传递等内容。目前国际上尚无统一的方法，主要原因是不同海区的情况千差万别。然而领域内有一定的共识，例如，基于海-气  $CO_2$  分压差的海-气  $CO_2$  通量计算的基本原理目前基本是全球通用的； $CO_2$  交换速率公式的选择也有一定的共识，Wanninkhof (1992) 在十几年前用得十分广泛，但近年来普遍认为 Ho et al. (2006) 和 Sweeney et al. (2007) 是较合理的。同时，也有未达到共识的内容，例如  $CO_2$  通量平均值的计算和误差评估目前无统一的方法。本部分规程根据  $CO_2$  通量评估所需的必要内容，总结目前已经基本达到共识的内容；对尚未达到共识的内容，本部分规程力求做到最合理。

在本部分规程草案稿的验证过程中，东海监测中心、海洋二所、海洋三所 3 家单位采用本部分规程的方法和模拟数据计算出相同的结果。三家单位都认为本部分规程采用的是目前行内通用的做法；通量计算考虑了用平均风速和瞬时风速两种情况；海水密度公式、 $CO_2$  溶解度系数等都采用行内普遍采用的公式，科学、合理，有效解决了监测单位的海-气  $CO_2$  通量数据处理的标准化和规范化问题，适合作为海洋监测单位和科研院所进行海-气  $CO_2$  通量监测与评估的通用方法。

根据验证单位的意见和建议修改后形成的征求意见稿在国内 20 家兄弟单位征求意见，意见回执总体情况良好，认为本部分规程能满足海-气  $CO_2$  通量监测

与评估的技术要求，可以规范海-气 CO<sub>2</sub> 交换通量的监测与评估。

本部分规程执行后，我国近海 CO<sub>2</sub> 通量评估在目前的水平可达到：（1）内部数据的统一；（2）与国际普遍认可的方法一致，或达到国际先进水平。

本部分规程是数据处理的技术规程，数据处理的整个过程都是可追溯的。如果未来领域内对相关内容的共识发生变化而与本部分规程推荐的方法不同，则可根据新的共识重新处理数据，而不影响结果的科学性。

#### （四）标准水平分析

目前海-气 CO<sub>2</sub> 通量无标准、规程或推荐的方法。本部分规程的编制参考了国际上近三十年海-气 CO<sub>2</sub> 通量的研究成果，总结归纳了目前的研究共识，并注重不同时期的研究动态，做到前后数据衔接，采用的是国际上目前最先进的概念和研究成果。

#### （五）与有关的现行法律、法规和标准的关系。

本部分规程与现行的法律、法规和标准无相悖之处。

#### （六）重大分歧意见的处理经过和依据。

无。

#### （七）标准作为强制性或推荐性国家（或行业）标准的建议。

建议作为推荐型行业标准。

#### （八）贯彻该标准的要求和措施建议

组织培训班宣讲；到各海洋环境监测中心（站）做现场指导。

开发自动计算和评估软件，并派人到各业务单位进行安装和培训等。

#### （九）废止现行有关标准的建议。

无。

#### （十）其他应予说明的事项。

本部分规程的编制得到原国家海洋局全球变化与海-气相互作用专项（GASI-03-01-02-02）、国家重大科学研究计划（2015CB954001）和海洋公益项目（201505003-3）的资助。

## 参考文献

- Ho D.T., Law C.S., Smith M.J., Schlosser P., Harvey M. and Hill P., 2006. 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.
- Jiang L.Q., Cai W.-J., Wanninkhof R., Wang Y.C. and Luger H., 2008. Air-sea CO<sub>2</sub> fluxes on the US South Atlantic Bight: Spatial and seasonal variability. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 113(C7): C07019, doi:10.1029/2007JC004366.
- Liss P.S. and Merlivat L., 1986. 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, pp. 113-129.
- McGillis W.R., Edson J.B., Zappa C.J., Ware J.D., McKenna S.P., Terray E.A., Hare J.E., Fairall C.W., Drennan W., Donelan M., DeGrandpre M.D., Wanninkhof R. and Feely R.A., 2004. Air-sea CO<sub>2</sub> exchange in the equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 109(C8): C08S02, doi:10.1029/2003JC002256.
- Millero F., *Chemical Oceanography (4th Edition)*, CRC Press, Taylor & Francis Group, International Standard Book Number-13: 978-1-4665-1255-9 (eBook - PDF), 2013.
- Millero F.J. and Poisson A., 1981. International one-atmosphere equation of state of seawater. *Deep-Sea Research Part A-Oceanographic Research Papers*, 28(6): 625-629.
- Nightingale P.D., Malin G., Law C.S., Watson A.J., Liss P.S., Liddicoat M.I., Boutin J. and Upstill-Goddard R.C., 2000. In situ evaluation of air-sea gas exchange parameterizations using novel conservative and volatile tracers. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(1): 373-387.
- Sheu D.D., Chou W.-C., Wei C.-L., Hou W.-P., Wong G.T.F. and Hsu C.-W., 2010. Influence of El Nino the sea-to-air CO<sub>2</sub> flux at the SEATS time-series site, northern South China Sea. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 115: C10021, doi:10.1029/2009JC006013.
- Sweeney C., Gloor, E., Jacobson A.R., Key R.M., McKinley G., Sarmiento J.L. and Wanninkhof R., 2007. 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.
- Takahashi T., Sutherland S.C., Wanninkhof R., Sweeney C., Feely R.A., Chipman D.W., Hales B., Friederich G., Chavez F., Sabine C., Watson A., Bakker D.C.E., Schuster U., Metzl N., Yoshikawa-Inoue H., Ishii M., Midorikawa T., Nojiri Y., Kortzinger A., Steinhoff T., Hoppema M., Olafsson J., Arnarson T.S., Tilbrook B., Johannessen T., Olsen A., Bellerby R., Wong C.S., Delille B., Bates N.R. and de Baar H.J.W., 2009. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO<sub>2</sub>, and net sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans. *Deep-Sea Research II*, 56(8-10): 554-577.
- Tseng C.M., Wong G.T.F., Chou W.C., Lee B.S., Sheu D.D. and Liu K.K., 2007. Temporal variations in the carbonate system in the upper layer at the SEATS station. *Deep-Sea Research II*, 54: 1448-1468.
- Wang G., Dai M., Shen S.S.P., Bai Y. and Xu Y., 2014. Quantifying uncertainty sources in the gridded data of sea surface CO<sub>2</sub> partial pressure. *Journal of Geophysical Research*, 119(8): 5181-5189.
- Wanninkhof R., 1992. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal*

- of Geophysical Research, 97(C05): 7373-7382.
- Wanninkhof R., 2014, Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnology and Oceanography-Methods* 12, 351-362.
- Wanninkhof R., Asher W.E., Ho D.T., Sweeney C. and McGillis W.R., 2009. Advances in quantifying air-sea gas exchange and environmental forcing, *Annual Review of Marine Science*. *Annual Review of Marine Science*, pp. 213-244.
- 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.
- Wanninkhof R. and McGillis W.R., 1999. A cubic relationship between air-sea CO<sub>2</sub> exchange and wind speed. *Geophysical Research Letters*, 26(13): 1889-1892.
- Weiss R.F., 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry*, 2: 203-215.
- Zappa C.J., Asher W.E., Jessup A.T., Klinke J. and Long S.R., 2004. Microbreaking and the enhancement of air-water transfer velocity. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 109(C8): C08S16, doi:10.1029/2003JC001897.
- Zhao D.L. and Xie L., 2010. A practical bi-parameter formula of gas transfer velocity depending on wave states. *Journal of Oceanography*, 66: 663-671.