

SST 产品误差在海-气 CO₂ 通量计算中的 传递及贡献分析*

窦文洁¹ 蒋锦刚¹ 周 斌¹ 于之锋¹ 白 雁² 何贤强²

(1. 杭州师范大学遥感与地球科学研究院 杭州 311121; 2. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室
国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012)

提要 海-气界面 CO₂ 通量的估算对于碳的生物地球化学循环和全球气候变化等研究具有重要的意义, 利用遥感手段是进行全球尺度海表面碳通量估算的唯一手段, 但是由于不确定性的存在限制了海-气界面 CO₂ 通量遥感估算产品在决策应用上的可靠性。本文通过建立海-气界面 CO₂ 通量直接控制参量(气体交换速率 k 、海表面 CO₂ 溶解度 S 和海表面 CO₂ 分压 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$)误差结构图, 以通量估算的主要影响因子——海表温度(SST)为例, 建立了 SST 在通量计算中的误差传递流程图, 并采用 Monte Carlo 方法模拟了 SST 误差在通量计算中的传递规律和对最终误差的贡献。结果表明在遥感 SST 误差为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 并为正态分布的假设下, 误差在 k 、 S 计算中的传递为指数分布和近似指数分布, 而在 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 模型计算中为正态分布, 最终在通量 F_{CO_2} 中的传递为指数分布; 在大气 CO₂ 分压为固定值 $370\mu\text{atm}$ 的情况下, SST 对最终的通量结果带来的误差为 $\pm 1.2\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 左右。本文以 SST 为例, 提供了一种通量计算中遥感参数误差传递和贡献的计算方法, 可以为其它遥感获取的参量提供分析依据和参考。

关键词 海-气 CO₂ 通量; 遥感测量; 海表温度(SST); 误差传递; Monte Carlo 模拟
中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyhz20121107001

随着人类社会的发展, 特别是 19 世纪中叶的工业化以来, 人类活动向大气排放的 CO₂ 不断增加, 预计在未来的 100 年里, 大气 CO₂ 浓度还将不断升高达到当今的 2 倍(马红亮等, 2008)。由“温室效应”导致的冰雪融化、海平面上升等一系列变化将会对生态系统和人类的生存发展带来深远的影响。

海洋和大气之间的互动是非常紧密的。研究表明, 人类每年产生的 CO₂ 约有一半停留在大气中, 而大约 40% 被海洋所吸收; 海洋圈含碳量为大气圈的 50 倍和生物圈的 20 倍(张远辉等, 2000; 陈立奇等, 2008), 因此海洋是一个强大的碳库。研究 CO₂ 在海洋和大气之间的转移已经成为当今国际气候和海洋

科学研究前沿领域的重要内容。

国际上利用 CO₂ 分压差法研究海-气界面 CO₂ 通量的方法主要为现场测量技术, 数据采集方式虽真实性强, 但是具有操作繁琐, 测定时间长, 覆盖率低, 不能满足大范围测区监测的需求等不足。遥感技术具有成本低、大范围同步观测且数据获取量大等优点, 已逐渐成为海-气界面 CO₂ 通量计算的新手段。

由于遥感测量属于间接测量, 基于遥感估算海-气 CO₂ 通量的精度一直受到关注。Rangama 等(2005) 用卫星数据计算了南大洋 $45^\circ\text{--}60^\circ\text{S}$, $125^\circ\text{--}205^\circ\text{E}$ 之间海域的年度碳通量, 与 Takahashi 等(2002)通过气象数据得到的碳通量比较误差达到 38%; Cosca 等

* 海洋公益性行业科研专项经费项目, “中国近海海-气二氧化碳通量遥感监测评估系统研究与示范”, 200905012-07 号; “海洋环境要素水色遥感技术与应用示范”, 201005030-06 号; 国家自然科学基金项目, 40971193 号, 41206169 号。窦文洁, 助教, E-mail: douwenjie2002@163.com

通讯作者: 周斌, 教授, E-mail: hznu_bzhou@126.com

收稿日期: 2012-11-07, 收修改稿日期: 2013-01-26

(2003)通过 10 年的实测数据建立 $p\text{CO}_{2\text{sw}}\text{-SST}$ 关系,并与卫星遥感 SST 数据进行耦合,计算出 1985—2001 赤道太平洋 10°N 到 10°S, 95°W 到 165°E 之间海域的季节和年际碳通量,平均误差为(0.3±0.1)pgC/yr。

本文通过分析通量计算中各参量的精度影响因素,对三个主要的参量(气体交换系数 k 、溶解度 S 和表层海水 CO₂ 分压 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$)分别建立了误差结构框架图,以影响这三个参量的公共因子——海表面温度 SST 为例,通过 Monte Carlo 方法模拟 SST 遥感产品误差在通量计算过程中的传递规律及贡献性。此研究思路和方法可为后期研究其它因素,如叶绿素或者风速等因子的遥感产品误差传递和贡献提供理论参考。

1 研究方法及其过程

海-气界面 CO₂ 分压差法一般采用 Wanninkhof (1992)估算公式:

$$F_{\text{CO}_2} = kS(p\text{CO}_{2\text{sw}} - p\text{CO}_{2\text{air}}) \quad (1)$$

式中: F_{CO_2} 表示海-气界面 CO₂ 通量值[单位: mmol(m²·d)], k 为 CO₂ 气体迁移速率(单位: cm/h), S 为 CO₂ 在海水中的溶解度[单位: mol/(kg·atm)], $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 为海表面 CO₂ 分压(单位: atm), $p\text{CO}_{2\text{air}}$ 为大气 CO₂ 分压(单位: atm), $\Delta p\text{CO}_2(p\text{CO}_{2\text{sw}} - p\text{CO}_{2\text{air}})$ 为大气和海表面 CO₂ 分压差。正的通量值表示净 CO₂ 交换是从水体进入大气,负的则表示净 CO₂ 交换为大气进入水体(Zhai *et al.*, 2007; Zhai *et al.*, 2009),海洋分别表现为 CO₂ 的源和汇。

本文通过分析参量 k 、 S 、 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 和 $p\text{CO}_{2\text{air}}$ 的参数化方法,建立各参量在参数化过程中的误差传递结构框架图,并找出可以通过遥感准确获取的因子,利用 Monte Carlo 模拟遥感产品误差在通量计算过程中的传递规律及对通量误差的贡献性。

1.1 参数化过程分析及误差框架的构建

1.1.1 k 参数化过程及误差框架的构建 k 为海-气交换系数,其引入的误差被认为是通量计算中最主要的误差源。 k 的控制因素很多,在海-气界面的表现为一些受风场影响的物理过程,如表面湍流、海表面风浪以及气泡等(Bock *et al.*, 1999)。因此,对 k 进行参数化时,在原则上应该考虑以上所有的过程,但是由于这些影响因素的数据有限或难以获取,同时一些实验证明了风速和气体传输之间有显著的关系,所以风速和气体传输之间的关系得到广泛的应用(Wanninkhof, 1992)。由于不同模型建立时利用的风

速、气体传输等数据的测量存在着差异,得到了许多不同的模型(Liss *et al.*, 1986; Tans *et al.*, 1990; Wanninkhof, 1992; Erik *et al.*, 1999; Wanninkhof, 1999; Wanninkhof *et al.*, 1999; Nightingale *et al.*, 2000; Sweeney *et al.*, 2007; Else *et al.*, 2008)。 k 模型应用的一般模式为:

$$k = AU_{10m}^B (Sc / 660)^{-n} \quad (2)$$

其中 U_{10m} 为海面以上 10m 处的风速; Sc 为 Schmidt 系数; 660 是 20°C 时海水的 Sc , 为 SST 的函数(Wanninkhof, 1992), 表达式为:

$$Sc = A' - B't + C't^2 - D't^3 \quad (3)$$

其中 t 为摄氏温度(单位: °C)

对于海水中的 CO₂: $A'=2073.1$, $B'=125.62$, $C'=3.6276$, $D'=0.043219$

在 k 的参数化模型中,风速 U_{10m} 和 SST 都可以通过遥感测量方法获取,而常数 A 、 B 和 n 通过经验的方法获得。因此除模型本身不确定性之外(如控制因素单一等),常数 A 、 B 和 n 在拟合获取的过程中也会引入一定的不确定性,并在一些研究中得到定量分析(Liss *et al.*, 1986; Wanninkhof, 1992; Sweeney, 2007)。 U_{10m} 和 SST 的数据源精度也对 k 值的精确性有决定性的影响,而遥感获取的 U_{10m} 和 SST 数据的准确性受到传感器精度和反演模型精度等的影响。由此作者建立气体传输速率 k 的参数化误差结构框架如图 1a 所示。

1.1.2 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 参数化过程及误差框架的构建 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 受到诸多因素影响,如 SST、CDOM、浮游植物(Chl- a)及混合层厚度 MLD 等,在现已发表的相关文献中,研究者根据不同的数据特点,已经形成许多单变量或多变量的估算模型。但利用 SST 作为 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 唯一变量用于基于遥感测量估算 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 的模型居多(Stephens *et al.*, 1995; Hood *et al.*, 1999; Nelson *et al.*, 2001; Olsen *et al.*, 2004; Else *et al.*, 2008; 许苏清, 2008),且相关性基本保持在 0.8—0.9 之间。研究表明,在寡营养盐的大洋及海盆区域, $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 的主要受控因子为 SST(王郝京, 2001), SST 可以较准确的单独用于估算 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ (Else *et al.*, 2008)。但是随着研究的深入,越来越多的研究为了更全面的体现 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 的影响因素,得到精度更高的参数化结果,在模型中引入的控制参量也越来越丰富,如加入体现生物作用的叶绿素 a 、混合层厚度 MLD 等(Chierici *et al.*, 2009)。

$p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 参数化误差包括模型本身缺陷导致的误差及控制因子数据来源误差两部分。模型本身缺陷主要是由于控制因子多样但选择的有限性,控制因素

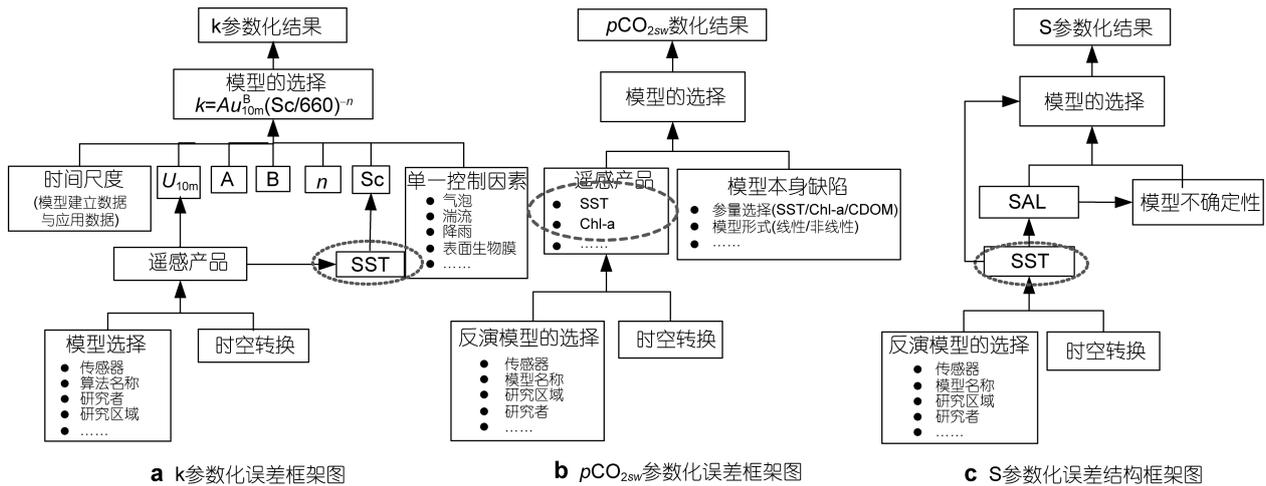


图 1 F_{CO_2} 的三个主要计算参数(k 、 S 、 pCO_{2sw})误差结构图

Fig.1 Error sources framework of k , S and pCO_{2sw}

的季节变化性(如可代表生物作用的 Chl a 的季节性选择), 模型形式(线性/非线性)的不确定性等导致的。在数据源方面, Chl a 和 SST 都可通过遥感的方式获取, 数据准确性同样受到传感器精度、反演模型精度以及数据的时空转换等的影响。由此作者可得 pCO_{2sw} 的参数化误差结构框架如图 1b 所示。

(1) CO_2 溶解度 S 参数化过程及误差框架的构建

CO_2 溶解度 S 一般表示为 SST(公式中简称为 T) 和盐度值 SAL 的函数(Weiss, 1974), 表达式为:

$$Ln(S) = A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100) + SAL[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] \quad (4)$$

其中, T 单位为 K 。

$$A_1 = -60.2409, A_2 = 93.4517, A_3 = 23.3585, B_1 = 0.023517, B_2 = -0.023656, B_3 = 0.0047036$$

由公式可以看出, 其控制因素主要为海表面温度 SST 与盐度 SAL。若要实现遥感对溶解度 S 测量, 除 SST 外, 作者还需要解决 SAL 数据的遥感获取。目前通过遥感的方式获取 SAL 数据可靠性和稳定性较差。在一些研究中发现 SST 和 SAL 之间有很好的线性相关性(Else *et al*, 2008), 所以本文主要考虑 S 计算中的误差来源之一: SST 遥感数据获取误差的传递, 以及 SST 与 SAL 之间拟合关系的不确定性而引入的误差, 误差结构框架如图 1c 所示。

(2) pCO_{2air} 参数化过程及误差框架的构建

目前, 基于遥感测量海-气界面 CO_2 通量的研究中, 利用遥感数据反演获取 pCO_{2air} 的研究尚未成熟, 不能通过遥感手段获取准确、可靠的数据。在已开展的研究中, 大部分采用现场测量数据或者利用大气

本底站和大气化学环流模型结合的模型数据, 最早则是采用研究区域临近的 NOAA 大气本底站观测的 CO_2 数据, 认为 pCO_{2air} 变化不大, 在整个海域均使用同一个大气数据, 因此在本研究中作者将 pCO_{2air} 作为固定值($370\mu atm$)分析(Takahashi *et al*, 2008)。

1.2 SST 与 k 、 S 和 pCO_{2sw} 之间的关系分析

通过以上 k 、 S 和 pCO_{2sw} 的误差结构框架图发现, 在各参量的计算中都涉及一个共同的影响因子——海表面温度 SST, 在此作者将其提取, 简化 SST 与三者之间的关系。

(1) SST- k 关系分析

目前海-气气体交换速率计算以 Wanninkhof (1992)模式(简称 W92)最为普遍, 由于此参数化模型适合用于稳定风速、船只定点风速测量等气体传输的推断, 并适合应用于利用散射计和辐射计反演得到的风速的气体传输推断(Wanninkhof, 1992), 所以在此分析中作者选择 W92 模型。表达式为:

$$k = 0.31u_{10m}^2 (Sc / 660)^{-1/2} \quad (5)$$

Sc 表现为 SST 的函数(式(3)), 因此 SST 和 k 是通过 Sc 建立的一种间接关系。图 1a 中 k 的误差框架图表明 k 参数化误差源丰富, 在此将除 SST 外其它的一切控制因素的不确定性统一为一个量, 定义为 k_{un} , 即 k 值精度的最终影响因子为 SST 和 k_{un} (图 2a)。

(2) SST- pCO_{2sw} 关系分析

根据 2.1 中的分析, 在主要的海盆区域 SST 可以较准确的单独用于估算 pCO_{2sw} 。在此作者选择 SST 作为唯一影响因子对 pCO_{2sw} 进行参数化, 选用 Else(2008)在加拿大哈德逊湾的研究中利用 MODIS

SST 数据建立的模型:

$$pCO_{2sw} = 15.0T + 280.7 \quad r^2 = 0.89 \quad RMS = \pm 13 \mu atm \quad (6)$$

其中 T 单位为 k 。

将图 1b 中除 SST 外其它一切 pCO_{2sw} 误差来源统一为模型缺陷误差 pCO_{2sw}^{un} , 即 pCO_{2sw} 精度最终的影响因子为 SST 和 pCO_{2sw}^{un} (图 2b)。

(3) SST-S 关系分析

S 作为 SST 和 SAL 的函数, 在海-气界面 CO₂ 通量研究中的计算方法较统一(式(4)), 并且 SST 与 SAL 之间存在较高的相关性。本文选用 Else(2008) SAL 计算公式:

$$SAL = -0.86T + 33.2 \quad r^2 = 0.76 \quad RMS = \pm 1 PSU \quad (7)$$

其中 T 单位为 k 。

因此, 作者可以将溶解度 S 表达式(式(4))表示为 SST 为唯一变量的函数:

$$Ln(S) = A_1 + A_2(100/T) + A_3Ln(T/100) + (-0.86T + 33.2)[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] \quad (8)$$

同样, 作者将 S 参数化中除 SST 外其它的一切误差源都定义为 S_{un} 。因此, S 精度最终的影响因子为 SST 和 S_{un} (图 2c)。

1.3 Monte Carlo 模拟

基于以上分析, 根据 Wanninkhof(1992)提供的通量计算公式(式(1)), 最终建立 SST 误差传递流程(图 3), 其中选定模型见表 1。MODIS 数据反演 SST 值在东海最大的误差表现为 $\pm 0.5^\circ C$ (郑嘉淦, 2006), 作者以此为遥感 SST 数据误差依据。同时假设风速变化范围为 1—15m/s (苏纪兰, 2005), 并假设其符合正态分布且对各参量因子影响相互独立。为了最大限度提高模拟精度, 设定的随即发生器个数为 1×10^6 个, 基于 MATLAB2009a 软件, 利用 Monte Carlo 分析 SST

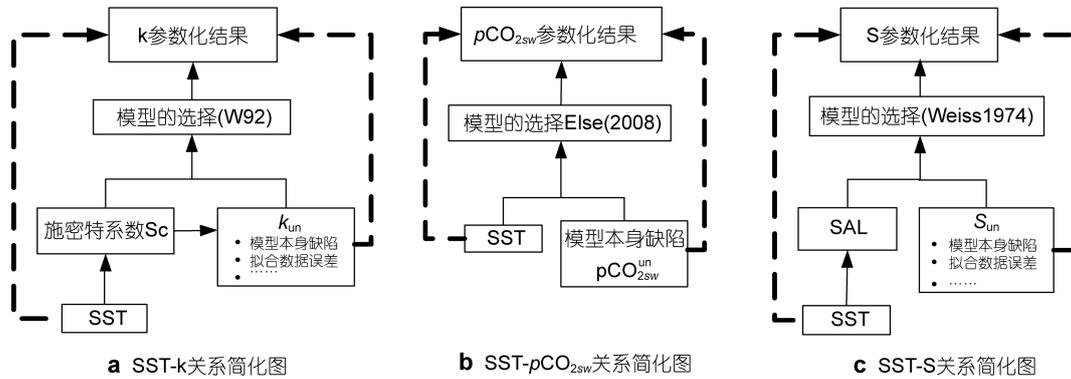


图 2 k 、 S 、 pCO_{2sw} 与 SST 关系图

Fig.2 The relationships of SST with three parameters (k , S , pCO_{2sw})

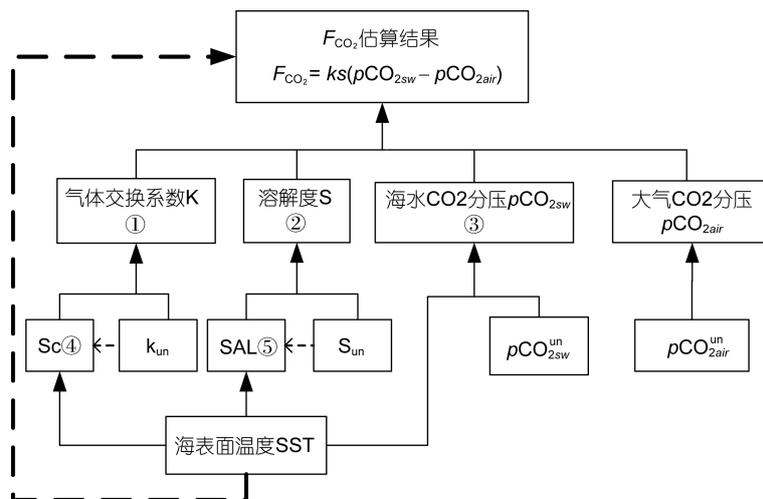


图 3 SST 建模流程图

Fig.3 Transmission flow of SST error in the calculation of F_{CO_2}

表 1 SST 误差在通量计算中的传递模拟所用公式
Tab.1 Equations used in the simulation for the error transmission of SST

序号	公式	参考文献
	$k = 0.31u_{10m}^2 (Sc / 660)^{-1/2}$	Wanninkhof, 1992
	$Ln(S) = A_1 + A_2(100/T) + A_3Ln(T/100) + SAL[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2]$	Weiss, 1974
	$pCO_{2sw} = 15.0T + 280.7$	Else, 2008
	$Sc = A - Bt + Ct^2 - Dt^3$ ($A = 2073.1, B = 125.62, C = 3.6276, D = 0.043219$)	Wanninkhof, 1992
	$SAL = -0.86t + 33.2$	Else, 2008

注: t 单位: $^{\circ}C$; T 单位: $K, T = t + 273.15$

遥感反演数据误差在海-气界面 CO_2 通量遥感估算中的传递模式及对通量误差的贡献。

2 模拟结果与分析

图 4 为 SST 遥感产品误差在 k 、 S 、 pCO_{2sw} 参数化过程中的误差传递规律模拟结果, 以及在最后通量 F_{CO_2} 估算中的误差传递表现。可以看出, SST 误差经过所选模型的传递, 在 k 参数化结果中的是一种明

显的双边指数分布(图 4a), 在 S 参数化结果中是一种近似的双边指数分布(图 4b), 由于作者选择了简单的 pCO_{2sw} 参数化线性模型, 在其结果中 SST 误差的分布为标准的正态分布(图 4c)。这种分布结果会根据作者所选模型的不同在表现上会有所差异。SST 误差通过 k 、 S 、和 pCO_{2sw} 等多个参数化模型的综合传递, 最后体现在 F_{CO_2} 中的是双边指数分布的形式(图 4d)。为了验证模拟结果, 作者进行了正态分布概率检验(图

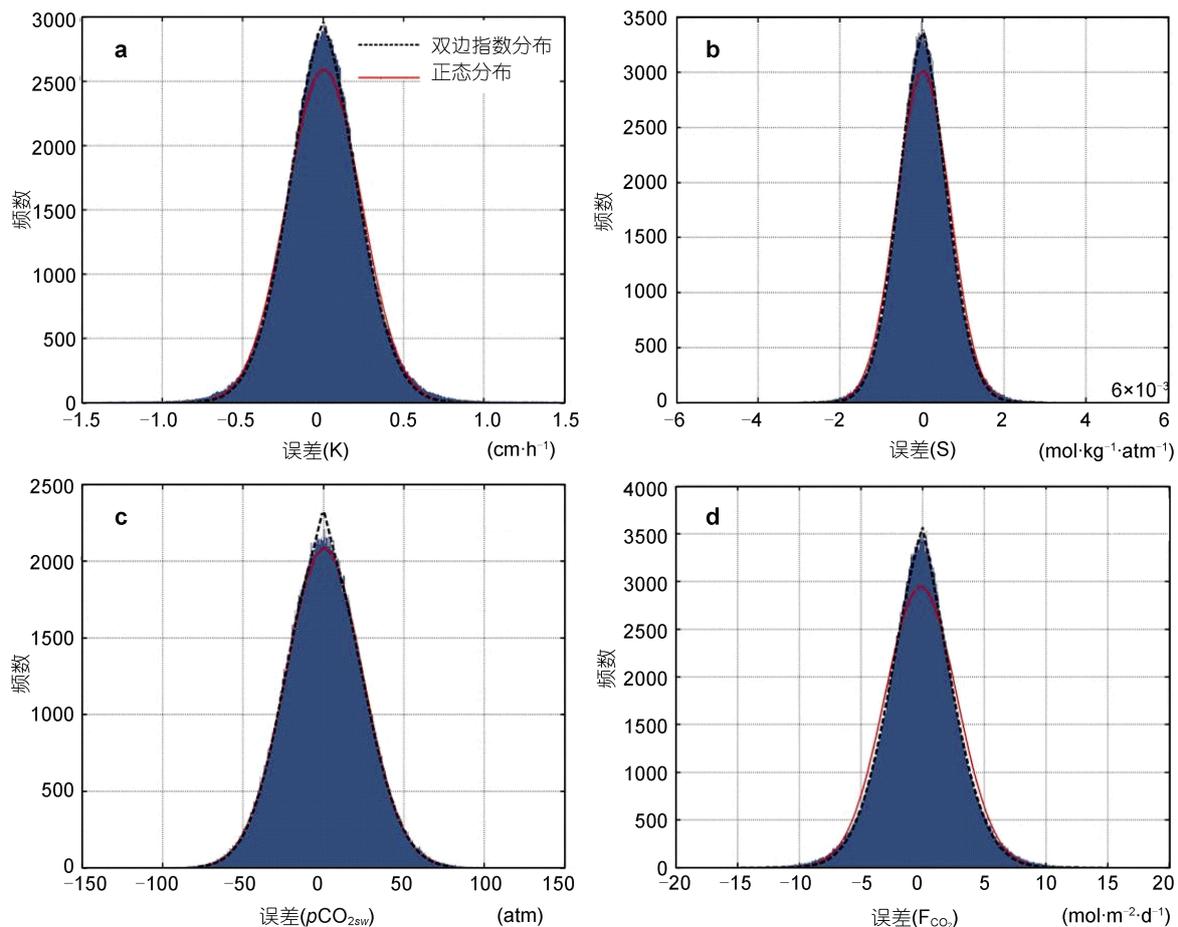


图 4 SST 对 k 、 S 、 pCO_{2sw} 的误差传递模拟频率分布直方图

Fig.4 Frequency histogram of simulation for SST error transmission in the calculation of k , S , pCO_{2sw} and F_{CO_2}

5), 其中 SST 误差在 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 参数化结果中的分布(蓝色实线)与理论正态分布(红色虚线)吻合度最强(图 5c), 因此验证了其作为标准的正态分布; 而对于 SST 误差在其它两个参数(k , 图 5a; S , 图 5b)及通量 F_{CO_2} (图 5d)中的分布与标准正态分布有不同程度的差异, 这种差异一方面说明这种分布为非正态分布, 同时不同的差异表现也表明了对某一种分布的趋向程度, 这也同样很好的验证了作者的模拟结果。

作者对 SST 误差在各个参数估算过程中传递的误差均值和标准差做了统计(表 2), 其中标准差即为 SST 误差对各个参数的误差贡献。即当 SST 是计算 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 的唯一因子, 且认为 $p\text{CO}_{2\text{sw}} = f(SST)$ 成立时, SST 误差对 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 参数化误差贡献最大, 达到 $\pm 7.5\mu\text{atm}$ 左右; 而对于 Wanninkhof(1992) k 值参数化公式, SST 对 k 引入的误差可能达到 $\pm 0.23\text{cm/h}$; 同样的, 若根据 Else(2008), 将盐度 SAL 表示为 SST 的函数, 根据 Weiss(1974) S 表达式, SST 误差会对 S 有微小的误差贡献, 保持在 $\pm 5.7 \times 10^{-4}\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{atm})$ 左右;

$\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的 SST 误差通过各个参数化模型的传递, 至 F_{CO_2} 结果误差表现为 $\pm 1.2044\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。同样, 这些贡献值会根据作者所选模型的不同而有不同的表现, 但是这种放大效应会必定存在。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文是在假设 SST 作为单一因子能够准确计算 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 时, 对 SST 遥感产品误差在海-气界面 CO₂ 通量估算过程中的传递性和贡献性展开了分析和讨论。在不同的研究区域, $p\text{CO}_{2\text{sw}} = f(SST)$ 的误差表现迥异, 导致 SST 的误差对最后通量误差的贡献也会有很大的差异; 且目前的研究中 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 参数化模型的不确定性也被认为是一个重要的误差源, 并且已经发展了大量的、复杂的 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 参数化模型, 但是 SST 在各种模型中都有考虑, 因此其遥感产品误差对通量的影响也会存在。本文提供的研究思路更加适用于特定区域的研究。而基于遥感测量的海-气界面 CO₂ 通

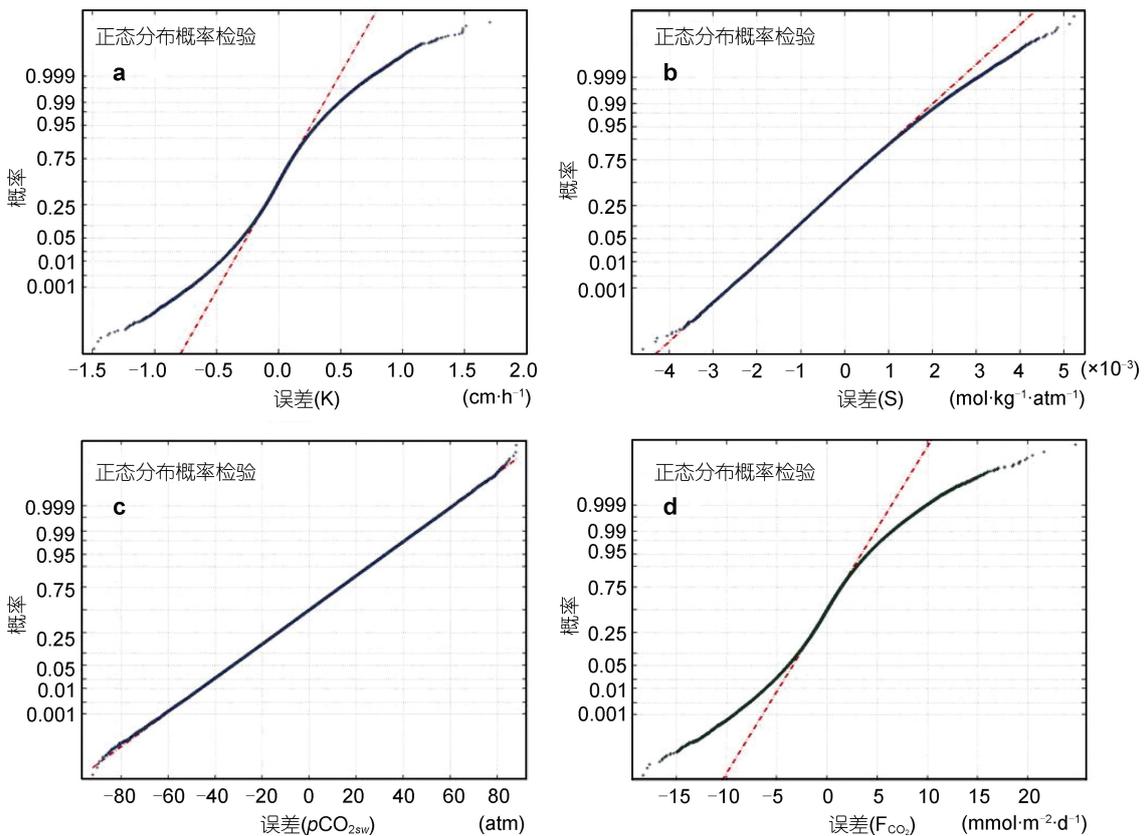


图 5 SST 对 k 、 S 、 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 的误差传递正态分布概率检验图

Fig.5 Normal distribution probability examination of SST error transmission in the calculation of k , S , $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ and F_{CO_2}

表 2 Monte Carlo 模拟 SST 误差在 k 、 S 、 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 及 F_{CO_2} 参数化中误差的贡献

Tab.2 Contribution of SST error to the parameterization of k , S , $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ and F_{CO_2}

参量	误差均值	标准差
k	5.7821×10^{-4}	± 0.2309
S	5.5928×10^{-5}	$\pm 5.7602 \times 10^{-4}$
$p\text{CO}_{2\text{sw}}$	0.0040	± 7.4964
F_{CO_2}	0.0029	± 1.2044

量估算不确定性研究中, 各种经验模型的建立引入的不确定性被认为是最重要的, 这也是作者以后的重点研究方向和内容。

SST 误差对气体交换系数 k 的贡献为 $\pm 0.23 \text{ cm/h}$, 同时 k 估算引入的误差被认为是基于遥感监测海-气碳通量中的最重要的误差源, 这种误差来源已经证明主要来源于参数化模型本身的不确定性, 但是在已经发展的各种模型中, Schmidt 系数为 k 估算中用以归一化处理的重要的参数, 所以 SST 误差通过 S_c 的传递必将影响众多 k 参数化模型的精度。

海表面碳通量交换过程是一个非常复杂的过程, 众多科学研究和建模过程都试图从不同角度来描述这个过程, 如经典的海气分压差 CO_2 通量计算模型。在理论情况下, 建模估算考虑的因素越多、不同因素间相互作用机理描述得越清楚, 其模型的精度就越高。随着观测技术和手段的多样化, 基于实测数据的通量计算模型和基于遥感估算的通量模型成为了目前研究区域和全球海洋碳通量的两个重要手段。实测数据具有建模参数获取完整、数据精度高的特点, 遥感数据具有大区域和全球性的特点。随着遥感探测技术的不断进步, 利用遥感手段进行碳通量观测和规律分析必然越来越受重视。

利用遥感手段进行碳通量观测时需要面临如下两个突出问题: (1) 建模多参数难以遥感同时获取, 给建模过程带来困难; (2) 不同遥感数据误差特征参差不齐, 给反演结果带来更多的不确定性。

为了解决上述两个问题, 目前众多学者都采用了 SST 单因子进行通量估算, 事件证明该方法在大洋开阔水体的精度也得到验证。此外, SST 是可遥感参量中精度相对较高、较稳定的产品, 对于后续的业务化及规律分析都能得到参数一致性的保证。

当然, 对于其它的遥感参量, 如 $\text{Chl } a$ 、 $U_{10\text{m}}$ 、 CDOM 等, 遥感产品的误差分析同样可以采取本文思想, 因此能够实现所有可遥感参量误差在通量产

品中的误差积累的分析, 这也是作者后期在结合已发展的、成熟的各参量模型来研究基于遥感监测的海-气界面 CO_2 通量精度评价的方向, 从而实现通量产品精度评价, 为产品发布提供服务。

3.2 结论

研究遥感产品误差对基于遥感估算海-气界面 CO_2 通量估算不确定性的影响, 是碳通量产品的质量评价及评价、决策利用等的非常重要的工作。本文从海-气界面 CO_2 通量各控制因素(特别是 k 、 S 和 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$) 的参数化过程出发, 分析并建立了各控制因素的误差框架图, 以 MODIS SST(误差表现为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 且为正态分布)为例, 风速为 $1\text{--}15 \text{ m/s}$, 大气 CO_2 分压数据为固定值 ($370 \mu\text{atm}$) 的情况下, 并在 SST 造成的误差都是相互独立的假设前提下, 通过 Monte Carlo 模拟, 得到了 SST 误差经过模型传递给 k 、 S 和 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 三个参数时的规律分别为指数分布、近似指数分布和正态分布传递; 在寡营养盐大洋及海盆区域, 认为 SST 为 $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ 的唯一控制因子, 即 $p\text{CO}_{2\text{sw}} = f(\text{SST})$ 成立时, 由遥感 SST 误差引起的通量误差可能为 $\pm 1.2 \text{ mmol} (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 左右, 即具有明显的放大效应。

本文从单一终端控制因子(SST)出发, 将其它的误差源定义为统一量, 以此分析选定因子误差的传递规律和贡献性, 具有显著的优点, 即分析因素单一, 便于模拟; 可以将其它的不确定因素进行整合, 将包含所有的已知和未知的误差源, 所以最终能够表现 SST 完整的误差传递性和贡献性; SST 作为主要的原始控制参量之一, 对遥感在通量计算中的精度表现具有很好的代表性, 同时可以为后期的其它遥感数据产品的误差传递及贡献分析提供思想依据。

参 考 文 献

- 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 2008. 大气中 CO_2 浓度的变化和影响研究. 环境科学与技术, 31(12B): 7—12
- 王郝京, 2011. 大洋海区海-气 CO_2 通量单参数遥感算法的适用性检验. 台湾海峡, 30(2): 286—291
- 许苏清, 2008. 利用现场和卫星遥感数据估算南大洋碳通量. 厦门: 厦门大学博士学位论文, 18—21
- 苏纪兰, 2005. 中国近海水文. 第 1 版. 北京: 海洋出版社, 99—114
- 张远辉, 王伟强, 陈立奇, 2000. 海洋二氧化碳的研究进展. 地球科学进展, 15(5): 559—564
- 陈立奇, 杨绪林, 张远辉等, 2009. 海洋-大气二氧化碳通量的观测技术. 海洋技术, 27(4): 9—12
- 郑嘉淦, 李继龙, 杨文波, 2006. 利用 MODIS 遥感数据反演东海海域海表温度的研究. 海洋渔业, 28(2): 141—146

- 鲁中明, 戴民汉, 2006. 海-气 CO₂ 通量与涡动相关法应用研究进展. *地球科学进展*, 21(10): 1046—1057
- Bock E J, Hara T, Frew N M *et al*, 1999. Relationship between air-sea gas transfer and short wind waves. *Journal of Geophysical Research*, 104: 25821—25831
- Chierici M, Olsen A, Johannessen T *et al*, 2009. Algorithms to estimate the carbon dioxide uptake in the northern North Atlantic using shipboard observations, satellite and ocean analysis data. *Deep-Sea Research II*, 56: 630—639
- Cosca C E, Feely R A, Boutin J *et al*, 2003. Seasonal and interannual CO₂ fluxes for the central and eastern equatorial Pacific Ocean as determined from *f*CO₂-SST relationships. *Journal of Geophysical Research*, 108(C8): 3278, doi: 10.1029/2000JC000677
- Else B G T, Yackel J J, Papakyriakou T N, 2008. Application of satellite remote sensing techniques for estimating air-sea CO₂ fluxes in Hudson Bay, Canada during the ice-free season. *Remote Sensing of Environment*, 112: 3550—3562
- Hood E M, Merlivat L, Johannessen T, 1999. Variations of *f*CO₂ and air-sea flux of CO₂ in the Greenland Sea gyre using high-frequency time series data from CARIOCA drift buoys. *Journal of Geophysical Research*, 104(C9): 20571—20583
- Liss P S, Merlivat L, 1986. Air-sea Gas Exchange Rates: Introduction and Synthesis. In: *The Role of Air-sea Exchange in Geochemical Cycling*, Hingham: edited by P. Buat-Menard, D. Riedel, 113—129
- Nelson N B, Bates N, Siegel D A *et al*, 2001. Spatial variability of the CO₂ sink in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Research*, 48: 1801—1821
- Nightingale P D, Malin G, Law CS *et al*, 2000. *In situ* evaluation of air-sea gas exchange parameterizations using novel conservative and volatile tracers. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(1): 373—387
- Olsen A, Triñanes J A, Wanninkhof R, 2004. Sea-air flux of CO₂ in the Caribbean Sea estimated using in situ and remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 89: 309—325
- Rangama Y, Boutin J, Etcheto J *et al*, 2005. Variability of the net air-sea CO₂ flux inferred from shipboard and satellite measurements in the Southern Ocean south of Tasmania and New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 110: C09005
- Stephens M P, Samuels G, Olson D B *et al*, 1995. Sea-air flux of CO₂ in the North Pacific using shipboard and satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 100(C7): 13571—13583
- Sweeney C, Gloor E, Jacobson A R *et al*, 2007. Constraining global air-sea gas exchange for CO₂ with recent bomb ¹⁴C measurements. *Globe Biogeochemical*, 21: 2015
- Takahashi T, Sutherland S C, 2008. Global Ocean Surface Water Partial Pressure of CO₂ Database: Measurements Performed During 1968—2007 (Version 2007). ORNL/CDIAC-152. NDP-088a. Carbon Dioxide Information Analysis Center
- Takahashi T, Sutherland S C, Sweeney C *et al*, 2002. Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean *p*CO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Research*, 49: 1601—1622
- Tans P P, Fung I Y, Takahashi T, 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 247: 1431—1438
- Wanninkhof R H, Doney S, Peng T H *et al*, 1999a. Comparison of methods to determine the anthropogenic CO₂ invasion into the Atlantic Ocean. *Tellus*, 51B: 511—530
- Wanninkhof R, 1992. Relationship between gas exchange and wind speed over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 97: 7373—7382
- Wanninkhof R, McGillis W R, 1999b. A cubic relationship between air-sea CO₂ 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
- Zhai W D, Dai M H, 2009. On the seasonal variation of air-sea CO₂ fluxes in the outer Changjiang (Yangtze River) Estuary, East China Sea. *Marine Chemistry*, 117: 2—10
- Zhai W D, Dai M H, Guo X H, 2007. Carbonate system and CO₂ degassing fluxes in the inner estuary of Changjiang (Yangtze) River, China. *Marine Chemistry*, 107: 342—356

ERROR IN SST PRODUCT: PROPAGATION IN THE ESTIMATION OF SEA-AIR CO₂ FLUX

DOU Wen-Jie¹, JIANG Jin-Gang¹, ZHOU Bin¹, YU Zhi-Feng¹,
BAI Yan², HE Xian-Qiang²

(1. *Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China*; 2. *Key Laboratory of Zhejiang Urban Wetland and Regional Change Research, State Key Laboratory of Satellites Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China*)

Abstract Estimation of sea-air CO₂ flux is indispensable for a wide range of research especially for carbon biogeochemical cycles and globe climate change. The distribution and CO₂ flux are highly variable in surface seawater and vary over a broad spectrum in time and space scales, and there is considerable interest in the use of satellite remotely sensed data to provide synoptic maps of sea-air CO₂ flux. However, a great deal of uncertainties are associated with the current remote sensing products of sea-air CO₂ flux due to many error sources, which limits largely its application on decision making. Taking SST, the major impact factor on the estimation of sea-air CO₂ flux as an example, we presented in a flowchart how the error propagates during the flux calculation with parameters including gas transfer velocity (k), sea surface CO₂ solubility (S), and the partial pressure of CO₂ at sea surface ($p\text{CO}_{2\text{sw}}$). In addition, using Monte Carlo simulation, we analyzed the transfer law and the final contribution from the error to understand how SST error affects the flux interaction. The results indicate that under the assumption that remote sensing SST error is $\pm 0.5^\circ\text{C}$ and in normal distribution, the SST error transfer law was exponential distributed in k parameterization, and approximately exponential distributed in S parameterization, while normally distributed in $p\text{CO}_{2\text{sw}}$ parameterization and exponential distributed in CO₂ flux; and when atmospheric CO₂ partial pressure was fixed at the value of $370\mu\text{atm}$, SST brought an error of $\pm 1.2\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ to the final result of the flux. These results may provide a basis and reference for analyzing other parameters of remote sensing.

Key words sea-air CO₂ flux; remote sensing; SST; error propagation; Monte Carlo simulation