

大洋海区海-气 CO<sub>2</sub> 通量单参数遥感算法的适用性检验

王 郝 京

(厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 利用 卫星遥感技术的优势, 基于 LDEO 数据库的全球海表二氧化碳分压 ( $P_{\text{CO}_2}$ ) 及海表温度 ( $SST$ ) 等实测数据, 初步建立东太平洋海区  $P_{\text{CO}_2}$  与  $SST$  的单参数经验算法, 并采用相同区域的独立实测数据检验. 结果表明, 单参数算法在寡营养大洋海区具有良好的适用性, 反演值与实测值之间的均方根误差 ( $RMS$ ) 为  $0.51 \text{ Pa}$  ( $1 \text{ Pa} = 9.869 \mu\text{atm}$ ), 由此估算出 2003 年 6 月该海域  $\text{CO}_2$  通量为  $-1.4 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 与实测估算的碳通量基本相符, 能够很好地反映出海区  $\text{CO}_2$  源汇特征. 将该遥感算法运用到西大西洋海域 ( $15^\circ \sim 25^\circ\text{N}$ ,  $60^\circ \sim 75^\circ\text{W}$ ), 反演值与实测值之间均方根误差 ( $RMS$ ) 为  $0.69 \text{ Pa}$ . 检验结果表明, 在寡营养大洋海区, 单参数遥感算法具有一定的适用性, 在受相似因子调控的同纬度海区可以使用同一遥感算法.

**关键词:** 海洋化学; 大洋碳循环; 卫星遥感; 海-气界面  $\text{CO}_2$  通量; 海表  $\text{CO}_2$  分压 ( $P_{\text{CO}_2}$ )

DOI 10.3969/J. ISSN. 1000-8160. 2011. 02. 021

中图分类号: P734

文献标识码: B

文章编号: 1000-8160(2011)02-0286-06

海洋是全球最大的碳库之一, 对大气  $\text{CO}_2$  的浓度起调控作用<sup>[1-2]</sup>, 海-气界面  $\text{CO}_2$  通量的影响因素非常复杂, 准确估算海-气界面  $\text{CO}_2$  通量是评估海洋在全球碳循环中作用的前提和基础<sup>[3]</sup>. 为此, 国际上先后发起了一系列大型海洋碳通量研究计划<sup>[4]</sup>, 积累了大量相关现场数据, 但由于现场调查自身的局限性, 目前对全球海洋碳通量时空分布的认识还不充分, 通量估算还存在很大的不确定性<sup>[5]</sup>.

随着卫星遥测技术尤其是水色遥感技术的发展, 海洋卫星遥感以其在时空上高度覆盖的特点, 弥补了现场调查的不足. 于是研究海-气界面  $\text{CO}_2$  交换通量主要参量 (海表  $\text{CO}_2$  分压  $P_{\text{CO}_2}$ , 海-气界面交换系数  $k$ ) 与卫星遥感可测参数 [如海平面以上 10 m 高度的风速  $u_{10}$ , 海表温度  $SST$ 、叶绿素  $a$  ( $\text{chl}a$ ) 含量等] 间的相关性, 建立经验函数关系, 从而实现海-气  $\text{CO}_2$  通量间接遥感的方法逐渐发展起来<sup>[6-10]</sup>.

北太平洋低纬海区夏季海水层化现象严重<sup>[11]</sup>, 表层水的物理生化性质较为稳定. 在寡营养盐的大洋海区, 由于表层极低的营养盐浓度的限制, 生物活动相对较弱<sup>[12]</sup>. 蒲一芬 (2009) 在印度洋也得出在大洋海区海表  $\text{CO}_2$  化学过程中生物作用仅处于次要地

位的结论<sup>[13]</sup>. 可见, 大洋海区海表  $P_{\text{CO}_2}$  主要受海表温度  $SST$  的控制<sup>[6]</sup>, 应该采用单参数建立经验算法.

本研究主要以大洋海区 (夏威夷附近海域) 为研究区域, 利用实测  $P_{\text{CO}_2}$  及相关参数数据, 对现有的单参数经验算法在此类区域的适用性进行检验及讨论, 并据此估算海-气界面  $\text{CO}_2$  通量, 为单参数遥感模型估测  $P_{\text{CO}_2}$  的推广提供参考.

## 1 数据来源

### 1.1 现场数据

二氧化碳信息分析中心 CDIA C (Carbon Dioxide Information Analysis Center) 是一所致力于研究与气候变化相关数据的信息分析中心, 其中全球海表  $P_{\text{CO}_2}$  的实测数据及  $SST$  等相关参数由哥伦比亚大学的 Lamont-Doherty 地球科学研究所 (LDEO) 提供. 数据经严格的质量控制, 实测海表  $P_{\text{CO}_2}$  不确定性为  $\pm 0.25 \text{ Pa}$ ,  $SST$  精确度为  $0.05^\circ\text{C}$ <sup>[14]</sup>.

### 1.2 遥感数据

本研究所用  $SST$  及  $\text{chl}a$  含量遥感数据来自 NASA 水色遥感网站 (<http://oceans.gsfc.nasa.gov>)

收稿日期: 2010-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40976068)

作者简介: 王郝京 (1983-), 男, 硕士研究生; E-mail: haiyangwh@126.com

gov/), 由 MODIS (Aqua) 传感器采集, 空间分辨率为 4 km. QuikSCAT 数据取自 NASA JPL 数据中心逐日海面 (10 m 高) 风矢量数据, 每日数据包括升轨 (ascending pass) 和降轨 (descending pass) 2 轨数据, 取 2 轨数据的平均值用于计算, 数据空间分辨率约为 25 km.

### 1.3 数据匹配

时间窗口上, 受天气及云层的影响, 日平均数据存在较为严重的数据缺失问题, 因此选取与实测数据相对应的月平均数据、季节平均数据进行计算.

空间窗口上, 实测数据利用走航观测系统连续采集, 频率较高, 而模型估算结果空间分辨率为 4 km, 为使二者可一一匹配, 现将与遥感数据每一像素点相匹配的实测数据进行平均, 作为该像素点对应的模型结果. 为消除近岸对遥感数据的影响, 在

此以 30 m 水深为阈值, 对近岸数据进行筛选.

## 2 东太平洋夏季 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 算法

### 2.1 数据选择

为使算法具有代表性, 选择实测数据时, 充分考虑数据覆盖的时空范围. 通过对 LDEO 数据库的筛选, 本研究选取夏威夷附近海域 (15° ~ 25° N, 170° ~ 150° W), 时间跨度为 8 a 的 4 个航次 (1996 年 8 月、1998 年 6 月、2000 年 8 月、2004 年 8 月) 实测数据作为建立算法的数据, 共 833 组; 再选取同一海区 (15° ~ 25° N, 162° ~ 157° W), 2003 年 6 月航次的实测数据作为算法的检验数据, 共 834 组 (图 1). 遥感数据为与现场数据对应的 2003 年 6 月月平均数据, 空间分辨率为 4 km.

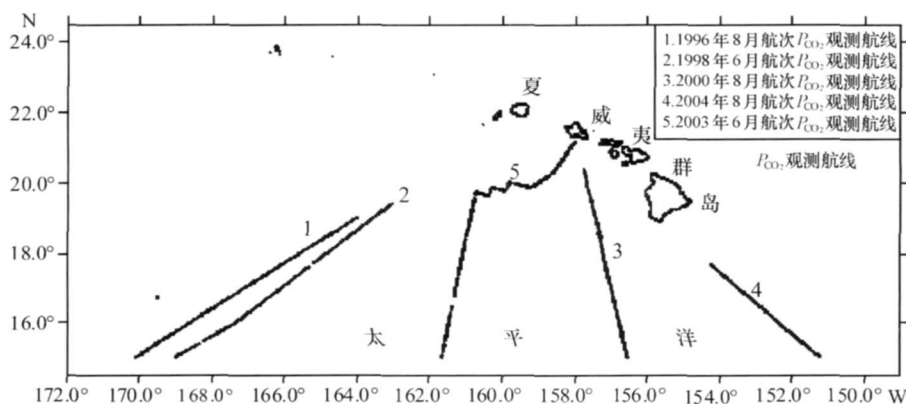


图 1 东太平洋 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 观测航线分布

Fig 1 Distribution of P<sub>CO<sub>2</sub></sub> observation routes in the Eastern Pacific

### 2.2 算法的建立

对实测数据进行拟合, 观察到 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 与 SST 呈显著线性相关, 得到遥感 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 单参数算法 (n = 833, R<sup>2</sup> = 0.93), 如式 (1) 所示:

$$P_{CO_2} = 0.0978SST^2 - 4.1721SST + 78.107 \quad (n = 833, R^2 = 0.93) \quad (1)$$

### 2.3 算法的检验

模型值与实测值的吻合程度以均方根误差 (RMS) 衡量, 计算公式为:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (P_{CO_2}^{in situ} - P_{CO_2}^{RS})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中: P<sub>CO<sub>2</sub></sub><sup>in situ</sup> 代表实测海表 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 数据, P<sub>CO<sub>2</sub></sub><sup>RS</sup> 则代表模型反演而得的海表 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 数据, n 代表比对数据量.

将遥感结果与 2003 年 6 月实测数据匹配 (图 2), 共获得比对数据 196 组, RMS 为 0.51 Pa 可见,

单参数遥感经验算法在东太平洋具有良好的适用性.

## 3 大洋区域 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 经验算法的拓展

### 3.1 区域与数据选择

大洋范围广阔, 不同海区理化性质变化复杂, 导致 CO<sub>2</sub> 源汇呈现块状分布. 在寡营养盐的大洋区, SST 是海表 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 的主要控制因子, 这是传统单参数 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 遥感算法的理论基础.

Olsen 等 (2004) 在加勒比海用卫星数据在进行碳通量的研究时, 根据 2002 年夏季实测数据建立了海表 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 与 SST 及经纬度相关的经验关系式<sup>[7]</sup>, 并指出在亚热带环流的海域, 海水表层的 P<sub>CO<sub>2</sub></sub> 与 SST 数据之间有很好的相关关系, 在 Sargasso 海、冬季的北大西洋北部海域、阿拉伯海、赤道和北太平洋海域可用该研究使用的方法计算碳通量<sup>[15]</sup>.

本研究以北太平洋 (夏威夷附近) 海域为基础,

建立了适合大洋海区的夏季海表  $P_{CO_2}$  单参数经验算法, 但该模型在其他海域的适用性尚需做进一步检验. 由此, 将该单参数经验算法拓展至加勒比海海区, 比较、分析与检验单参数算法在该海域的适用性.

选取的研究区域为加勒比海 (  $15^\circ \sim 25^\circ N$ ,  $60^\circ \sim 75^\circ W$  ) 海区, 由于单参数经验算法建立在夏季实测数据的基础上, 通过对 LEDO 数据库的筛选, 选择 2002 年 6~8 月共 3 个月的实测数据 ( 共 6 145 组 ), 数据的分布如图 3 所示.

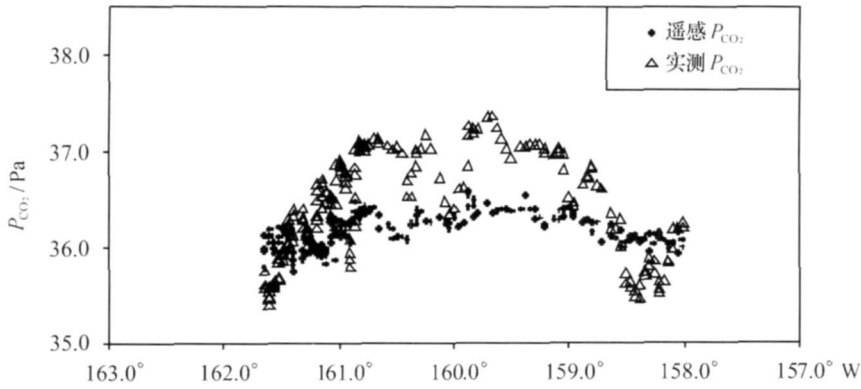


图 2 东太平洋遥感  $P_{CO_2}$  结果与航次实测  $P_{CO_2}$  对比

Fig. 2 Comparison between satellite-derived  $P_{CO_2}$  and *in situ*  $P_{CO_2}$  in the Eastern Pacific

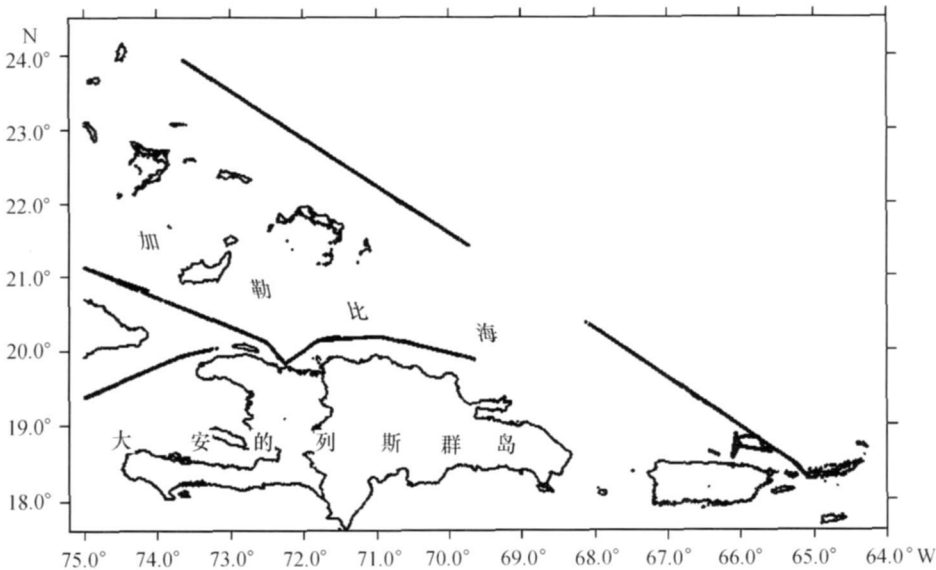


图 3 2002 年夏季西大西洋  $P_{CO_2}$  观测航线分布

Fig. 3 Distribution of  $P_{CO_2}$  observation routes in the Western Atlantic in summer 2002

为与实测数据相匹配, 选取 MODIS 传感器 SST 夏季季节平均数据, 时间跨度为 2002 年 6~8 月, 空间分辨率为 4 km. 将与实测数据相对应的遥感 SST 数据代入已有单参数算法即公式 ( 1 ), 估算加勒比海海表  $P_{CO_2}$ .

### 3.2 检验结果与分析

经检验, 单参数算法共获得匹配数据 545 组, RMS 为 0.69 Pa. 遥感与实测数据的验证结果如图 4 所示.

根据 2002 年夏季平均  $chl-a$  含量遥感数据, 经

与实测数据匹配, 航次期间平均  $chl-a$  含量为  $0.06 \text{ mg/m}^3$ , 最大值为  $0.33 \text{ mg/m}^3$ , 其中小于或等于  $0.1 \text{ mg/m}^3$  的数据占 92%. 从  $chl-a$  含量分布看出, 该地区的  $chl-a$  含量很低, 具有寡营养盐的大洋海区的性质, 适用大洋海区单参数算法.

加勒比海海区与夏威夷海区虽属不同大洋, 受不同的理化因子的影响, 但是建立于夏威夷附近海域的  $CO_2$  单参数遥感算法在加勒比海海区的反演误差 (RMS 为 0.69 Pa) 与 Olsen 等 (2004) 基于该海区实测数据拟合的算法反演误差 (RMS 约为 0.77 Pa)

基本相符<sup>[7]</sup>. 需要指出的是, 本研究未将经纬度作为参数进行算法拟合, 可见, 地理因素的影响并不明

显, 在粗略估算 CO<sub>2</sub> 通量时, 可以忽略其影响.

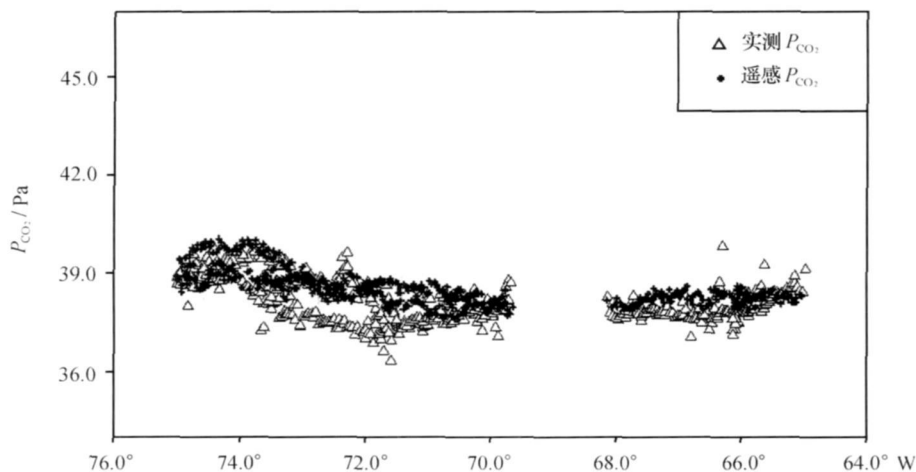


图 4 2002年夏季西大西洋遥感  $P_{\text{CO}_2}$  计算结果与航次实测  $P_{\text{CO}_2}$  对比

Fig 4 Comparison between satellite-derived  $P_{\text{CO}_2}$  and in situ  $P_{\text{CO}_2}$  in the Western Atlantic in summer 2002

## 4 东太平洋海区 CO<sub>2</sub> 通量

研究大气 CO<sub>2</sub> 的源汇过程的方法很多, 在此采用的是通过测定海-气界面附近的 CO<sub>2</sub> 分压差, 估算海区的海-气界面 CO<sub>2</sub> 通量.

海-气界面 CO<sub>2</sub> 通量的计算公式为:

$$F = KP_{\text{CO}_2} = kL(P_{\text{CO}_2}^{\text{海水}} - P_{\text{CO}_2}^{\text{空气}})^{1/6} \quad (6)$$

式中:  $F$  是海-气界面 CO<sub>2</sub> 的净通量; 海-气界面交换系数  $K$  由公式  $K = kL$  计算得出, 经常表述为风速的函数.  $L$  是与温度、盐度有关的 CO<sub>2</sub> 在海水中的溶解度<sup>[17]</sup>, 本研究  $k$  的计算公式<sup>[18]</sup> 为:

$$k = f u_{10}^2 \times (Sc/660)^{-0.5} \quad (4)$$

式中:  $Sc$  是 CO<sub>2</sub> 在海水 ( $S = 35$ ) 中的 Schmidt 数, 660 是 CO<sub>2</sub> 在 20 °C 海水中的 Schmidt 数,  $u_{10}$  是海平面上 10 m 高度的风速,  $f$  是一个比例系数, 对于采用长期平均风的计算是 0.39, 对于采用瞬时风计算则为 0.31.

空气中二氧化碳分压  $P_{\text{CO}_2}^{\text{空气}}$  由公式  $P_{\text{CO}_2}^{\text{空气}} = x_{\text{CO}_2}^{\text{空气}} (P_b - P_{\text{H}_2\text{O}})$  计算得出, 其中  $x_{\text{CO}_2}^{\text{空气}}$  是干空气中二氧化碳摩尔比值,  $P_b$  为大气压强, 近似认为等于  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  为海-气界面的水汽压强, 由 AVHRR 卫星数据计算得出<sup>[19]</sup>.  $x_{\text{CO}_2}^{\text{空气}}$  数据来源为 NOAA / Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory (CMDL) 的观测数据<sup>[20]</sup>.

利用海表  $P_{\text{CO}_2}$  遥感单参数经验算法, 以 2003 年 6 月月平均 MODIS-SST 数据、QuikSCAT 月平均风速数据、大气 CO<sub>2</sub> 月平均浓度数据等为参量, 使用海-

气界面 CO<sub>2</sub> 分压差法, 估算目标海区的海-气 CO<sub>2</sub> 通量.

估算结果为, 2003 年 6 月航次覆盖的海区 (15° ~ 25°N, 162° ~ 157°W) 平均海-气界面 CO<sub>2</sub> 通量为  $-1.4 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ; 如果只考虑与此次航线相匹配的数据, 其平均海-气界面 CO<sub>2</sub> 通量为  $-1.0 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ . 从经验算法模型中可以得到, 该海区在夏季是大气 CO<sub>2</sub> 的弱汇.

Chen 等 (2007) 通过 2005 年 3 月几乎同一区域 (18° ~ 23°N, 161° ~ 155°W) 的实测, 估算该区域的海-气界面 CO<sub>2</sub> 通量为  $-2.9 \pm 1.8 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ <sup>[21]</sup>, 认为该区域是大气 CO<sub>2</sub> 的弱汇; Takahashi 等 (2009) 的全球碳通量模型中, 也认为该区域属于大气 CO<sub>2</sub> 的弱汇<sup>[15]</sup>.

虽然量值上有所差异, 但是与实测数据相比, 在该海区建立的经验算法也能够很好地反映出海区 CO<sub>2</sub> 源汇特征.

## 5 结论

利用 LDEO 数据库在东太平洋海区跨越 8a 的 4 个航次的现场实测二氧化碳分压 ( $P_{\text{CO}_2}$ ) 及相关参数数据, 建立  $P_{\text{CO}_2}$  与 SST 的单参数经验关系, 并采用另一组独立数据进行检验. 结果表明, 该经验算法在该大洋海区适用性很好, 均方根误差 (RMS) 为 0.51 Pa 海-气界面 CO<sub>2</sub> 通量约为  $-1.4 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 海区表现为大气 CO<sub>2</sub> 的弱汇.

在稳定情况下, 大洋区海表  $P_{\text{CO}_2}$  主要受 SST 控制. 但 Samiento 等 (1992) 认为海洋吸收 CO<sub>2</sub> 的主要

限制因子是海洋环流和混合过程<sup>[22]</sup>。而从 Takahashi等(2009)的研究结论可以看出,全球大洋尺度的CO<sub>2</sub>通量存在源与汇的块状分布<sup>[14]</sup>。虽然如此,本研究在不同海区的单参数算法适用性检验表明,在寡营养盐大洋水体,充分考虑研究海区的生物理化性质后,在受相似因子调控的同纬度海区可以使

用同一遥感算法,这为大洋单参数遥感算法的推广提供了参考。

致谢: 本论文得到厦门大学海洋与环境学院商少凌教授、李炎教授的悉心指导,谨此致谢!

## 参考文献:

- [1] Fasham M J R, Balino B M, Bowles M C, et al. A new vision of ocean biogeochemistry after a decade of the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) [C]. Sweden: AMBIO Special Report, 2001: 4-31.
- [2] Sabine C L, Feely R A, Gnanter N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub> [J]. *Science*, 2004, 305: 367-371.
- [3] 李宁, 李学刚, 宋金明, 等. 海洋碳循环研究的关键生物地球化学过程 [J]. *海洋环境科学*, 2005, 24(2): 75-80.
- [4] Hubbard K, Raupach M, Canadell J. The global carbon project: linking the biophysical and human components of the carbon cycle [J]. *Global Change Newsletter*, 2002, 50: 39-41.
- [5] Rangan A Y, Boutin J, Etcheto J, et al. Variability of the net air-sea CO<sub>2</sub> flux inferred from shipboard and satellite measurements in the Southern Ocean south of Tasmania and New Zealand [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: C09005.
- [6] Stephens M P, Samuels G, Olson D B, et al. Sea-air flux of CO<sub>2</sub> in the North Pacific using shipboard and satellite data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C7): 13 571-13 583.
- [7] Olsen A, Trinanes J A, Wanninkhof R. Sea-air flux of CO<sub>2</sub> in the Caribbean Sea estimated using *in situ* and remote sensing data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 309-325.
- [8] Olsen A, Omar A M, Stuart-Menteth A C, et al. Diurnal variations of surface ocean pCO<sub>2</sub> and sea-air CO<sub>2</sub> flux evaluated using remotely sensed data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(20): L20304.
- [9] Sama V V, Saino T, Sasaoka K, et al. Basin-scale pCO<sub>2</sub> distribution using satellite sea surface temperature, CH<sub>4</sub> and climatological salinity in the North Pacific in spring and summer [J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2006, 20: GB3005.
- [10] Lohrenz S E, Cai W. Satellite ocean color assessment of air-sea fluxes of CO<sub>2</sub> in a river-dominated coastal margin [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L01601.
- [11] Takahashi T, Sutherland S C, Sweeney C, et al. Global sea-air CO<sub>2</sub> flux based on climatological surface ocean pCO<sub>2</sub> and seasonal biological and temperature effects [J]. *Deep-Sea Research II*, 2002, 49(9/10): 1 601-1 622.
- [12] Chen Y F. Spatial and seasonal variations of nitrate-based new production and primary production in the South China Sea [J]. *Deep-Sea Research I*, 2005, 52(2): 319-340.
- [13] 浦一芬. 印度洋二维碳循环模式中表层 CO<sub>2</sub>分压分布对物理和生化过程的敏感性试验 [J]. *气候与环境研究*, 2009, 14(3): 301-308.
- [14] Takahashi T, Sutherland S C, Kozyr A. Global ocean surface water partial pressure of CO<sub>2</sub> database: measurements performed during 1968~2008 (version 2008) [R]. Tennessee, US: Oak Ridge National Laboratory, 2009.
- [15] 许苏清. 利用现场和卫星遥感数据估算南大洋碳通量 [D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [16] Liss P S. Process of gas exchange across an air-water interface [J]. *Deep Sea Research*, 1973, 20(3): 221-238.
- [17] Weiss R F. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas [J]. *Marine Chemistry*, 1974, 2(3): 213-215.
- [18] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C5): 7 373-7 382.
- [19] Zeebe R E, Wolf G D. CO<sub>2</sub> in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes [M]. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- [20] Zhai W D, Dai M H, Cai W J, et al. The partial pressure of carbon dioxide and air-sea fluxes in the northern South China Sea in spring, summer and autumn [J]. *Marine Chemistry*, 2005, 96(1/2): 87-97.
- [21] Chen F, Cai W J, Benitez-Nelson C, et al. Sea surface pCO<sub>2</sub>-SST relationships across a cold-core cyclonic eddy: implications for understanding regional variability and air-sea gas exchange [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L10603.
- [22] Samiento J L, Orr J C. A perturbation simulation of CO<sub>2</sub> in an ocean general circulation model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C3): 3 621-3 645.

# Applicability inspection of remote-sensing single-parameter algorithm for air-sea CO<sub>2</sub> flux in open ocean

WANG Hao-jing

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract** Accurate estimation of the air-sea CO<sub>2</sub> flux is the foundation of evaluating the role the ocean plays in the global carbon cycle. Previous research results have indicated that sea-surface  $P_{\text{CO}_2}$  is dominated by the sea-surface temperature in the open ocean, and a single-parameter empirical algorithm performs well in evaluating sea-surface CO<sub>2</sub> flux. On the basis of  $P_{\text{CO}_2}$  and other related *in situ* parameters of the LDEO dataset, we used data recorded on four summer cruises (1996~2004) in the sea area near Hawaii (East Pacific Ocean) to formulate a single-parameter model based on the relationship between the sea-surface temperature and  $P_{\text{CO}_2}$ , and then validated this algorithm with two sets of *in situ*  $P_{\text{CO}_2}$  data. The validation results for the East Pacific Ocean (Hawaii Sea) in June 2003 and West Atlantic Ocean (Caribbean Sea) from June to August 2002 were  $RMS = 0.51 \text{ Pa}$ ,  $n = 196$  and  $RMS = 0.69 \text{ Pa}$ ,  $n = 545$ , respectively. All results indicate that the single-parameter algorithm formulated in this study was suitable for oligotrophic open ocean. Afterward, we calculated the CO<sub>2</sub> flux in East Pacific Ocean for June 2003 as approximately  $-1.4 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , which was in accordance with *in situ* flux. The results demonstrate that in oligotrophic open ocean and with consideration of biological and physicochemical properties, one algorithm can be applied to identical-latitude sea areas that are under the control of similar factors. This inspires the expansion of the single-parameter algorithm to the open ocean.

**Key words** marine chemistry; ocean carbon cycle; remote sensing; air-sea CO<sub>2</sub> flux; sea-surface  $P_{\text{CO}_2}$

DOI 10.3969/J. ISSN. 1000-8160. 2011. 02. 021

(责任编辑: 王 静)