

珠江口表层水体 CO₂ 分压的空间和季节变化*

马 玉^{1,2}, 高全洲^{1,3*}, 李团结², 唐文魁¹, 张乾柱¹,
史华明², 张军晓², 王 迪², 彭鹏飞²
(1. 中山大学地理科学与规划学院//广东省城市化与地理环境空间
模拟重点实验室, 广东 广州 510275;
2. 国家海洋局南海调查技术中心, 广东 广州 510300;
3. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘 要: 采用连续观测系统调查了四季珠江口表层水体二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)、温度、盐度和溶解氧(DO),并分析了 $p\text{CO}_2$ 、盐度和DO的空间分布和季节变化。四季珠江口上游水体盐度相同时 $p\text{CO}_2$ 季节变化为夏季<春季<秋季<冬季,即丰水期小于枯水期,丰水期大量降雨稀释了风化产物,径流输入的 CO_2 浓度较低,且盐度相同时枯水期水体更接近上游 $p\text{CO}_2$ 高值区。四季上游区域 $p\text{CO}_2$ 高,DO低,且 $p\text{CO}_2$ 与DO呈负线性相关,耗氧呼吸是维持高 $p\text{CO}_2$ 的主要生物地球化学过程。春季表层水体盐度为0.19‰, $p\text{CO}_2$ 最高值为717.2 Pa,DO低至41.4 $\mu\text{mol/L}$ 。春、夏季珠江径流携带的大量营养物质在下游开阔区域促进了浮游植物繁殖,浮游植物光合作用在吸收 CO_2 的同时产生大量氧气。夏季香港西侧海域表层水体盐度为15‰~25‰时, $p\text{CO}_2$ 最低值为16.5 Pa,DO最大值为418.8 $\mu\text{mol/L}$ 。

关键词: 珠江口; $p\text{CO}_2$; 径流; 耗氧呼吸; 光合作用

中图分类号: X145 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2016)03-0039-08

The spatial and seasonal variations of partial pressure of carbon dioxide in surface water in Pearl River Estuary

MA Yu^{1,2}, GAO Quanzhou^{1,3}, LI Tuanjie², TANG Wenkui¹, ZHANG Qianzhu¹, SHI Huaming²,
ZHANG Junxiao², WANG Di², PENG Pengfei²

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. South China Sea Marine Survey and Technology Center, SOA, Guangzhou 510300, China;
3. Guangdong Province Key Laboratory of Mineral Resource & Geological Processes,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The focal area of this study is the Pearl River Estuary (PRE). In this study, the surface partial pressure of carbon dioxide ($p\text{CO}_2$), temperature, salinity and dissolved oxygen (DO) were determined by underway measurement system during four field surveys, and their seasonal and spatial variations were shown. Significant seasonal variations of $p\text{CO}_2$ was observed in the upstream region of PRE, $p\text{CO}_2$ in summer was the lowest at the same salinity, medium in spring and fall, the highest in winter, which indicated that the weathering-derived dissolved inorganic carbon was diluted in wet season and sea water was more close to upstream region in dry season. High $p\text{CO}_2$ and low DO occurred in the upstream

* 收稿日期: 2015-12-16

基金项目: 广东省自然科学基金重点资助项目(2014A030311003); 国家自然科学基金资助项目(41340019); 国家自然科学基金资助项目(41071054)

作者简介: 马玉(1982年生),男;研究方向:海洋环境地球化学;通讯作者:高全洲;E-mail:eesgq@mail.sysu.edu.cn

region during four seasons, and $p\text{CO}_2$ and DO showed a strong negative linear correlation, and aerobic respiration was the most important factor in modulating high $p\text{CO}_2$. Especially, the maximum of $p\text{CO}_2$ was 717.2 Pa and the minimum of DO was 41.4 $\mu\text{mol/L}$ when salinity was 0.19‰ in spring. Pearl River runoff discharged an amount of nutrients into nearshore waters and promoted primary production in broad region in spring and summer. Phytoplankton photosynthesis produced oxygen into sea water and removed carbon dioxide from sea water. The lowest $p\text{CO}_2$, 16.5 Pa and the highest DO, 418.8 $\mu\text{mol/L}$ existed in the western of Hong Kong where salinity ranged from 15‰ to 25‰ in summer.

Key words: the Pearl River Estuary; partial pressure of carbon dioxide; runoff; aerobic respiration; photosynthesis

河口处于陆海交互作用强烈的地带,是陆源物质进入海洋的最后环节,同时也是连接地球四大圈层(大气圈、岩石圈、水圈和生物圈)的重要枢纽,在全球碳循环中发挥着重要作用^[1]。每年河流输入海洋的碳约为 10^{15} g,相当于海洋与大气的 CO_2 净交换量^[2-3],且全球河口主要是大气 CO_2 的源^[4-5]。一般来说,低纬度河口 CO_2 源强于高纬度,每年河口释放的碳约为 $(0.25 \sim 0.50) \times 10^{15}$ g^[6-7]。全球 106 个河口的研究成果表明^[8],在盐度 $< 2\text{‰}$ 的河口上游段 $p\text{CO}_2$ 最高,河流自身以及河口周围湿地随潮流携带的高 $p\text{CO}_2$ 水体流入河口,使得河口上游 $p\text{CO}_2$ 偏高。随着盐度的增加向下游 $p\text{CO}_2$ 逐渐降低, $2\text{‰} < \text{盐度} < 25\text{‰}$ 的河口混合区 $p\text{CO}_2$ 和水—气 CO_2 通量相对较低,主要由于河口上游已经向大气逸散大量 CO_2 ,且随着盐度升高,淡水与低 $p\text{CO}_2$ 的海水充分混合。同时由于悬浮物的沉积作用增强,水体具有较高的透明度,河流携带的丰富营养物质也为生物光合作用提供了条件。盐度 $> 25\text{‰}$ 的河口下游, $p\text{CO}_2$ 和 CO_2 水—气通量通常最低。河口区表层水体 CO_2 的源/汇性质可简单地表示为“弱源”(河流) → “强源”(河口) → “汇”(海洋)^[9]。

然而,碳在河口水体转变的控制机制复杂,生源要素在河口的行为变化、水体的驻留时间、潮流潮汐过程以及地下径流的排入等均对河口碳循环以及水—气 CO_2 交换通量产生影响。一方面,河口受潮汐和径流双重作用,水体滞留时间及循环周期较短,陆源物质由于水动力条件的改变,其理化性质均不稳定。另一方面,随着淡咸水的混合,河流通过河口向近海输入大量的有机质和营养盐,浮游生物光合作用和细菌的呼吸作用共同存在,吸收和释放 CO_2 的能力取决于两者的平衡^[10]。北美 Satilla 河口逸散的 CO_2 几乎都来自河口周围盐沼微生物呼吸生成的 CO_2 ^[11];法国的 Loire 河口低盐度区生物呼吸和碳酸盐溶解之间存在耦合关系,耗氧呼

吸所产生的 CO_2 参与了碳酸盐溶解,致使水体溶解无机碳增加^[12];地下水输入和光合作用使得英国 Tweed 河、Great Ouse 河和 Thames 河水体 CO_2 含量下降^[13]。我国黄河口低盐区溶解无机碳的亏损主要是由于生物活动和碳酸钙沉降^[14];长江口和珠江口上游低盐区的耗氧呼吸作用支持了高 $p\text{CO}_2$,下游高盐区浮游生物光合作用吸收大量 CO_2 的同时产生氧气^[15-16]。本研究采用连续 $p\text{CO}_2$ 观测系统,调查了四季珠江口表层水体 $p\text{CO}_2$ 、温度、盐度和 DO 等要素,分析水体 $p\text{CO}_2$ 的空间分布和季节变化,并结合温度、盐度和 DO,探讨珠江口表层水体 $p\text{CO}_2$ 的控制机制。

1 材料与方法

1.1 研究区域与调查断面

珠江流域地处亚热带气候区,是西江、北江、东江及珠江三角洲诸河等水系的总称,流域面积约为 $4.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。西江流域中上游地区以石灰岩山地为主;北江流域中上游地区干流西侧是石灰岩山地,东侧以红岩盆地为主,下游则是花岗岩丘陵广布;东江流域以花岗岩丘陵为主。珠江流域碳酸盐岩分布面积积达 $15.84 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占全流域面积的 35.0%^[17]。珠江三角洲由西江、北江和东江入海时冲积而成,三角洲城市群包括广州、深圳、香港、珠海、佛山、东莞、澳门等,面积约 $5.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

珠江河口由八大口门组成,东 4 口门是由虎门、蕉门、洪奇沥和横门组成的喇叭状河口湾,西 4 口门包括崖门、虎跳门、磨刀门和鸡啼门,其中崖门和虎跳门组成呈喇叭状的黄茅海河口湾^[18]。珠江流域年平均降水量 1 200 ~ 2 200 mm,主要集中于 4-9 月份。珠江年均入海径流总量仅次于长江,是黄河的 6 倍,约为 $3.3 \times 10^{11} \text{ m}^3$,丰水期径流量占全年的 80%^[19]。珠江入海径流在科氏力的作用,具有较强的西南流向^[20],仅在夏季,在西

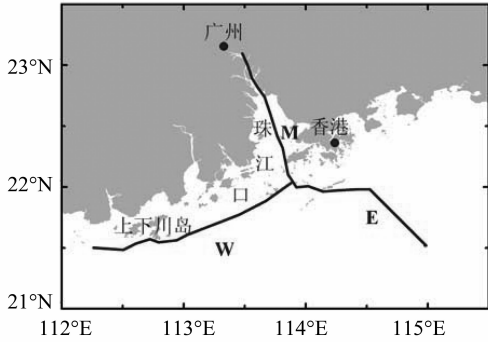


图1 珠江口调查断面

Fig. 1 Map of the Pearl River Estuary showing study area and location of transects

南季风的驱使下珠江径流具有东北流向,且珠江径流对表层水体的影响范围大致分布在盐度小于33‰的区域^[21]。本研究调查区域如图1所示。调查断面北端起近淡水端的广州长洲岛铁桩水道,经虎门水道和伶仃洋至香港附近海域为主调查断面(M断面),东侧断面(E断面)至东经115.00°E、北纬21.50°N,西侧断面(W断面)至东经112.25°E、北纬21.50°N,东、西侧断面高盐端至表层水体盐度约为33‰海域。

1.2 现场调查与数据采集

本研究进行了四个季节的现场调查,分别是夏季(2011.08)、秋季(2011.11)、冬季(2012.02)和春季(2012.05),采用连续 $p\text{CO}_2$ 观测系统分析表层水体 $p\text{CO}_2$ (G08050)、温度、盐度(SBE21 CTD)和DO(oxygen optode 3835)。观测系统的 $\varphi(\text{CO}_2)$ 线性范围为 $(0 \sim 3\ 000) \times 10^{-6}$,使用 CO_2 标准气体(φ , 1.44×10^{-6} 、 218.16×10^{-6} 、 584.75×10^{-6} 、 1025.9×10^{-6})校准仪器;同时为减小观测数据误差,对超出仪器线性范围的数据采用高 $\varphi(\text{CO}_2)$ 标准气体($1\ 025.9 \times 10^{-6}$ 、 $3\ 002.9 \times 10^{-6}$ 、 $5\ 029.3 \times 10^{-6}$ 、 $7\ 037.0 \times 10^{-6}$)进行了实验室校正。采集的水样以高流量连续不断地从水面下5 m处抽取后输送至实验室,观测系统水一汽平衡器内水温与原位温度的差别小于0.2℃。依据同步观测的温度及盐度数据,水一汽平衡器中 $p\text{CO}_2$ 采用Weiss&Price饱和水汽压公式^[22]计算,温度效应校准在盐度0.1‰~5‰时为2.5%/℃,盐度17‰~33‰时为4.0%/℃,中间盐度5‰~17‰过渡区域温度效应分布在(2.5%~4.0%)/℃之间,可以表示为 $(0.125S + 1.875)\%/℃$,式中S表示盐度^[23]。

2 结果与讨论

经数据分析发现,四季表层水体 $p\text{CO}_2$ 与温度均无明显相关趋势。为更好地探讨其他因素的影响,本研究分别采用每航次的平均温度对 $p\text{CO}_2$ 进行了等温处理,本文中珠江口表层水体 $p\text{CO}_2$ 均是等温处理后的结果。四季珠江口表层水体平均温度分别为春季25.8℃、夏季30.5℃、秋季20.1℃及冬季17.9℃。

2.1 $p\text{CO}_2$ 、盐度和DO空间分布及季节变化

图2是春、夏季珠江口表层水体 $p\text{CO}_2$ 、盐度和DO的空间分布。春季珠江口上游表层水体 $p\text{CO}_2$ 最大值为717.2 Pa,对应盐度和DO分别为0.19‰和41.4 $\mu\text{mol/L}$ 。夏季航次观测起自东四门口,表层水体 $p\text{CO}_2$ 最大值为173.4 Pa,对应盐度和DO分别为6.03‰和165.2 $\mu\text{mol/L}$ 。Zhai^[15]利用外推法估算珠江口水体盐度为0‰时 $p\text{CO}_2$ 约为709.1 Pa,Guo等^[24]观测获得珠江口黄埔段春季 $p\text{CO}_2$ 平均值为639.1 Pa,本文调查结果与二者均相近。春、夏季M断面 $p\text{CO}_2$ 自上游虎门水道经内伶仃洋、外伶仃洋后逐渐减小,至香港西侧附近海域 $p\text{CO}_2$ 最低,最小值分别为21.7 Pa和16.5 Pa,DO分别为最大值340.5 $\mu\text{mol/L}$ 和418.8 $\mu\text{mol/L}$ (图2),且相较于春季,夏季香港西侧海域 $p\text{CO}_2$ 低值和DO高值区范围更广(图2)。2001年Dai等^[25]观测到春季香港近海浮游植物水华,叶绿素质量浓度范围为0.2~1.8 $\mu\text{g/L}$, $p\text{CO}_2$ 显著降低,DO升高。春、夏季E断面 $p\text{CO}_2$ 自西北向东南缓慢增大,W断面在上下川岛附近海域受海岛淡水输入的影响,局部海域水体盐度值虽有降低,但来自海岛的径流量小, $p\text{CO}_2$ 仅略有降低,DO增大并不明显。

图3是秋、冬季珠江口表层水体 $p\text{CO}_2$ 、盐度和DO的空间分布。秋季航次仅观测了M和W断面,上游表层水体 $p\text{CO}_2$ 最大值为542.8 Pa,对应盐度和DO分别为2.76‰和91.5 $\mu\text{mol/L}$ 。冬季上游表层水体 $p\text{CO}_2$ 最大值为581.0 Pa,对应盐度和DO分别为6.23‰和91.0 $\mu\text{mol/L}$ 。秋、冬季香港西侧海域无明显低 $p\text{CO}_2$ 、高DO现象,自上游虎门水道经内伶仃洋、外伶仃洋至E、W断面高盐端 $p\text{CO}_2$ 呈逐渐减小,秋季 $p\text{CO}_2$ 最小值为34.0 Pa,盐度和DO最大值分别为33.02‰和256.6 $\mu\text{mol/L}$,冬季 $p\text{CO}_2$ 最小值为32.8 Pa,盐度和DO分别为33.94‰和291.5 $\mu\text{mol/L}$ 。冬季E断面担杆岛附近

海域 $p\text{CO}_2$ 较低, 且温度、盐度和 DO 均相对较高, 可能是由于高温高盐的海水锋面入侵, 伴随局部浮游植物生长所致。秋、冬季 W 断面上下川岛附近海域同样受海岛淡水输入影响, 局部水体盐度降低、 $p\text{CO}_2$ 略有升高。

2.2 $p\text{CO}_2$ 与盐度的关系及径流影响

四季珠江口表层水体 $p\text{CO}_2$ 均随盐度的增大而逐渐减小 (图 4), 全球亚热带和温带河口区 $p\text{CO}_2$ 与盐度的关系曲线基本相似^[26], 热带亚马逊河口 $p\text{CO}_2$ 与盐度的关系曲线明显不同, 呈线性相关^[27]。春季珠江口上游近淡水端, 盐度最小值为 0.19‰, $p\text{CO}_2$ 为 717.2 Pa, 且春季盐度 < 2‰ 时, $p\text{CO}_2$ 随盐度增加而急剧下降 (图 4)。珠江口上游高 $p\text{CO}_2$ 和极低 DO 的分布特征可能是由于上游区

域承接了珠江三角洲城市群大量的工农业生产和生活污水的排放^[28-29], 径流入海时携带大量无机碳和有机质, 有机质耗氧呼吸在消耗氧气的同时又产生大量 CO_2 ^[30-31], 且虎门是东江全部径流和西江、北江及珠江三角洲诸河部分径流的主要入海通道。珠江口表层水体相同盐度值时, $p\text{CO}_2$ 季节变化为夏季 < 春季 < 秋季 < 冬季 (图 4), 即丰水期小于枯水期。枯水期珠江淡水端的无机碳浓度大于 2 700 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 丰水期约为 1 000 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ ^[32], 尽管丰水期风化速率高, 但大量降雨稀释了风化产物, 所以径流输入的无机碳浓度较低^[33-34]。且枯水期因海水的入侵, 水体盐度相同时, 枯水期水体更接近上游, 而上游区域直接承接入海径流, 不仅水体无机碳浓度高, 水体及底层沉积物中有机质含量也高, 耗氧呼吸在消耗氧气的同时产生大量的 CO_2 。

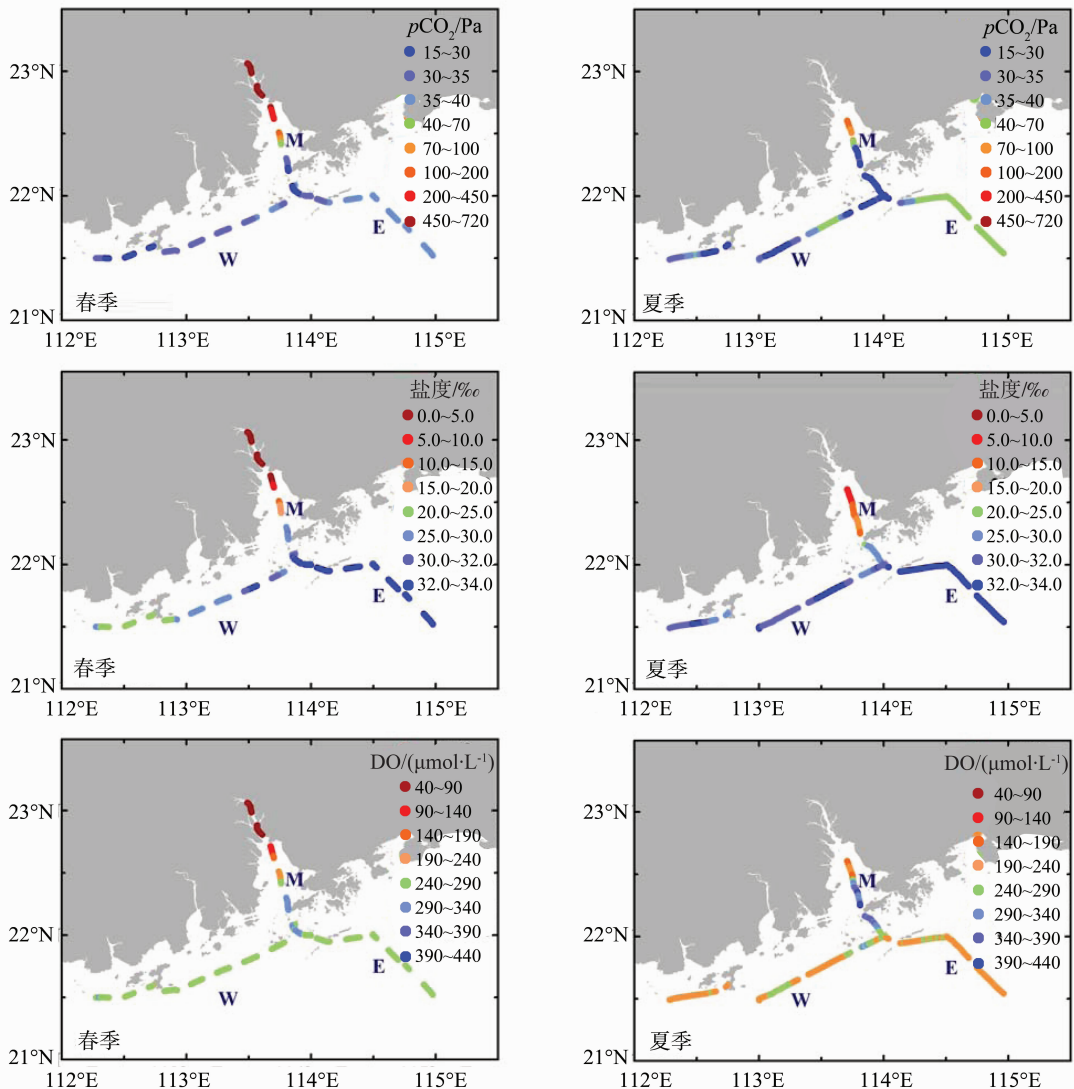


图 2 春季和夏季表层水体 $p\text{CO}_2$ 、盐度和 DO 分布

Fig. 2 Spatial distributions of $p\text{CO}_2$, salinity and DO in surface water in spring and summer

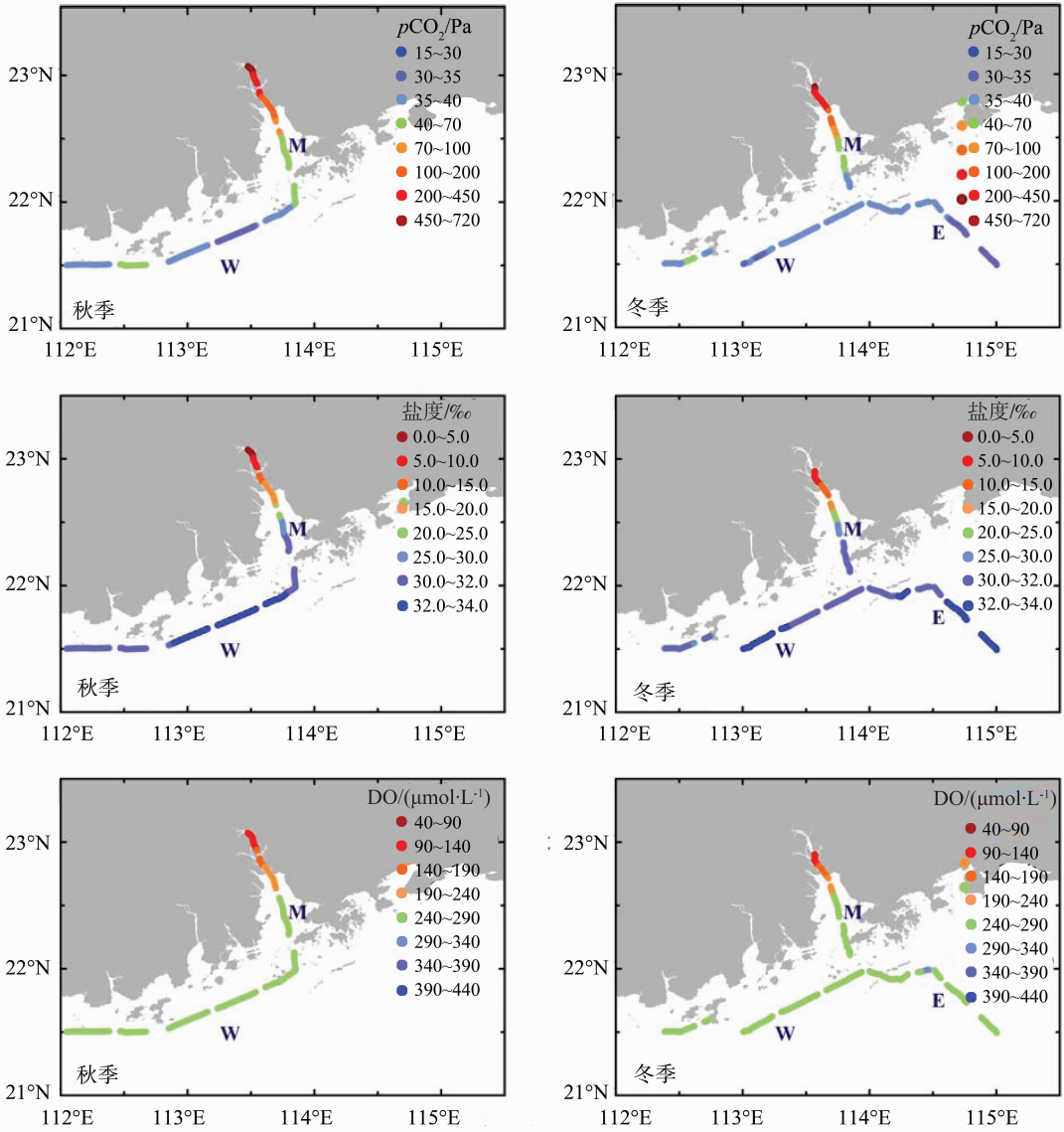


图 3 秋季和冬季航次表层水体 pCO₂、盐度和 DO 分布

Fig. 3 Spatial distributions of pCO₂, salinity and DO in surface water in autumn and winter

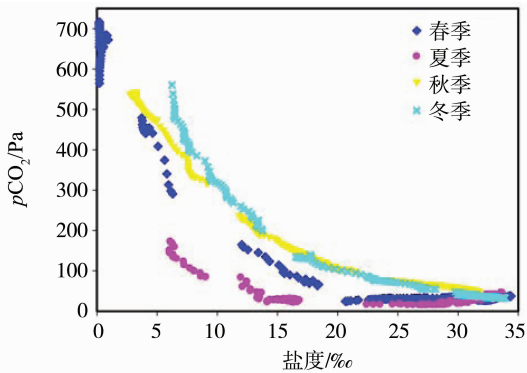


图 4 表层水体盐度与 pCO₂ 关系

Fig. 4 Relationships between salinity and pCO₂ in surface water

2.3 pCO₂ 与 DO 的关系及耗氧呼吸

pCO₂ 和 DO 分布特征与营养物质输入及由此引起的生物活动密切相关。河口区有机质的氧化分解、生物体的呼吸作用等过程产生大量的无机碳，消耗氧气的同时释放 CO₂，使得水体 pCO₂ 升高^[35-36]。珠江口表层水体 pCO₂ > 50.6 Pa 时，pCO₂ 与 DO 几乎呈负线性相关（图 5），pCO₂ 均随 DO 的减小而逐渐增大，说明珠江口上游表层水体高 pCO₂ 主要是由耗氧呼吸控制。Zhai 等^[15] 报道珠江口水体盐度小于 0.5‰ 时 pCO₂ 大于 405.2 Pa，高 pCO₂ 主要是由于耗氧呼吸，而 Dai 等^[37] 及 Guo 等^[24] 认为，珠江口东四门水体高 pCO₂ 主要是受到耗氧呼吸和硝化作用的双重影响，而西四门主要是

由于耗氧呼吸。图 5 中春季、秋季和冬季 3 个季节的 $p\text{CO}_2$ 与 DO 关系曲线相互重叠, 3 个季节的 $p\text{CO}_2$ 和 DO 受控于相同的生物地球化学过程。夏季获取的 $p\text{CO}_2$ 最大值为 173.4 Pa、DO 最小值是 165.2 $\mu\text{mol/L}$, 缺少夏季高 $p\text{CO}_2$ 、低 DO 部分 (图 5)。

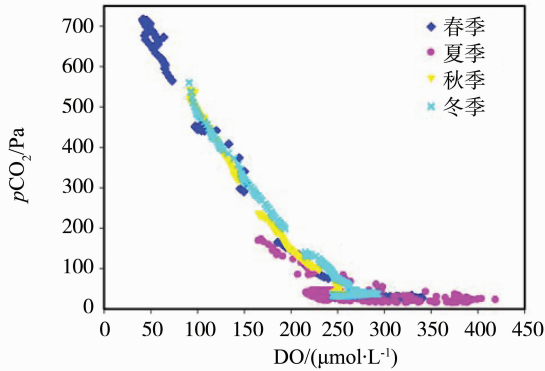


图 5 表层水体 DO 与 $p\text{CO}_2$ 与关系

Fig. 5 Relationships between DO and $p\text{CO}_2$ in surface water

2.4 盐度与 DO 的关系及光合作用

浮游植物光合作用不断地将海水中的游离 CO_2 转化为有机碳, 降低水体 $p\text{CO}_2$ 的同时释放出氧气, 所以河口区水体高 DO、低 $p\text{CO}_2$ 是浮游植物繁殖茂盛的间接指示^[38]。春、夏季局部区域 DO 含量超过 300 $\mu\text{mol/L}$, 特别是夏季 DO 含量高达 418.8 $\mu\text{mol/L}$ 左右 (图 5), $p\text{CO}_2$ 低值区、DO 高值区域均分布在香港西侧海域 (图 2)。夏季表层水体盐度为 15‰~25‰时 DO 含量最高, 春季 DO 最大值对应的盐度约为 32‰ (图 6), 且夏季 DO 含量更高, 分布范围更广 (图 2)。一方面是因为 4~9 月 (即春季和夏季) 是华南地区丰水期, 特别是夏季雨量更为丰沛, 入海径流量大于春季, 更大于枯水期的秋季和冬季。大量入海径流在降低水体盐度的同时, 其携带的营养物质为浮游植物繁殖提供了有利条件, 而且珠江口浮游植物生长有很强的季节性, 夏季最适合浮游植物生长, 春季次之。春、夏季浮游植物光合作用在吸收 CO_2 的同时释放 O_2 , 使得水体 $p\text{CO}_2$ 降低, DO 升高 (图 6 和图 2); 秋、冬季浮游植物光合作用微弱, 香港西侧海域 $p\text{CO}_2$ 和 DO 无显著变化 (图 6 和图 3)。Yin^[39] 认为是季风控制了香港海域浮游植物的季节变化, 夏季华南地区盛行西南季风, 雨量充沛, 为河口输入大量营养物质, 河口区呈现低盐高营养高初级生产力, 而且西南季风还将促进上升流的形成, 也为浮游植物

的生长带来底层营养物质; 冬季盛行东北季风, 是华南地区旱季, 河口区被高盐低营养低初级生产力取代。另一方面是由于河口上游河道窄、水体流速快、浑浊, 降低了浮游植物的光合作用效率; 随着水体向下游开阔区域移动, 悬浮物的沉积作用增强, 水体透明度逐渐提高, 浮游植物大量繁殖; 水体在继续向滨海输运的过程中营养物质被逐渐消耗, 浮游植物生长从光强限制逐渐转变为营养物质限制, 所以浮游植物最大值一般出现盐度中值区或混合区^[40-41]。

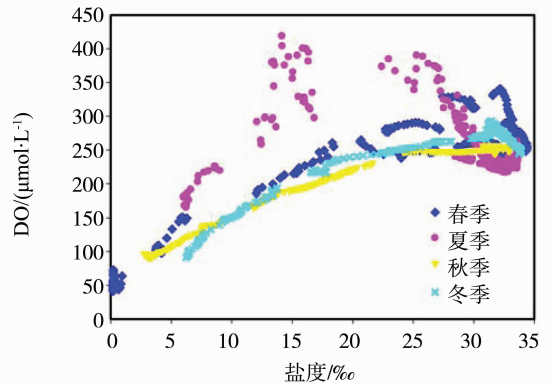


图 6 表层水体盐度与 DO 的关系图

Fig. 6 Relationships between salinity and DO in surface water

3 结论

采用连续观测系统调查了四季珠江口表层水体 $p\text{CO}_2$ 、温度、盐度和溶解氧等, 并分析了 $p\text{CO}_2$ 、盐度和溶解氧的空间分布和季节变化。

1) 珠江口上游表层水体盐度低、 $p\text{CO}_2$ 高、DO 低。春季盐度为 0.19‰时, $p\text{CO}_2$ 高达 717.2 Pa, DO 低至 41.4 $\mu\text{mol/L}$ 。春、夏季香港西侧海域 $p\text{CO}_2$ 低、DO 高, 特别是夏季海域盐度为 15‰~25‰时, 存在 $p\text{CO}_2$ 低值和 DO 高值区, 其中 $p\text{CO}_2$ 最小值为 16.5 Pa, 对应 DO 最大值为 418.8 $\mu\text{mol/L}$ 。

2) 表层水体 $p\text{CO}_2$ 均随盐度的增大而逐渐减小。四季表层水体盐度相同时, $p\text{CO}_2$ 季节变化为夏季 < 春季 < 秋季 < 冬季, 主要由于丰水期径流稀释了风化产物, 且枯水期水体更接近上游区域。

3) 上游水体 $p\text{CO}_2$ 与 DO 几乎呈负直线性相关, 耗氧呼吸消耗氧气、生成 CO_2 , 是维持高 $p\text{CO}_2$ 现象的主要因素。春、夏季入海径流携带的大量营养物质促进了香港西侧海域浮游植物繁殖,

光合作用在吸收 CO₂ 的同时产生大量氧气, 水体 pCO₂ 显著降低、DO 升高。

参考文献:

- [1] CHEN Jiyu, CHEN Shenliang. Estuarine and coastal challenges in China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2002, 20(2): 174–181.
- [2] MACKENZIE F T, LERMAN A, ANDERSSON A J. Past and present of sediment and carbon biogeochemical cycling models[J]. Biogeoscience, 2004, 1: 11–32.
- [3] TAKAHASHI T, SUTHERLAND S C, WANNINKHOF R, et al. Climatological mean and decadal changes in surface ocean pCO₂ and net sea-air CO₂ flux over the global oceans[J]. Deep-Sea Research II, 2009, 56: 554–577.
- [4] BORGES A V, ABRIL G. Carbon dioxide and methane dynamics in estuaries[M] // WOLANSKI E, MCLUSKY D S. Treatise on estuarine and coastal science. New York: Academic Press, 2011: 119–161.
- [5] HOPKINSON C S, SMITH E M. Estuarine respiration: an overview of benthic, pelagic, and whole system respiration, respiration in aquatic ecosystems [M]. New York: Oxford University Press, 2005, 122–147.
- [6] BORGES A V. Do we have enough pieces of the jigsaw to integrate CO₂ fluxes in the coastal ocean? [J]. Estuaries, 2005, 28: 3–27.
- [7] CAI Weijun. Estuarine and coastal ocean carbon paradox: CO₂ sinks or sites of terrestrial carbon incineration? [J]. Annual Review of Marine Science, 2011, 3: 123–145.
- [8] CHEN Chen-tungarthur, HUANG Tinghsuan, FU Yuhan, et al. Strong sources of CO₂ in upper estuaries become sinks of CO₂ in large river plumes[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2012, 4: 179–185.
- [9] 焦树林, 高全洲, 刘昆. 西江磨刀门水道枯季咸淡水混合特征和二氧化碳分压分布[J]. 海洋学报, 2009, 6(31): 40–47.
- [10] 唐文魁, 高全洲. 河口二氧化碳水—气交换研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(9): 1007–1014.
- [11] CAI Weijun, WANG Yongchen. The chemistry, fluxes, and sources of carbon dioxide in the estuarine waters of the Satilla and Altamaha Rivers, Georgia[J]. Limnology and Oceanography, 1998, 43(4): 657–668.
- [12] ABRIL G, ETCHEBER H, DELILLE B, et al. Carbonate dissolution in the turbid and eutrophic Loire estuary [J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, 259: 129–138.
- [13] NEAL C. Calcite saturation in eastern UK rivers[J]. Science of the Total Environment, 2002, 282: 311–326.
- [14] LIU Zhiyuan, ZHANG Longjun, CAI Weijun, et al. Removal of dissolved inorganic carbon in the Yellow River Estuary [J]. Limnology and Oceanography, 2014, 59(2): 413–426.
- [15] ZHAI Weidong, CAI Weijun, WANG Yongchen, et al. High partial pressure of CO₂ and its maintaining mechanism in a subtropical estuary: the Pearl River estuary, China[J]. Marine Chemistry, 2005, 93: 21–32.
- [16] ZHAI Weidong, DAI Minhan, GUO Xianghui. Carbonate system and CO₂ degassing fluxes in the inner estuary of Changjiang (Yangtze) River, China [J]. Marine Chemistry, 2007, 107: 342–356.
- [17] 曹建华, 杨慧, 康志强. 区域碳酸盐岩溶蚀作用碳汇通量估算初探: 以珠江流域为例[J]. 科学通报, 2011, 56(26): 2181–2187.
- [18] 赵焕庭. 珠江河口演变[M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 106–110.
- [19] YIN Kedong, QIAN Peiyuan, CHEN Jayc, et al. Dynamics of nutrients and phytoplankton biomass in the Pearl River estuary and adjacent waters of Hong Kong during summer: Preliminary evidence for phosphorus and silicon limitation[J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, 194: 295–305.
- [20] 马玉, 李团结, 刘长建, 等. 珠江口表层沉积物常量元素特征及其地球化学意义[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2012, 2(51): 125–130.
- [21] SU Jilan. Overview of the South China Sea circulation and its influence on the coastal physical oceanography outside the Pearl River Estuary [J]. Continental Shelf Research, 2004, 24: 1745–1760.
- [22] WEISS R F, PRICE R A. Nitrous oxide solubility in water and seawater [J]. Marine Chemistry, 1980, 8: 347–359.
- [23] 翟惟东. 南海北部与珠江河口水域 CO₂ 通量及其调控因子[D]. 厦门: 厦门大学, 2003: 36–38.
- [24] GUO Xianghui, DAI Minhan, ZHAI Weidong, et al. CO₂ flux and seasonal variability in a large subtropical estuarine system, the Pearl River Estuary, China [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: 1–14.
- [25] DAI Minhan, ZHAI Weidong, CAI Weijun, et al. Effects of an estuarine plume-associated bloom on the carbonate system in the lower reaches of the Pearl River estuary and the coastal zone of the northern South China Sea [J]. Continental Shelf Research, 2008, 28: 1416–1423.
- [26] LEFEVRE N, DIVERRES D, GALLOIS F. Origin of CO₂ undersaturation in the western tropical Atlantic [J]. Tellus B, 2010, 62(1): 595–607.

- [27] CAI Weijun, CHEN Chen-tungarthur, BORGES A. Carbon dioxide dynamics and fluxes in coastal waters influenced by river plumes[M] // Biogeochemical dynamics at major river-coastal interfaces: Linkages with global change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 155 - 173.
- [28] XU Jie, YIN Kedong, LEE J H W, et al. Resistance of Hong Kong waters to nutrient enrichment: assessment of the role of physical processes in reducing eutrophication [J]. *Journal of Oceanography*, 2012, 68: 545 - 560.
- [29] LU Fenghui, NI Honggang, LIU Feng, et al. Occurrence of nutrients in riverine runoff of the Pearl River Delta, South China [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376: 107 - 115.
- [30] DAI Minhan, GUO Xianghui, ZHAI Weidong, et al. Oxygen depletion in the upper reach of the Pearl River estuary during a winter drought [J]. *Marine Chemistry*, 2006, 102: 159 - 169.
- [31] 李岩, 张龙军, 苏征, 等. 长江口淡水端淡、盐水混合表层 $p\text{CO}_2$ 的急剧变化及其影响机制 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2006, 36: 295 - 298.
- [32] GUO Xianghui, CAI Weijun, ZHAI Weidong, et al. Seasonal variations in the inorganic carbon system in the Pearl River (Zhujiang) estuary [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 1424 - 1434.
- [33] BOUILLON S, YAMBELE A, SPENCER R G M, et al. Organic matter sources, fluxes and greenhouse gas exchange in the Oubangui River (Congo River basin) [J]. *Biogeochemistry*, 2012, 9: 2045 - 2062.
- [34] GUO Xianghui, CAI Weijun, HUANG Weijun, et al. Carbon dynamics and community production in the Mississippi River plume [J]. *Limnology and Oceanography*, 2012, 57(1): 1 - 17.
- [35] RABALAIS N N, DIAZ R J, LEVIN L A, et al. Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 7: 585 - 619.
- [36] TURNER R E, RABALAIS N N, JUSTIC D. Predicting summer hypoxia in the northern Gulf of Mexico: Redux [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64: 319 - 324.
- [37] DAI Minhan, WANG Lifang, GUO Xianghui, et al. Nitrification and inorganic nitrogen distribution in a large perturbed river/estuarine system: The Pearl River Estuary, China [J]. *Biogeochemistry*, 2008, 5(9): 1227 - 1244.
- [38] MANN K H, LAZIER J R N. Dynamics of marine ecosystems: Biological-physical interactions in the oceans [M]. Blackwell Scientific Publications, 2006, 496.
- [39] YIN Kedong. Monsoonal influence on seasonal variations in nutrients and phytoplankton biomass in coastal waters of Hong Kong in the vicinity of the Pearl River estuary [J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 2002, 245: 111 - 122.
- [40] YIN Kedong, HARRISON P J. Nitrogen over enrichment in subtropical Pearl River estuarine coastal waters: possible causes and consequences [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 1435 - 1442.
- [41] ZHOU Weihua, YIN Kedong, HARRISON P J, et al. The influence of late summer typhoons and high river discharge on water quality in Hong Kong waters [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 111: 35 - 47.