

黄河河流水体二氧化碳分压及其影响因素分析

苏 征, 张龙军, 王晓亮

(中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003)

摘要 根据 2003 年秋季黄河河流水体二氧化碳分压($p(\text{CO}_2)$)的实测数据, 结合水文、化学和生物等要素的同步观测资料, 对河流水体 $p(\text{CO}_2)$ 的影响因素进行了探讨。研究结果表明: 生物好氧呼吸作用不是影响河流水体 $p(\text{CO}_2)$ 的主要因素, 黄河河流 $p(\text{CO}_2)$ 的高低主要受水体碳酸盐系统的控制。

关键词: 黄河; 二氧化碳分压 ($p(\text{CO}_2)$); 影响因素

中图分类号: P592 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2005)04-0041-04

陆地生态系统碳循环及其驱动机制的研究是全球变化科学中的一个重要组成部分, 是预测未来大气 CO_2 和认识大气圈与生物圈的相互作用等科学问题的关键。陆地生态系统的碳循环是一个开放系统, 体现在通过陆地、湖泊、河流与大气 CO_2 的交换, 以及通过河流作用向海洋的直接碳运输。因此, 研究河流的碳运输量及碳运输规律, 对于深入系统理解陆地生态系统的碳循环过程, 总体把握陆地的碳收支状况是非常重要的。

目前河流二氧化碳分压 $p(\text{CO}_2)$ 通过两种方式获得, 一是由 pH, ALK 等参数计算得到^[1,2], 二是进行直接观测^[3-6]。由 pH, ALK 等参数计算所得的误差很大, 直接观测取得 $p(\text{CO}_2)$ 数据是非常重要的^[7]。在已有的河流水体 CO_2 影响因素的报道中, 呼吸作用是维持亚马逊河与珠江口 $p(\text{CO}_2)$ 的主要机制^[5,6]; 光合作用和呼吸作用同时影响着泰晤士河的 $p(\text{CO}_2)$ ^[1]; 而呼吸作用和矿物风化控制了渥太华河的 $p(\text{CO}_2)$ ^[2]。

黄河是世界著名大河, 流域面积 79.5 万 km^2 , 平均含沙量高达 $35\text{kg}/\text{m}^3$, 在世界大江大河中居首位。高的泥沙含量使黄河水体具有不同于其它河流的特殊性质。然而, 目前没有对黄河流域 $p(\text{CO}_2)$ 进行的研究。作者根据黄河河流水体 $p(\text{CO}_2)$ 现场调查资料, 结合水文、化学和生物等要素的同步观测资料, 分析了黄河河流 $p(\text{CO}_2)$ 的影响因素。

1 实验部分

1.1 站位布设

作者所用数据于 2003 年 10 月 25 日至 10 月 31 日观测得到, 由于黄河不通航, 本次调查采用设站的办法, 站位布设如图 1 所示。上游选择位于兰州的新城和白石桥两站, 中游选择潼关、三门峡、小浪底和花园口, 下游选择利津站, 并根据河宽和水流情况每个站选择 2 或 3 个采样点。

1.2 采样及分析方法

由于黄河水泥沙含量高, 不宜用 Cooper^[8] 的层流式平衡器, 而用改进的喷淋-鼓泡式平衡器^[9]—非分散红外检测器 (LI-7000) 系统进行分析。改进的喷淋-鼓泡式平衡器与层流式平衡器之间无显著性

收稿日期: 2005-01-04; 修回日期: 2005-02-04

基金项目: 973 国家重点基础研究发展规划项(2002CB412501)

作者简介: 苏征 (1979-), 男, 山东平度人, 硕士研究生, 主要从事陆地生态系统碳循环研究, 电话: 0532-2031060, E-mail: suzheng17@sina.com; 张龙军, 通讯作者, 男, 教授, 博导, 主要从事海洋环境科学的研究

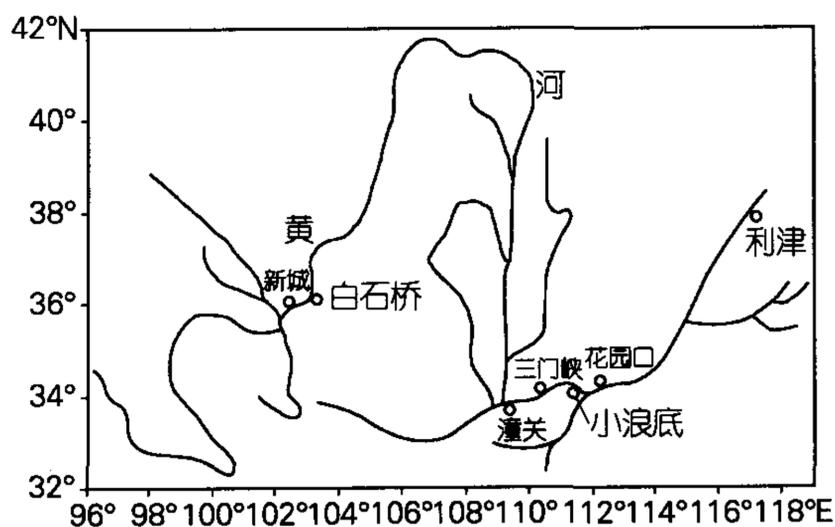


图1 调查站位分布

Fig.1 Location of station

差异, 测定 $p(\text{CO}_2)$ 的精密密度小于 1%, 并成功地用于东海西部表层水 $p(\text{CO}_2)$ 的研究^[10]。采样时, 尽量选择城市或污染源的上游, 选择河流中部或河流的主流, 借助各地水文站采水缆绳或船只, 用 Rosette 采水器采集表层水。溶解氧分析采用 Winkler 法现场滴定, 溶解无机碳($D(\text{IC})$)的测定用日本岛津公司的 TOC 分析仪。

2 结果与讨论

2.1 黄河河流水体 $p(\text{CO}_2)$

黄河河流各调查站点 $p(\text{CO}_2)$ 平均值为 1342.0 μatm , 最高值出现在潼关站, 为 1616.8 μatm , 最低值出现在利津站, 为 1172.0 μatm , 确良其 $p(\text{CO}_2)$ 值在世界主要河流中处于中等偏下的水平。值得注意的是, 黄河河流水体的 $D(\text{IC})$ 却高达 3.00 ~ 3.69 mmol/L , 普遍高于世界其它河流。如密西西比河 $D(\text{IC})$ 为 2.2~2.9 mmol/L ^[11]; 亚马逊河 $D(\text{IC})$ 约为 0.6 mmol/L ^[12]; 而珠江的 $D(\text{IC})$ 只有 1.0 mmol/L ^[13]。

2.2 黄河河流 $p(\text{CO}_2)$ 的影响因素

2.2.1 超额 CO_2 ($\Delta(\text{CO}_2)$) 与表观耗氧量 ($A(\text{OU})$)

在富含 HCO_3^- 的水体中, 生物好氧呼吸作用若按照经典的 Redfield 比进行, $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}\text{H}_3\text{PO}_4 + 138\text{O}_2 + 18\text{HCO}_3^- = 124\text{CO}_2 + 140\text{H}_2\text{O} + 16\text{NO}_3^- + \text{HPO}_4^{2-}$, 产生的 CO_2 和消耗的 O_2 之间的比值为: $124/138 \approx 0.90$, 产生的 CO_2 用超额 CO_2 来表示, 即水体实测 CO_2 与平衡值的差值; 与 $\Delta(\text{CO}_2)/A(\text{OU})$ 关系密切的颗粒有机碳($p(\text{OC})$)的消耗与 $A(\text{OU})$ 之间的比率都落在 0.62~0.79 范围内^[14,15], 因此可以把 0.90 和 0.62

分别作为生物耗氧呼吸作用产生的 CO_2 和消耗的 O_2 之间比值的上下限。导致美国萨蒂拉河口存在较低的溶解氧和较高的 $p(\text{CO}_2)$ 的原因是潮汐湿地的呼吸作用^[16], 该河口 $\Delta(\text{CO}_2)/A(\text{OU})$ 值约为 0.76, 刚好落在上述范围内。

黄河干流和库区的超额 CO_2 与 $A(\text{OU})$ 呈良好的正相关 (图 2,3), 其比值 $\Delta(\text{CO}_2)/A(\text{OU})$ 分别为 0.16 和 0.28, 远小于理论下限 0.62, 说明生物好氧呼吸作用不是影响黄河河流 $p(\text{CO}_2)$ 的主要因素。库区的 $\Delta(\text{CO}_2)/A(\text{OU})$ 0.28 要大于干流的 0.16, 说明水体相对静止的库区好氧呼吸对 $p(\text{CO}_2)$ 的影响要远大于干流。

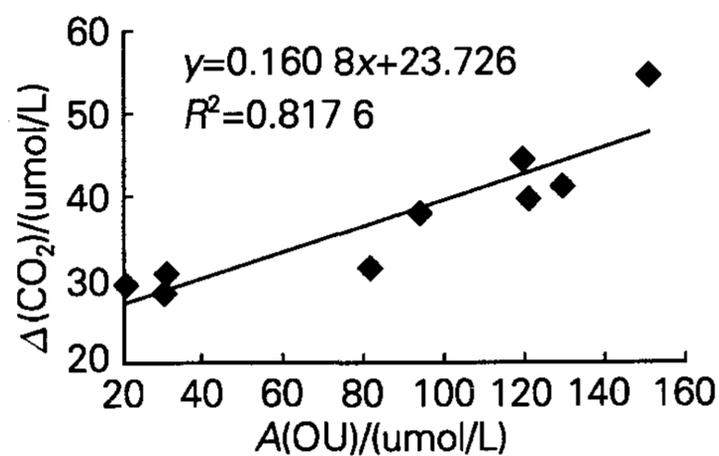


图2 干流超额 CO_2 与 $A(\text{OU})$ 关系

Fig.2 Excess CO_2 versus $A(\text{OU})$ in mainstream

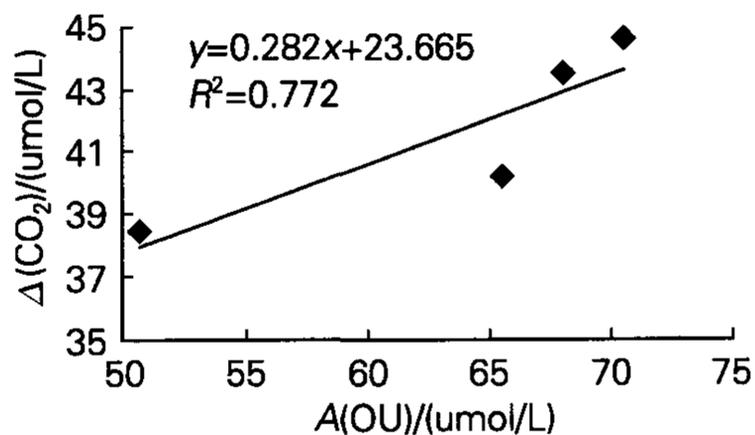


图3 库区超额 CO_2 与 $A(\text{OU})$ 关系

Fig.3 Excess CO_2 versus $A(\text{OU})$ in reservoir

2.2.2 河流水体碳酸盐系统

黄河流域碳酸盐和蒸发盐的溶解是最主要的化学风化过程, 硅酸盐的风化微弱。黄河水体的 HCO_3^- 90% 来自碳酸盐的风化作用、10% 来自硅酸盐的风化作用^[17]。风化作用是岩石组成、径流、地势、气候、植被等自然因素的函数, 同时也受人为因素的干扰。本次调查黄河河流水体的 $D(\text{IC})$ 高达 3.00~3.69 mmol/L , 这与处在亚热带的珠江和热带地区的亚马逊碳酸盐河不同, 反映了各种气候带不同的

风化强度。黄河流域主要的风化反应为： $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (白云岩)+ $2\text{H}_2\text{O}+2\text{CO}_2=\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+4\text{HCO}_3^-$ 和 CaCO_3 (方解石)+ $\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2=\text{Ca}^{2+}+2\text{HCO}_3^-$ ，黄河干流和库区的 $p(\text{CO}_2)$ 与 $D(\text{IC})$ 均呈良好的正相关 (图 4,5)，反映了水体 HCO_3^- 通过上述反应平衡影响 $p(\text{CO}_2)$ 的高低。而且干流 $p(\text{CO}_2)$ 与 $D(\text{IC})$ 相关性直线的斜率要大于库区，说明泥沙含量较高的干流 $p(\text{CO}_2)$ 受水体碳酸盐系统的影响程度高于库区。黄土高原是黄河泥沙的主要来源区，富含碳酸钙是黄土的一大特征，黄土中碳酸钙含量大于 10%^[18]，因此高的泥沙含量对水体的碳酸盐平衡有较强的缓冲能力。黄河泥沙主要来源黄土的 pH 为 7.5~8.6，黄河水体的 pH 为 7.5~8.5 与之吻合^[19] 可以作为泥沙影响黄河水体碳酸盐平衡的佐证。综上所述，黄河河流 $p(\text{CO}_2)$ 应该受水体碳酸盐系统的控制。

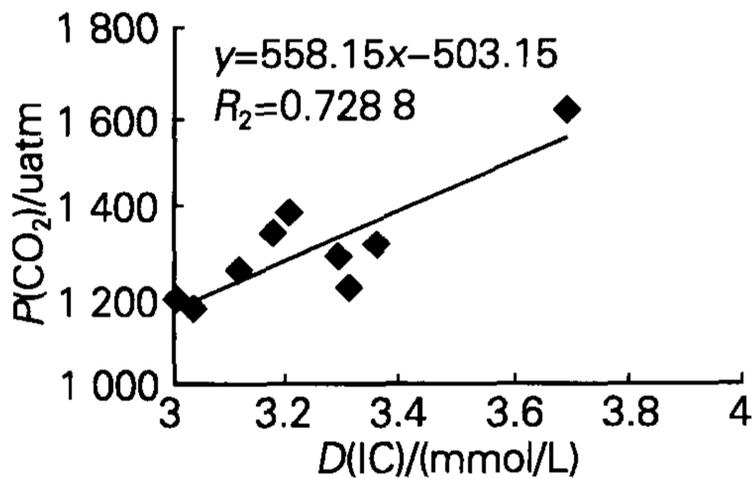


图 4 干流 $p(\text{CO}_2)$ 与 $D(\text{IC})$ 关系

Fig.4 $p(\text{CO}_2)$ versus $D(\text{IC})$ in mainstream

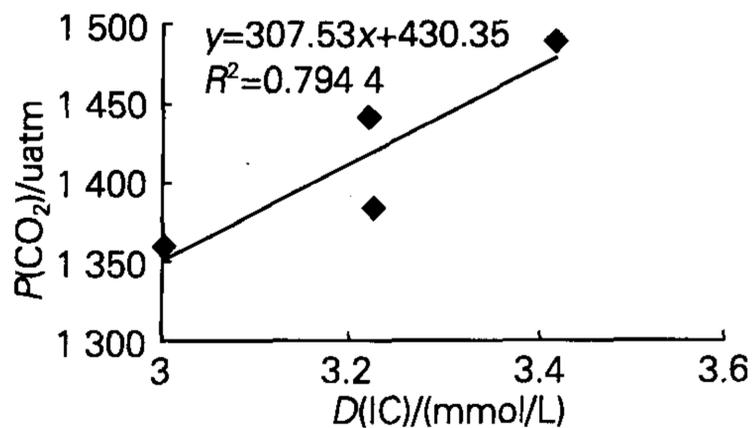


图 5 库区 $p(\text{CO}_2)$ 与 $D(\text{IC})$ 关系

Fig.5 $p(\text{CO}_2)$ versus $D(\text{IC})$ in reservoir

而对于受呼吸作用控制水体 $p(\text{CO}_2)$ 的河流来说， $p(\text{CO}_2)$ 与 $D(\text{IC})$ 是呈负相关关系的，如珠江口^[6]；受光合作用和呼吸作用影响的太晤士河和受呼吸作用和矿物风化控制的渥太华河， $p(\text{CO}_2)$ 与 $D(\text{IC})$ 则

无任何相关性^[1,2]。因此，处于北温带，而且高泥沙含量的黄河，水体 $p(\text{CO}_2)$ 的影响因素是具有其特殊性的。

3 结论

黄河河流 $p(\text{CO}_2)$ 值在世界主要河流中处于中等偏下的水平，在 1100.0~1700.0uatm 之间，平均值为 1342.0uatm； $D(\text{IC})$ 含量高达 3.00~3.69mmol/L，普遍高于世界其它河流。影响水体 $p(\text{CO}_2)$ 的主要因素不是生物好氧呼吸作用，这一点不同于泰晤士河、亚马逊河等世界其它主要河流，黄河河流 $p(\text{CO}_2)$ 的高低主要受水体碳酸盐系统的控制。

参考文献：

- [1] Colin N, Martin H, Richard J W. Dissolved carbon dioxide and oxygen in the River Thames: Spring-summer 1997[J]. *The Science of the Total Environment*, 1998, 210/211: 205-217.
- [2] Kevin T, Jan V. Carbon fluxes, $p\text{CO}_2$ and substrate weathering in a large northern river basin, Canada: carbon isotope perspectives[J]. *Chemical Geology*, 1999, 159: 61-68.
- [3] Peter A R, James E B, Jonathan J C. Atmospheric CO_2 evasion, dissolved inorganic carbon production, and net heterotrophy in the York River estuary[J]. *Limnol Oceanogr*, 2000, 45(8): 1707-1717.
- [4] Wang Z A, Cai W J. Carbon dioxide degassing and inorganic carbon export from a marsh-dominated estuary (the Duplin River): A marsh CO_2 pump[J]. *Limnol Oceanogr*, 2004, 49(2): 341-354.
- [5] Richey J E, Melack J M, Aufdenkampe A K, et al. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO_2 [J]. *Nature*, 2002, 416: 617-620.
- [6] Zhai W D, Dai M H, Cai W J, et al. High partial pressure of CO_2 and its maintaining mechanism in a subtropical estuary: the Pearl River estuary, China[J]. *Marine Chemistry*, 2005, 93: 21-32.
- [7] 胡敦欣, 杨作升. 东海海洋通量关键过程[M]. 北京: 海洋出版社, 2001. 142.
- [8] Cooper D J, Watson A J, Ling R D. Variation of $p\text{CO}_2$ along a North Atlantic shipping route (U.K. to Caribbean): A year of automated observations[J]. *Marine Chemistry*,

- 1998, 60: 147–164.
- [9] 王峰,张龙军,王彬宇等. 改进的喷淋-鼓泡式平衡器 GC 法测定海水中的 $p\text{CO}_2$ [J]. 分析科学学报, 2002, 18: 66–69.
- [10] 谭燕,张龙军,王凡, 等.夏季东海西部表层海水的 $p\text{CO}_2$ 及海-气界面通量[J]. 海洋与湖沼,2004, 35: 239–245.
- [11] Cai W J. Riverine inorganic carbon flux and rate of biological uptake in the Mississippi River plume[J]. *Geophysical Research Letter*,2003, 30 (2): 1 032.
- [12] Ternon J F,Oudot C,Dessier A,*et al.* A seasonal tropical sink for atmospheric CO_2 in the Atlantic Ocean: the role of the Amazon River discharge[J]. *Marine Chemistry*, 2000, 68: 183–201.
- [13] Cai W J,Dai M H ,Wang Y C,*et al.* The biogeochemistry of inorganic carbon and nutrients in the Pearl River estuary and the adjacent Northern South China Sea[J]. *Continental Shelf Research*,2004,24: 1 301–1 319.
- [14] Chen C T A,Lin C,Huang B,*et al.* Stoichiometry of carbon hydrogen nitrogen sulfur and oxygen in the particulate matter of the western North Pacific marginal seas[J]. *Marine Chemistry*, 1996, 54: 179–190.
- [15] Hedges J I.The biochemical and elemental compositions of marine plankton:A NMR perspective[J]. *Marine Chemistry*, 2002, 78: 47–63.
- [16] Cai W J,Lawrence R P,Mary A M,*et al.*Oxygen and carbon dioxide mass balance for the estuarine-intertidal marsh complex of five rivers in the southeastern U.S. [J].*Limnol Oceanogr* ,1999 ,44(3): 639–649.
- [17] 李晶莹,张经. 黄河流域化学风化作用与大气 CO_2 的消耗[J]. 海洋地质与第四纪地质,2003, 23(2): 43–49.
- [18] 吴明清,文启忠,潘景瑜, 等.黄河中游地区马兰黄土主要化学成分的再研究[J].自然科学进展,1996,6(1): 80–85.
- [19] 赵沛伦,申献辰,夏军, 等. 泥沙对黄河水质影响及重点河段水污染控制[M]. 郑州:黄河水利出版社,1998.11

Influencing factors of partial pressure of CO_2 in Huanghe (Yellow) River

SU Zheng, ZHANG Long-jun, WANG Xiao-liang

(College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China ,Qingdao, 266003, China)

Received: Jan.,4,2005

Key words: yellow river; partial pressure of CO_2 ($p(\text{CO}_2)$); factors

Abstract: In combination with the data in hydrology,chemistry and biology,the partial pressure of CO_2 ($p(\text{CO}_2)$) of Huanghe River were studied based on the data collected in autumn, 2003 to determine major factors that impact the $p(\text{CO}_2)$.The results indicate that the $p(\text{CO}_2)$ was controlled by the carbonate system in the river instead of by biological aerobic respiration.

(本文编辑: 刘珊珊)