

学校编码: 10384

密级_____

学号: 33120121151658

廈門大學

硕士学位论文

东海陆架水体季节尺度和季节内短时间
尺度 CO₂ 动态变化研究—基于浮标观测

Seasonal and intra-seasonal dynamics of sea surface

pCO₂ on the mid-shelf of the East China Sea:

buoy-based time series observations

吴瀛旭

指导教师姓名: 戴民汉 教授

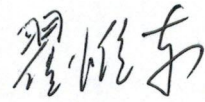
专业名称: 环境科学

论文提交日期: 2015 年 6 月

论文答辩时间: 2015 年 6 月

答辩委员会主席：

翟惟东 研究员
(国家海洋环境监测中心)



答辩委员会委员：

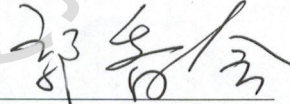
张远辉 研究员
(国家海洋局第三海洋研究所)



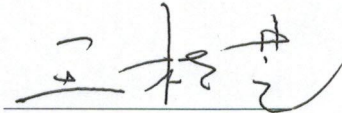
高众勇 研究员
(国家海洋局第三海洋研究所)



郭香会 副教授
(厦门大学海洋与地球学院)

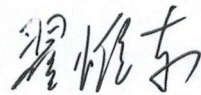


王桂芝 副教授
(厦门大学海洋与地球学院)

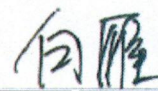


论文评阅人：

翟惟东 研究员
(国家海洋环境监测中心)

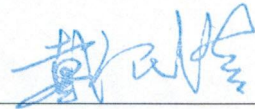


白雁 研究员
(国家海洋局第二海洋研究所)



硕士学位论文指导教师：

戴民汉 教授
(厦门大学海洋与地球学院)



日期：

2015年6月13日

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(厦门大学海洋碳循环)课题(组)的研究成果,获得(海洋碳循环)课题(组)经费或实验室的资助,在(海洋碳循环)实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于
年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目录

图表目录	VIII
摘要.....	XII
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 海洋碳酸盐系统	2
1.2.1 海水碳酸盐体系的调控机制	3
1.2.2 海水碳酸盐体系的时空变异性	4
1.3 全球海-气 CO ₂ 通量	5
1.4 时间序列观测海表 pCO ₂ 动态变化的研究现状	7
1.5 现有研究的不足	13
1.6 主要科学问题和研究内容	13
1.7 论文框架	14
第 2 章 研究区域和方法	15
2.1 研究区域概况	15
2.2 材料与方法	16
2.2.1 浮标平台	16
2.2.2 Battelle-CO ₂ 系统	17
2.2.3 pH 传感器	20
2.2.4 其他传感器	20
2.2.5 浮标观测与现场观测数据的比对	21
2.3 数据处理方法	24
2.3.1 温度对 pCO ₂ 的影响	24

2.3.2 海-气 CO ₂ 通量的计算.....	24
2.3.3 海-气 CO ₂ 交换停留时间.....	24
2.3.4 误差传递.....	26
第 3 章 海表 pCO₂ 季节变化和季节内短时间尺度变化特征及调控机制.....	27
3.1 海表 pCO ₂ 季节变化特征及调控机制	27
3.1.1 海表 pCO ₂ 及其他相关参数的季节变化特征.....	27
3.1.2 海表 pCO ₂ 季节变化的主要调控机制.....	33
3.2 海表 pCO ₂ 季节内短时间尺度变化特征及调控机制	45
3.2.1 海表 pCO ₂ 及其他相关参数季节内短时间尺度变化特征.....	45
3.2.2 海表 pCO ₂ 季节内短时间尺度变化的主要调控机制.....	50
3.3 海-气 CO ₂ 通量的季节变化特征	51
3.4 海表 pCO ₂ 和海气 CO ₂ 通量不确定性评估.....	53
3.4.1 海表 pCO ₂ 时间变异所导致不确定性的评估.....	54
3.4.2 不同参数时间变异对海气 CO ₂ 通量的影响.....	56
3.5 小结.....	57
第 4 章 海表 pCO₂ 动态变化及海-气 CO₂ 通量对台风事件的响应..	59
4.1 台风信息概括	60
4.2 海表 pCO ₂ 及其他参数对台风事件的响应	62
4.3 台风后海表 pCO ₂ 的恢复过程	68
4.4 海-气 CO ₂ 通量对台风事件的响应	70
4.5 小结.....	72
第 5 章 总结与展望	74
5.1 论文总结.....	74

5.2 工作展望	76
参考文献	77
致谢	88
附录	90

厦门大学博硕士论文摘要库

Contents

Figures and Tables.....	X
Abstract.....	XIV
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background.....	1
1.2 The marine carbonate system.....	2
1.2.1 Control of the marine carbonate system	3
1.2.2 Variability of the marine carbon system.....	4
1.3 Global synthesis of air-sea CO ₂ flux	5
1.4 Research progress in dynamics of <i>p</i> CO ₂ based on time-series study.....	7
1.5 Deficiencies of current research	13
1.6 Scientific questions and research contents	13
1.7 Structure	14
Chapter 2 Study area and Methodology.....	15
2.1 Study area.....	15
2.2 Material and Method	16
2.2.1 Buoy platform.....	16
2.2.2 Battelle-CO ₂ system	17
2.2.3 pH sensor	20
2.2.4 Other sensors	20
2.2.5 Comparison between buoy and shipboard observation	21
2.3 Data processing	24
2.3.1 Temperature effect on <i>p</i> CO ₂	24
2.3.2 Sea-air CO ₂ flux estimation.....	24
2.3.4 Sea-air CO ₂ gas exchange equilibration timescale	24

2.3.5 Propagation of error	26
Chapter 3 Seasonal and short-term dynamics of $p\text{CO}_2$ and its controls	27
3.1 Seasonal dynamics of $p\text{CO}_2$ and controls	27
3.1.1 Seasonal dynamics of $p\text{CO}_2$ and other parameters	27
3.1.3 Seasonal controls of $p\text{CO}_2$	33
3.2 Intra-seasonal dynamics of $p\text{CO}_2$ and controls	45
3.2.1 Intra-seasonal dynamics of $p\text{CO}_2$ and other parameters	45
3.2.2 Intra-seasonal controls of $p\text{CO}_2$	50
3.3 Seasonal variation of sea-air CO_2 fluxes	51
3.4 Uncertainty assessments of $p\text{CO}_2$ and CO_2 flux	53
3.4.1 Uncertainty assessment of $p\text{CO}_2$	54
3.4.2 Uncertainty assessments of CO_2 flux	56
3.5 Summary	57
Chapter 4 Response of sea surface $p\text{CO}_2$, CO_2 flux and other parameters to typhoon events	59
4.1 Overview of typhoon events	60
4.2 Response of sea surface $p\text{CO}_2$ and other parameters to typhoon	62
4.3 Recovery of sea surface $p\text{CO}_2$ after typhoon	68
4.4 Response of CO_2 flux to typhoon	70
4.5 Summary	72
Chapter 5 Conclusions and research prospect	74
5.1 Conclusions	74
5.2 Pending questions and research prospect	76
Reference	77
Acknowledgement	88

Appendix.....90

厦门大学博硕士学位论文摘要库

图表目录

图 1-1 以不同证据源的全球 CO ₂ 累积排放总量与全球平均表面升温图 (IPCC, 2013)	1
图 1-2 表层海水 $p\text{CO}_2$ (等值线, μatm) 随碱度和总溶解无机碳变化趋势.....	4
图 1-3 全球年平均海气 CO ₂ 通量.....	6
图 1-4 全球 CO ₂ 时间序列观测站.....	7
图 2-1 东海 (左图) 和研究区域 (右图, “五角星” 表示观测站位)	16
图 2-2 浮标平台 (左图), 仪器舱 (右上) 和设备安装井 (右下)	17
图 2-3 Battelle-CO ₂ 系统.....	18
图 2-4 水气平衡器/空气模块 (左图) 和 “h” 型水气平衡管路 (右图)	19
图 2-5 基于浮标观测与船载观测的海表 CO ₂ 分压结果比对.....	23
图 3-1 浮标观测数据	30
图 3-2 观测区域四季海表 $p\text{CO}_2$ 与海表温度关系图.....	33
图 3-3 观测区域夏季海表温度和盐度分布图.....	34
图 3-4 实测值与根据 CO ₂ SYN 计算的模型预测值之间的关系图	36
图 3-5 观测区域夏季无台风期间表层海水 DIC (a) 和 $p\text{CO}_2$ (b) 日变化受物理混合和生物作用影响情况	38
图 3-6 观测区域秋季海表温度盐度结合 $p\text{CO}_2$ 分布图.....	39
图 3-7 观测区域秋季海气 CO ₂ 交换恢复平衡期间海表 $p\text{CO}_2$ 与海表温度关系图	40
图 3-8 观测区域冬季海表 $p\text{CO}_2$ 及温盐变化图.....	41
图 3-9 观测区域冬季海表温度盐度结合 $Np\text{CO}_2$ 分布图	43
图 3-10 观测区域春季海表温度盐度结合 $Np\text{CO}_2$ 分布图	44
图 3-11 观测点夏季海表 $p\text{CO}_2$ 及其他相关参数周日变化.....	47
图 3-12 观测点冬季海表 $p\text{CO}_2$ 及其他相关参数周日变化.....	49
图 3-13 夏季和冬季观测点海表 $p\text{CO}_2$, $Np\text{CO}_2$ 和 $Tp\text{CO}_2$ 的日变幅.....	50
图 3-14 观测点海气 CO ₂ 通量.....	53
图 4-1 观测区域夏秋季台风路径图.....	61
图 4-2 观测区域海表 $p\text{CO}_2$ 及其他相关参数对台风的响应.....	62

图 4-3 台风（黄色代表 T1215，蓝色代表 T1214）对海表 $p\text{CO}_2$ 和其他相关参数的影响	64
图 4-4 台风期间风速风向变化图	65
图 4-5 台风前后观测区域风场及水团混合示意图	65
图 4-6 台风后观测区域海表 $p\text{CO}_2$ 的恢复过程	67
图 4-7 台风 T1215 (A) 和 T1214 (B) 期间风速，海表 $p\text{CO}_2$ ，大气 $p\text{CO}_2$ 对海气 CO_2 通量变化的贡献	71
表 1-1 不同区域海表 $p\text{CO}_2$ 在不同时间尺度的变化	10
表 2-1 观测站位 (124.5 E 31 N) 浮标观测与船载观测结果比对	22
表 2-2 2013 年 7 月 Battle- CO_2 系统现场校验结果	23
表 3-1 海表 $p\text{CO}_2$ 和其他相关参数季节变化统计结果	31
表 3-2 观测点海表 $p\text{CO}_2$ 和其他相关参数月均值和月平均日变幅统计结果	32
表 3-3 海表 $p\text{CO}_2$ 时间变异对其测定和海气 CO_2 通量估算的影响	55
表 3-4 海表 $p\text{CO}_2$ 、大气 $p\text{CO}_2$ 和风速时间变异对海气 CO_2 通量估算的影响 ...	56

Figures and Tables

Fig. 1-1 Global mean surface temperature increases as a function of cumulative total global CO₂ emissions from various lines of evidence (IPCC, 2013) ...	1
Fig. 1-2 Surface ocean <i>p</i>CO₂ (contours, μatm) as a function of TA and DIC	4
Fig. 1-3 Global map of air-sea CO₂ fluxes	6
Fig. 1-4 Overview of global CO₂ Time-series and Moorings Project	7
Fig. 2-1 Map of the East China Sea (left) and the study site (right, red star) where the buoy is deployed.....	16
Fig. 2-2 Buoy platform (left), equipment cabin (upper right) and equipment installation well (lower right)	17
Fig. 2-3 Battelle-CO₂ system	18
Fig. 2-4 Equilibrator/Airblock (left) and the “h” shaped tube (right)	19
Fig. 2-5 Comparison between buoy-based and shipboard observations.....	23
Fig. 3-1 Buoy observation data	30
Fig. 3-2 Relationship between sea surface <i>p</i>CO₂ and SST at the study site.....	33
Fig. 3-3 Sea surface T-S diagram at the study site during summer.....	34
Fig. 3-4 Relationship between observed values and calculated values using CO₂SYS	36
Fig. 3-5 Mixing and biological contributions to diurnal variations in sea surface DIC (a) and <i>p</i>CO₂ (b) during the non-typhoon period at the study site ...	38
Fig. 3-6 Sea surface T-S diagram with <i>p</i>CO₂ in autumn at the study site.....	39
Fig. 3-7 Relationship between sea surface <i>p</i>CO₂ and SST during the sea-air reequilibration of CO₂ in autumn at the study site	40
Fig. 3-8 Variations of sea surface <i>p</i>CO₂, SST and SSS in winter at the study site	41
Fig. 3-9 Sea surface T-S diagram with <i>N_p</i>CO₂ in winter at the study site	43
Fig. 3-10 Sea surface T-S diagram with <i>N_p</i>CO₂ in winter at the study site	44
Fig. 3-11 Diurnal variations of sea surface <i>p</i>CO₂ and other related parameters in summer at the study site.....	47
Fig. 3-12 Diurnal variations of sea surface <i>p</i>CO₂ and other related parameters in summer at the study site.....	49
Fig. 3-13 Diurnal variations of sea surface <i>p</i>CO₂, <i>N_p</i>CO₂, and <i>T_p</i>CO₂ at the study site in summer (a) and winter (b)	50

Fig. 3-14 Sea-air CO₂ flux at the study site.....	53
Fig. 4-1 Typhoon tracks during summer and autumn at the study site	61
Fig. 4-2 Overview of responses of sea surface <i>p</i>CO₂ and other related parameters to the typhoon events at the study site	62
Fig. 4-3 Influence of typhoons (the yellow box represents T1215 and the blue box represents T1214) on sea surface <i>p</i>CO₂ and other related parameters.....	64
Fig. 4-4 Wind direction and wind velocity during the typhoon events	65
Fig. 4-5 Schematic diagram of wind field and water mixing before and after a typhoon at the study site.....	65
Fig. 4-6 The recovery of sea surface <i>p</i>CO₂ after typhoon events at the study site	67
Fig. 4-7 Contributions of wind speed (green triangle), <i>p</i>CO_{2,sw} (red square) and <i>p</i>CO_{2,atm} (blue circle) to the change in CO₂ flux (grey line) during the typhoons: (A) T1215, (B) T1214.....	71
Table 1-1 Variations of sea surface <i>p</i>CO₂ on different time scales in different areas	10
Table 2-1 Comparison between buoy observation and shipboard measurements at the study site (124.5°E 31°N).....	22
Table 2-2 Field calibration of Battelle-CO₂ system in July 2013	23
Table 3-1 Seasonal variations of sea surface <i>p</i>CO₂ and other related parameters (mean±S.D.)	31
Table 3-2 Summary of the monthly average value and averaged diurnal range of <i>p</i>CO_{2,sw}, <i>p</i>CO_{2,atm}, SST, SSS, pH and Chl-<i>a</i> (mean±S.D.) at the study site	32
Table 3-3 Impact of <i>p</i>CO₂ temporal variation on measurement of sea surface <i>p</i>CO₂ and estimation of sea-air CO₂ flux	55
Table 3-4 Impact of temporal variation of sea surface <i>p</i>CO₂, atmospheric <i>p</i>CO₂ and wind velocity on estimation of sea-air CO₂ flux.....	56

摘要

近岸水体在全球海洋碳循环中扮演重要角色，但由于其地处海陆交界以及受人为活动的扰动，近岸水体的碳循环过程复杂且多变，这种复杂的变化过程也反映在海水二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2$) 随时间的剧烈波动上。鉴于近岸水体海表 $p\text{CO}_2$ 的时间变异性，特别需要长期高频的时间序列观测，以甄别其在不同时间尺度的变化规律和调控机制，并且为一些难以通过船载观测捕捉到的短期剧烈变化事件（如台风）提供研究的机会。

本研究主要基于浮标观测，该浮标观测点位于东海中部陆架 (124.5°E 31°N)，水深约 60 m，观测区域在夏季会受到长江冲淡水的显著影响，在冬季则会受到沿岸流和远岸流的共同影响。观测参数包括海表和大气 $p\text{CO}_2$ 、pH 及其他相关参数，主要参数的观测频率为 3 小时，辅助参数（如温盐等）的观测频率为 10 分钟。本论文基于历时十个月（2012 年 7 月 28 日至 2013 年 5 月 30 日）的连续观测数据，定量研究了海表 $p\text{CO}_2$ 在不同时间尺度的动态变化特征及主要调控机制，评估了海表 $p\text{CO}_2$ 测定的不同时间分辨率对海气 CO_2 通量估算的影响，探究了台风过程对观测区域海表 $p\text{CO}_2$ 及其他参数的影响。

观测区域整体上表现为大气 CO_2 的汇，但存在显著的季节变化，其中夏季和秋季为源，冬季和春季为汇。从季节尺度观之，海表 $p\text{CO}_2$ 从低到高分别出现在春、夏、冬和秋季，海表 $p\text{CO}_2$ 季节间变幅最大达到 110 μatm 。由于受到台风和长江冲淡水的影响，夏季海表 $p\text{CO}_2$ 的变异尤为剧烈。从周日尺度观之，海表 $p\text{CO}_2$ 的日变幅在夏季远高于冬季，并且海表 $p\text{CO}_2$ 的变化在夏季和冬季表现为不同的半日潮变化特征，夏季为正向的半日潮变化特征，冬季为反向的半日潮变化特征。

观测区域海表 $p\text{CO}_2$ 的调控机制也表现出明显的季节变化特征。夏季海表 $p\text{CO}_2$ 的主要调控机制依据长江冲淡水的影响程度分别为水团混合作用（长江冲淡水影响显著期，体现为低盐度特征）和生物作用（长江冲淡水影响减弱期，体现为高盐度且温度）。秋季海表 $p\text{CO}_2$ 在台风影响时期的受水体垂直混合作用、海气交换作用和生物作用的共同调控，在层化瓦解及海气 CO_2 交换恢复平衡时期主要受水体混合作用、温度和海气交换的共同调控。冬季海表 $p\text{CO}_2$ 同时受温度和水团对流混合作用的影响，海表 $p\text{CO}_2$ 表现为与温度一致的下降趋势。春季海

表 $p\text{CO}_2$ 先受水团对流混合作用影响，之后在长江冲淡水影响下降低。在周日时间尺度上，海表 $p\text{CO}_2$ 在夏季主要受到温度、水团混合和生物作用的共同调控，在冬季则主要受温度和水团混合作用的调控，海表 $p\text{CO}_2$ 在夏季的变化受温度的影响大约为 8%-18%，在冬季约为 21%-45%，其余主要由潮汐驱动的水团混合作用贡献。

本研究还定量评估了不同采样频率对海表 $p\text{CO}_2$ 及海气 CO_2 通量估算的不确定性的影响。在季节采样频率下，观测点年平均海表 $p\text{CO}_2$ 和海气 CO_2 通量的不确定性分别为 $\pm 15\%$ 和 $\pm 268\%$ ，在月采样频率下，不确定性分别为 $\pm 9\%$ 和 $\pm 160\%$ ，在周采样频率下，不确定性分别为 $\pm 3\%$ 和 $\pm 57\%$ ，在日采样频率下，不确定性分别为 $\pm 0.5\%$ 和 $\pm 10\%$ 。可见，采样频率的提高可以显著提升海气 CO_2 通量估算的准确度。我们的研究还表明，观测点海气 CO_2 通量估算的不确定同时取决于海表 $p\text{CO}_2$ 和风速的动态变化，其中海表 $p\text{CO}_2$ 占的比例更大。

本研究还探讨了夏秋季经过观测区域的台风对海表 $p\text{CO}_2$ 、海气 CO_2 通量及其他相关参数的影响，台风依其强度和移动速度的差异分别对观测区域的海表 $p\text{CO}_2$ 及其他相关参数有不同程度的影响，但总体上会提升海表 $p\text{CO}_2$ 和海气 CO_2 通量。同时，在台风影响减弱后的 5-10 天会出现 $\text{Chl-}a$ 浓度大幅度的增长及海表 $p\text{CO}_2$ 的降低，这一过程可能同时受到长江冲淡水水平迁移及浮游植物原位生产的影响，并且能缩短海气 CO_2 交换重新恢复平衡所需的时间，水体混合后增大的 DIC 在海气交换和生物光合作用下能被利用 71-77 $\mu\text{mol/kg}$ 。

综上，近岸水体海表 $p\text{CO}_2$ 的变化特征和调控机制有鲜明的季节差异，且随着时间尺度的变化而变化，此外，近岸水体海表 $p\text{CO}_2$ 还可能受到台风等事件的显著影响，忽略短期变化可能会给相关通量估算带来相当大的不确定性。本研究强调了近岸观测需要更精细的时间分辨率对不同时间尺度变异性进行考量，因此，开展海表 $p\text{CO}_2$ 长期高频观测对于准确评估近岸水体 CO_2 变化特征、调控机制以及 CO_2 通量的估算是十分必要的。

关键词：近岸水体；浮标观测； $p\text{CO}_2$ ； CO_2 通量；季节变化；周日变化；不确定性；台风

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.