



二氧化碳, 海洋与气候

詹滨秋 赵永平

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

提要 文章讨论了由于大气中 CO_2 浓度的增加所产生的“温室效应”和海洋与 CO_2 之间的相互作用。已有的研究表明,自从工业革命以来,大气中 CO_2 浓度已由 290ppmv 增至 340ppmv 左右,并且目前人类每年大约向大气输送 $180 \times 10^9 \text{t}$ 的 CO_2 ,大气的平均温度以 $0.1-0.5^\circ\text{C}/10\text{a}$ 的速度增加。据估计,截止本世纪末地球大气的平均温度将升高 $3 \pm 1.5^\circ\text{C}$ 。这种现象对地球的环境生态将产生明显的影响。海洋是碳的巨大贮存所(约 $390 \times 10^{11} \text{t}$ 溶解碳),海洋能够吸收和释放 CO_2 ; CO_2 在海洋的穿透深度为 700m。已有的研究结果表明, CO_2 在海洋和大气之间处于不平衡状态。本文提出,是否可以通过研究 CO_2 在大气与海洋之间的相互作用,海洋吸收、贮存和转移 CO_2 的能力来了解碳在海洋中的转移通道和大气中 CO_2 浓度的变化倾向,从而预测世界范围内气候的变化趋势,并初步予以探讨。

近年来,人们已经注意到,我们生活环境周围的空气逐渐地变得不适于人类未来的生存。引起变化的重要原因是人类自工业革命以来,由于含碳燃料的燃烧,把巨量的 CO_2 排入大气。一种人类活动所造成的产物—— CO_2 ,具有直接影响全球生态环境的危险性。然而由于这种产物的危险性不易被人们所察觉,故在相当长的时间里没有受到重视。其实,早在 1938 年,英国工程师 G. S. Callendan 首先提出大气中 CO_2 增加的现象^[6]。他指出,人们熟知大气热交换对气候的影响,可是没有几人能注意人类活动所产生的 CO_2 对如此之大的地球会有什么影响。可惜,他的忠告直至 50 年代末才引起科学家和人们的注意。

我们知道,太阳向地球发出辐射波,那些能量较高、波长 ($1\mu\text{m}$) 较短的太阳辐射热可穿透大气,抵达地面;并以较长的波长(约为 $10\mu\text{m}$) 从地面再反射到空间,这种波长的辐射热能被大气中的 CO_2 和水蒸汽所吸收^[6],因而大气能够捕捉从地面反回到大气中的辐射热,以致造成大气圈温度升高。这种现象通常被称为“温室效应”。由于这种效应,大气将变暖多少,其速度如何和将持续多久,这种效应是否对地球的所有区域的气候都均等地起作用;人类目前向大气排放 CO_2 的速度是否大于陆地植物和海洋转移 CO_2 的能力等等,这些问题都是目前人类应该认真思考的。本文仅就大气中 CO_2 浓度变化特征,海洋对 CO_2 的吸收、贮存和转移能力以及 CO_2 对未来气候影响的预测等问题予以阐述和讨论。

一、大气中的二氧化碳

目前我们还难以确切地推断工业革命以前大气中 CO_2 的含量，但是根据有关资料^[1,2,5,7,8]可以推知在 270×10^{-6} — 290×10^{-6} 大气压之间，也就是在 270—290ppmv 之间(百万分之一体积)。而现今却约为 340ppmv。G. S. Callendan 在 1938 年就论证了，在 1936 年以前的 50 年内，人类通过燃烧已把 $1500 \times 10^8\text{t}$ 的 CO_2 送入大气。现在，每年大约向大气输送 $180 \times 10^8\text{t}$ 的 CO_2 。可以认为，在工业革命以前，大气中 CO_2 的水平处于稳定的平衡状态，而在工业革命以后，这种平衡状态逐渐被打破， CO_2 含量一直在增加。图 1 描绘了从 1946—1960 年北半球年平均气温变化的情况。由此可以看到，工业革命后北半球气温显著增高。最近美国国家海洋与大气监测机构的报告^[9]指出，1987 年是有记录以来最暖和的一年，是全球快速增温持续 10 年的最高记录；并认为，全球性变暖可能是由于 CO_2 及粉尘进入大气层造成的温室效应所引起的。

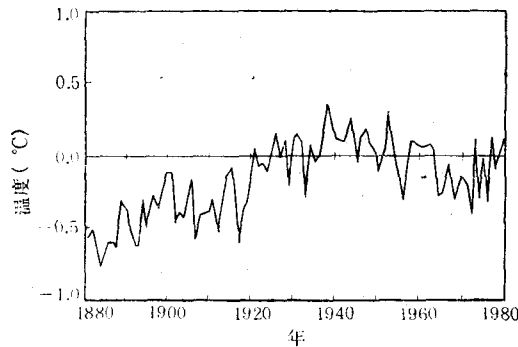


图 1 北半球平均气温距平(1946—1960 年的平均值)的际变化(根据 P. D. Jones 等 1980 年资料)

Fig. 1 Annual variability of northern hemisphere annual mean surface temperature anomalies (in 1946—1960)

要了解大气中 CO_2 含量增加的幅度、速度和时空分布特征，需要在不同地点进行长期的监测。美国斯克里普斯海洋研究所的 Keeling 和他的同事，首先在夏威夷冒纳罗亚 (Mauna Loa) 建立监测站。他向我们提供了从 1958 年至今的大气中 CO_2 含量的资料。由图 2 可知，1958 年该处 (图 2a) CO_2 含量约为 316 ppmv，到 1974 年已经增加到 331 ppmv。在 16 年中，每年平均以 0.8ppmv 的速度增加，增长速度较快，这是第一个特征。大气中 CO_2 含量随时间变化的另一个特征是有年波动的，大约 4—6ppmv，并且表现出明显的季节性循环。这种季节性循环由下面原因所造成。以北半球为例，在那里的夏天，陆地绿色植物从空气中吸收 CO_2 的能力大大增强，使得大气中 CO_2 含量下降，到 8 月中旬降到最低点；而在冬季，其绿色植物的光合作用处于较低的水平，利用 CO_2 的能力减弱，同时死亡的生物由于分解作用增强，释放出更多的 CO_2 ，因而使得向大气释放的 CO_2 量比吸收量大，致使大气中的 CO_2 含量逐渐增加，到 4 月中旬达最高点，在阿拉斯加，这种变化则高达 15ppmv。而在南极，由于绿色植物少，其季节变化率只有 2ppmv。从

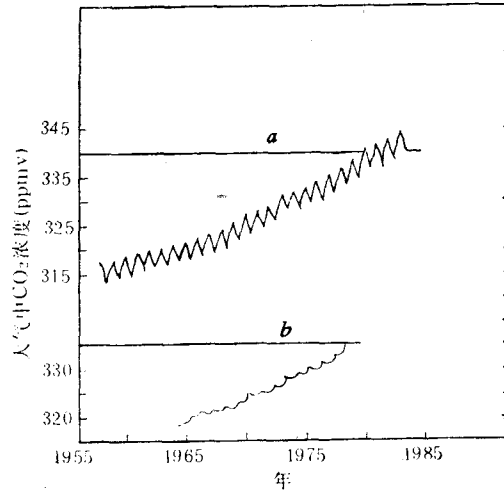


图2 大气中 CO_2 浓度的季节和年度变化(根据 W. P. Elliott 1987 的资料)

Fig. 2 Seasonal and annual variability of atmospheric CO_2 concentration

a. 冒纳罗亚, 19.5°N , 155.6°W ; b. 南极, 90°S .

此可看到陆地植物对 CO_2 含量季节性变化所起的影响是明显的。

目前在全球有近 40 个地面观察站监测大气中 CO_2 含量的变化。文献表明,在日本的上空其 CO_2 含量在 310—369ppmv^[7]; 在意大利,大气 CO_2 含量在 310—369ppmv^[1]; 在日本—澳大利亚之间的太平洋上空,大气中 CO_2 的含量为 336—351ppmv^[8]; 澳大利亚大气中 CO_2 含量在 329—343ppmv^[8]。这些资料表明,世界各地大气中 CO_2 浓度的范围是具有差别的,但却反映了一些共同的规律: (1) 有明显的季节变化,在北半球,一年中 CO_2 含量的最高值在 4—5 月,最低值在 8 月中旬。其季节变化率,在日本平均为 14.5 ppmv,在意大利平均为 13ppmv,在太平洋(北半球)的上空平均为 15ppmv,在南半球太平洋上空平均为 1ppmv。(2) CO_2 含量逐年增加,年度变化率相差不大,如在日本,1979—1984 年的平均年度变化率为 1.3 ppmv; 在意大利,1979—1985 年的平均年度变化率为 1.3ppmv; 在澳大利亚,1976—1984 年的平均年度变化率为 1.5ppmv; 在太平洋上空,其年度变化率最大的地区在北半球的中纬度,并向南逐渐减少,直至南半球的中纬度,然后向南又增大,北半球中纬度 CO_2 含量的平均年度变化率与南极的年度变化率之差达 3ppmv。

大气具有贮存 CO_2 的能力,但相当小,约为 $7 \times 10^{14}\text{t}$ 碳。 CO_2 分子在大气中的停留时间大约为 10 年,在 10 年以后,由于化学和生物作用,转化为其它形式的碳化合物。这些碳化合物,有的继续参加碳的地球化学循环,有的转移到更稳定的贮存所,例如深海。应该注意到, CO_2 分子在大气中平均停留时间并非等于通常推导出的 CO_2 的 10 年波动时间。停留时间的计算式为:

$$\text{停留时间} = \frac{\text{CO}_2 \text{ 在大气中的平均浓度}}{\text{CO}_2 \text{ 的输入年通量}}$$

该式的条件是输入和输出处于平衡。作者认为,如果输入和输出不平衡,即输入量大于输出量时,那么公式应为:

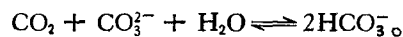
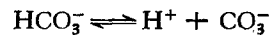
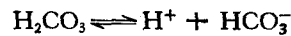
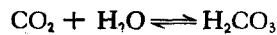
$$\text{停留时间} = \frac{\text{CO}_2 \text{ 在大气中的平均浓度}}{\text{CO}_2 \text{ 的年输出通量}}$$

但是，要直接测定这个时间，目前还是不可能的，因为大气中 CO_2 浓度不断升高，并且对海洋转移大气中 CO_2 的能力了解也极少。我们认为，可以运用陆地植物利用 CO_2 的量和海洋吸收 CO_2 的量等资料来估算 CO_2 在大气的停留时间，这对于预测大气中 CO_2 含量的增加趋向很有必要。

二、海洋中的二氧化碳

大气中 CO_2 通过海与气相互作用溶入海洋，并通过各种作用能够转化为碳的化合物，这些碳的化合物有的可以从上层海水转移到中层海洋，以致深海底质。占地球面积 70% 的海洋，对 CO_2 的吸收、贮存和转移能力如何，这种能力对区域性和全球性气候以致未来气候的影响如何，这是须要认真探讨和研究的。

海水中的 CO_2 化学很复杂。它的水合形态为碳酸 (H_2CO_3)， H_2CO_3 会离解为 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 离子， CO_2 还能与 CO_3^{2-} 形成 HCO_3^- ：



要了解 CO_2 在海水中的化学行为，须要测定这个体系中的各个参数，如 CO_2 的分压 ($p\text{CO}_2$)、总碱度、碳酸盐碱度、pH 和总 CO_2 含量等；另一方面，海洋植物可以利用海水中的 CO_2 ，在食物链传递中生成一系列的有机物；因而在研究海水中 CO_2 时，涉及到无机化学、有机化学和生物化学等。目前科学家在研究碳在海洋中垂直转移时，往往采用垂直通量的方法来讨论这些过程的总结果。

CO_2 在海洋中的垂直分布变化很大，其分布受多种因素的影响，包括物理、化学和生物等因素。一般表层海水每升含 2ml 的 CO_2 ($0.088\text{g CO}_2/\text{L}$)，而中层和深层海水中 CO_2 的平均含量为 $1.7 \times 10^{-3}\text{g/L}$ 。也就是说，表层水占整个海洋体积的 10%，但其对 CO_2 的贮存量却占整个海洋 CO_2 含量的 85%。中、深层海水占整个海洋的 90%，其 CO_2 的贮存量仅占 15%。这说明中、深层海水尚具有贮存 CO_2 的巨大潜在容量。据估计^[6]，海洋大约能贮存 $390 \times 10^{11}\text{t}$ 的溶解碳（不包括颗粒的有机碳和无机碳），大约为大气贮存量的 56 倍。 CO_2 在海洋的渗透深度约为 700m，这主要决定于海洋对 CO_2 的溶解、化学转化和被生物利用的结果。现在已可以大面积自动地测定海水中 $p\text{CO}_2$ ， CO_2 含量和 pH 值。有了这些资料就可以计算海水中 CO_2 体系的各个参数，然而还存在分析精度的问题。目前测定 CO_2 的精确度大约是每公斤海水 $\pm 10\mu\text{mol}$ 碳，这使得不少问题难以深入研究。如果精确度能够提高到 $\pm 1\mu\text{mol}$ 碳，那么这将会对研究工作起很大的推动作用。在研究海水对大气中 CO_2 的吸收和溶解时，人们期望了解 CO_2 在大气和海洋之间的交换速率。目前，虽然从海水和大气中 CO_2 分压尚无从知道交换速率，但可以从放射性同位素资料（例如 ^{14}C 和 ^{220}Ra ）来估计，这个交换速率大约每年每平方米为 $20\text{mol CO}_2(880\text{g CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

另一方面,海洋通过化学和生物过程,能够把海水中的 CO_2 转化为无机物和有机物,并把这些物质转移到中层和深层海水中,其中的一部分转移到海洋底质,从而长期贮存起来。S. Honjo^[4]长期研究物质在海洋的沉积通量,其研究表明,物质向深海的转移主要依靠浮游生物的碎屑和浮游动物的粪粒来完成。包括各种碳酸盐和有机物,例如矿化的浮游动物组织和浮游植物组织,浮游动物的粪粒、壳和残核,方解石和文石等等。这些物质的转移都意味着碳通过化学作用和生物利用后,从表层海水转入深层海水,以致底质。在沉积的通量中,生物的碳酸盐颗粒占 55—70%,有机碳原子的通量比无机碳原子的通量大得多。从海洋中层带沉降的悬浮体的 C/N 比值的相对稳定(约 8—9),也可以说明海洋对碳的转移主要依靠生物活动。尽管不同海域中生物对碳的利用不同、碳的垂直转移量不同,并且我们对其的了解还很少,但是可以肯定,海洋吸收、贮存和转移大气中 CO_2 的能力对大气中 CO_2 含量的发展趋向是一种不可低估的影响。

研究结果已经证明^[6],海洋中的 CO_2 与大气中的 CO_2 并不处于平衡状态。例如在北纬 50° 的大西洋北部, CO_2 从大气进入海洋,在那里表层水向北移动,水温很快下降,造成 CO_2 在大气和海洋之间的更大不平衡,差值高达 100ppmv。而在赤道太平洋,由于温度低的海水(含有过量的 CO_2)上升到温度较高的表面,此时 CO_2 被释放到大气中。根据可靠的计算^[1,2],在 1982—1983 年 El Niño 事件期间,赤道太平洋向大气输送约 $60 \times 10^6 \text{t CO}_2$ 。人们根据在冒纳罗亚长期观测的资料,确立大气 CO_2 含量与赤道水温的关系,指出暖水出现的时间比 CO_2 高值出现的时间早 1—2 季度,而这种相关性在 El Niño 事件发生时期更为突出。大气中 CO_2 含量的增加导致 CO_2 在大气和海洋之间的转换发生变化,但是如何变化尚不清楚。如果要了解海洋对大气中 CO_2 的吸收、贮存和转移能力,除了精确地测定 CO_2 体系中的 pCO_2 、pH 和碱度外,还必须确定海洋中物理、化学和生物等因素的影响,例如涡动、扩散和上升流的影响,生物对 CO_2 的利用能力,化学和生物物质的沉积通量,溶解的和颗粒的碳在海洋的时空分布等等,方能较深入地了解海洋对不断增加的大气中 CO_2 含量所产生的反应。过去,人们在研究海洋对气候的影响时,往往只注意它们之间的热交换,却很少注意到海洋对温室效应所起的调节和缓冲作用。要想较准确地预测地球气候的未来和人类所应采取的能源措施,弄清海洋对大气 CO_2 含量发展趋势的影响是一个重要的环节。

三、气候变化的预测

尽管科学家现在可以有根据地讨论所观察到的大气和海洋中 CO_2 的变化,但是要预言 CO_2 对气候的变化以及由于气候的变化可能产生的其它影响却是十分困难和艰巨的。因为要准确地预测未来的气候变化,只了解大气中 CO_2 含量增加的倾向是远远不够的。尽管如此,科学家还是进行了大胆的尝试,在过去几十年中,已经确立了几种不同类型的模型,主要有三种:(1) 区域性能量平衡模式 (ZEBM), (2) 辐射对流模式 (RCM), (3) 大气海洋通用三维环流模式 (GCM)。目前对气候变化的预测主要建立在气候模式和一些局部研究的基础上,其结论有异同。多数的科学家一致认为,本世纪的最后十年由于 CO_2 引起的温室效应增大,地球的气候将出现变暖的倾向,地球表面的温度可能增加 $1.5—3.0^\circ\text{C}$ ^[10]。但是对于 CO_2 含量增加所造成的结局,却显然有不同的观点。有的认为^[6],

如果大气中 CO_2 含量增加 1 倍 (大约为 600ppmv), 地球气候会产生明显的变化。如美国俄亥俄州立大学的 J. H. Merer 最近根据南极西部冰块在今后 50—200 年内将会融化的理论, 则进一步提出了“灾难性威胁”的假设。他指出, 这可能导致海平面上升 5m, 从而低洼地带将被洪水淹没, 例如佛罗里达和荷兰。D. M. Mclean 也作出类型的推测: 过去世纪范围内动物的灭绝是由于气候突然变暖所造成的, 例如在中生代, 同样, 今天气候变暖也可能产生相似的动物大量死亡。而另一种观点^[6], 根据格陵兰冰中氧同位素的记录所确认的天然气候的循环, 认为 1940 年以后的时期处于自然冷却时期, 将部分地抵消 CO_2 的影响, 并且还认为, 如果人类能够开发多种能源, 把大气中 CO_2 含量的增加控制在某个标准点以下 (例如控制 CO_2 含量增加 50%), 那么计算结果表明, 目前每年 CO_2 含量以 4% 速度增长只能持续到本世纪末。同时考虑到海洋对 CO_2 的吸收能力, 那么大气中 CO_2 与陆地植物和海洋之间会达到一种新的平衡, 尽管在这种新的平衡时, 大气中 CO_2 的含量比工业革命以前的水平高得多, 并且会对地球环境生态有明显的影响, 但是并不会招致毁灭性的灾难。这两种观点之所以还无法统一, 关键在于对 CO_2 问题未来的发展趋向和结局, 其中特别是关于海洋对 CO_2 的吸收、溶解和转移的能力, 尚缺乏有力的科学依据。

迄今, CO_2 问题已引起人类的高度重视。一方面, 在全球各地建立监测站, 以测定大气中 CO_2 含量的变化; 分析技术和资料处理标准化, 以利于资料的比较和共同使用。另一方面, 加强对海洋的研究, 目前已能进行大面积的海水中 CO_2 系统各参数的剖面调查和从事海洋碳垂直沉积通量的研究。人们在研究海洋中 CO_2 时, 开始注重化学过程和生物过程对碳的转移作用。与此同时, 许多国家还成立了研究 CO_2 的专门组织, 例如美国的 CO_2 委员会。国际上也有相应的组织, 例如隶属于海洋研究科学委员会 (SCOR) 的第 75 工作组, 则致力于海洋对 CO_2 吸收能力的最新资料的讨论和总结以及世界海洋 CO_2 监测的最佳策略的制定, 其工作范围包括: (1) 海洋 CO_2 监测的科学要求, (2) 海洋 CO_2 监测的技术要求, (3) 现存的科学能力和未来的要求。为推动该研究的进展, 国际的学术交流日趋活跃, 例如, 1985 年 9 月 2—6 日在瑞士召集了大气 CO_2 的分布、来源、沉降和全球输送的国际学术讨论会。有 54 名科学家出席, 提供了 39 篇论文。论文涉及到南北两个半球地面监测站大气 CO_2 资料的分析; 大气 CO_2 的同位素测量; 冰核中空气所含 CO_2 的测定; 陆地生物圈碳的循环; 地球碳循环中的海与气的相互作用; 碳循环的模型, 其中包括海洋的三维大气模式。这些论文展示了, 现有 CO_2 地面监测站遍布全球, 已能较准确地了解世界各地大气中 CO_2 的含量和变化特征。科学家开始使用三维大气模式处理这些资料。这种模式真实地模拟大气中 CO_2 的变化、含碳燃料的燃烧、季节性碳的释放, 以及陆地生物和海洋对 CO_2 的吸收。但要达到准确地预测未来气候还需要大量而艰巨的工作。

四、结 论

1. 大气中 CO_2 的含量每年大约以 1ppmv 的速度增加。至本世纪末地球表面温度将升高 $3 \pm 1.5^\circ\text{C}$ 。温室效应对地球环境生态的影响将增强。
2. 海洋是碳的巨大贮存所, 约能贮存 $390 \times 10^{11}\text{t}$ 溶解碳。海洋能够通过化学和生物

作用,把 CO₂ 转变成其它形式的化学物质,并把它们转移到海洋的中层、深层和底质。

海洋能够吸收和释放 CO₂, 从而影响大气中 CO₂ 的含量。CO₂ 在大气与海洋之间处于不平衡状态。

研究海洋对大气中 CO₂ 的吸收、贮存和转移能力,对于预测大气中 CO₂ 含量的发展趋向具有重要的意义。

3. 大气中 CO₂ 浓度增加对地球未来气候影响程度将取决于三个主要因素: (1) 未来 CO₂ 的排放量, (2) 海洋的作用, (3) 地球环境生态对碳的生物地球化学循环的制约作用。

参 考 文 献

- [1] Ciattaglia, L., Y. Cundari and T. Colomdo, 1987. Further Measurements of atmospheric carbon dioxide at Mt. Cimone, Italy: 1979—1985. *Tellus* **39B**: (1-2): 13—20.
- [2] Fushimi, K., 1987. Variation of carbon dioxide partial pressure in the Western North Pacific surface water during the 1982/1983 El Niño event. *Tellus* **39B**(1-2): 214—227.
- [3] Gaudry, A., P. Monfray, G. Polian and G. Lambert, 1987. The 1982—1983 El Niño: A 6 billion ton CO₂ release. *Tellus* **39B**(1-2): 209—213.
- [4] Honjo, S., 1980. Material fluxes and modes of sedimentation in the mesopelagic and bathypelagic zones. *Journal of Marine Research* **38**(1): 53—97.
- [5] Monfray, P., A. Gaudry, G. Polian and G. Lambert, 1987. Seasonal variations of atmospheric CO₂ in the Southern Indian Ocean. *Tellus* **38B**(1-2): 67—71.
- [6] Peter, B. G., 1978. Carbon dioxide and climate. *Oceanus* **21**(4): 13—17.
- [7] Tanaka, M., T. Nakazawa and S. Aoki, 1987. Time and space variation of tropospheric carbon dioxide over Japan. *Tellus* **39B**(1-2): 3—12.
- [8] Tanaka, M., T. Nakazawa and S. Aoki, 1987. Seasonal and Meridional variation of atmospheric carbon dioxide in the Lower troposphere of the northern and southern hemispheres. *Tellus* **39B**(1-2): 29—41.
- [9] Wei-Chyung Wang, D. J. Wuebbles, M. Washington, 1986. Trace gases and other potential perturbations to global climate. *Reviews of Geophysics* **24**(1): 110—140.
- [10] Wong, C. S., 1983. Marine carbon research. Annual review of activities. Institute of Ocean Sciences, Sidney, B. C., Canada, pp. 48—49.

CO₂, OCEAN AND CLIMATE

Zhan Binqiu and Zhao Yingping

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao*)

ABSTRACT

The "Green House Effects" caused by increase of CO₂ and interaction between sea and air are discussed. The concentration of CO₂ has gone up from 290 to 331 ppmv since the industrial revolution. Now, about 180 billion tons of CO₂ per year is transported to the atmosphere. The average atmosphere temperature will be rising with the rate of 0.1—0.5°C per decade, a warming up of 3±1.5°C by the end of this century. This phenomenon will have the obvious effect on the global environmental ecology. The penetrating depth of CO₂ in the sea is 700 m. The surface sea water contains 2 ml of CO₂, about 10% of total volume of sea water. The remaining 90% of sea water contains 15% of total CO₂. This shows that ocean is a great reservoir of CO₂ (about 390×10¹¹ tons dissolved carbon). Furthermore ocean is able to transform inorganic carbon to organic carbon, dissolved carbon to particulate carbon, and to transfer carbon from surface water into bottom. The results indicated the CO₂ is not in equilibrium between air and ocean, ocean can absorb CO₂ from atmosphere and release CO₂ to atmosphere. Therefore, it is of important scientific significance to study the CO₂ transference between air and ocean, oceanic capacity in absorbing reserving and transferring CO₂, and the way of transferring carbon in the sea.