

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 200334001

UDC _____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

南海北部颗粒有机碳输出通量、季节变化及其调控过程

On the export fluxes, seasonality and controls of particulate organic carbon in the northern South China Sea

陈蔚芳

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: 2007-12-25

论文答辩时间: 2008-01-16

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008年01月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

- 1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

Xiamen University

Environmental Science Research Center

Doctoral Dissertation

**On the export fluxes, seasonality and controls of particulate
organic carbon in the northern South China Sea**

by **Chen weifang**

Supervisor: **Professor Minhan Dai**

Jan. 2008

This work was funded primarily by research grants from the Natural Science Foundation of China

摘 要.....	1
Abstract.....	4
第一章 绪论.....	7
1.1 颗粒有机碳输出通量研究概况.....	10
1.1.1 估算颗粒有机碳输出通量的主要方法及其比较.....	10
1.1.2 全球海洋颗粒有机碳输出通量研究背景.....	13
1.1.3 陆架边缘海颗粒有机碳输出通量估算的不确定性.....	18
1.2 研究内容和目标.....	21
1.3 论文框架.....	21
第二章 研究区域与方法.....	23
2.1 研究区域概况.....	23
2.1.1 南海海域气候与水文概况.....	23
2.1.2 南海水团.....	27
2.1.3 河流对南海陆架区的影响.....	27
2.2 采样与基础数据.....	28
2.2.1 采样站位设置.....	28
2.2.2 基本理化参数观测.....	28
2.2.3 生物参数观测.....	29
2.3 颗粒有机碳和 ^{234}Th 的测定及质控.....	31
2.3.1 小体积二氧化锰共沉淀法测 ^{234}Th 的改进.....	31
2.3.2 ^{234}Th 活度的测定与质控.....	32
2.3.3 颗粒有机碳的测定与质控.....	34
2.3.4 采样装置及过滤体积对颗粒有机碳/颗粒态 ^{234}Th 结果的影响.....	36
2.3.5 颗粒有机碳与颗粒态 ^{234}Th 的同膜测定.....	40
第三章 南海 POC 和 ^{234}Th 的分布.....	43
3.1 航次调查期间水文要素特征.....	43
3.2 南海北部 ^{234}Th 的分布特征.....	45
3.2.1 南海北部总 ^{234}Th 和颗粒态 ^{234}Th 的垂直分布.....	46
3.2.2 南海北部总 ^{234}Th 和颗粒态 ^{234}Th 的断面分布.....	60
3.2.3 南海北部总 ^{234}Th 和颗粒态 ^{234}Th 的水平分布.....	63

3.3 南海北部 POC 的分布特征	69
3.3.1 南海北部 POC 的垂直分布	70
3.3.2 南海北部 POC 的断面分布	71
3.3.3 南海北部 POC 与叶绿素关系	77
3.4 南海 ^{234}Th 的清除及停留时间	78
第四章 POC/^{234}Th 的变化及其机制	88
4.1 南海北部 POC/ ^{234}Th 的时空变化	89
4.2 POC/ ^{234}Th 比值与 POC 输出通量的估算	92
4.3 POC/ ^{234}Th 随粒径的变化及其控制机制	94
第五章 南海北部 POC 输出通量	101
5.1 南海北部 ^{234}Th 输出通量的估算	101
5.1.1 ^{234}Th 输出通量估算及假设	101
5.1.2 南海北部 ^{234}Th 输出通量	103
5.2 POC 输出通量的时空变化及其调控机制	108
5.2.1 南海北部 POC 输出通量的时空分布	108
5.2.2 南海北部 POC 输出通量的季节变化及调控机制	116
5.3 生物群落结构对 POC 输出通量的影响	118
5.4 南海 POC 输出通量与碳循环	119
5.5 南海碳收支初步估算	122
第六章 结论	125
6.1 本论文总结	125
6.2 尚未解决的科学问题及工作展望	127
参考文献	129
致谢	146
附：参加会议论文、报告以及发表的论文	147

删除的内容: 147

删除的内容: 148

摘要

基于 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 不平衡法, 本论文主要研究南海北部颗粒有机碳 (POC) 输出通量及其季节变化。南海为陆架边缘海, 物理-生物地球化学过程的时空变化剧烈, 需要高时空分辨率的 ^{234}Th 分布来估算 POC 输出通量, 本研究采用改进的小体积二氧化锰测定 ^{234}Th 的方法, 所需的海水体积由传统方法的 20 L 缩减至 2—4 L, 前处理流程亦大大简化, 籍此我们进行了南海北部春、夏、秋、冬四个季节 (2004—2005 年) 高空间分辨率的 ^{234}Th 调查, 并参考了南海南部春季的结果。本论文亦分析了南海北部四个季节 (2000—2004 年) 的 POC 分布特征。

本研究首先评估 ^{234}Th 示踪颗粒输出通量的方法, 这包括不同采样方法 (CTD 瓶采与大体积泵采) 对 POC 和颗粒态 ^{234}Th 结果的影响、POC/ ^{234}Th 随颗粒物粒径变化的主要原因。比较 CTD 瓶采与大体积泵采得到的 POC, 发现过滤过程中溶解有机碳 (DOC) 的吸附会引起瓶采 POC 高于泵采结果, 溶解态 ^{234}Th 的吸附同样会造成瓶采颗粒态 ^{234}Th 高于泵采结果, 而通过增大采样体积可减少吸附效应。大体积泵收集的分粒径颗粒物样品 (1—10 μm , 10—53 μm , >53 μm) 的结果显示, POC/ ^{234}Th 随粒径的变化出现多种变化趋势, 并无规律可循。比较三个粒径的 POC/ ^{234}Th 和 POC/ ^{228}Th 比值, 发现 POC 的优先矿化和 ^{234}Th 衰变的共同作用是引起 POC/ ^{234}Th 比值随粒径出现多变趋势的主要原因。

南海北部 ^{234}Th 垂向分布的季节变化明显。冬季 ^{234}Th 在表层出现明显亏损, 其活度随深度增加而增加, 在真光层底部与 ^{238}U 趋近平衡; 其它三个季节则多为层化结构, 即表层与真光层底部 ^{234}Th 与 ^{238}U 处于或者接近平衡, 次表层出现不平衡程度极大值, 表现出寡营养盐海区的特征。水平方向上, ^{234}Th 活度从陆架向海盆出现增加趋势, 不平衡程度减弱, 即颗粒物清除程度随离岸距离增加而减小。

通过分析 2000—2004 年南海北部陆架区的 POC 分布, 发现 POC 浓度随离岸距离增加而减少, 在近岸, POC 受到珠江冲淡水的影响。在依据盐度判定的冲淡水影响范围 (离岸 50 km) 内, POC 浓度的季节变化与珠江径流量季节变化一致, 即夏季>春季、秋季>冬季。南海 POC 的垂直分布呈现表层高, 底层低

的一般规律，但陆架区部分站位出现底部浓度剧增的现象，主要与底部再悬浮有关。而在陆坡区，POC 浓度在 200 m 与 400—500 m 附近出现明显增加，可能与南海颗粒物的沿陆坡搬运或水平运移有关。

本研究采用了三维模型估算²³⁴Th 输出通量。结果表明垂直输送过程对²³⁴Th 通量的影响可以忽略不计；在大部分站位，水平输送过程的影响仅占²³⁴Th 通量的 10%以内，但在一些特殊物理水文条件下，如锋面，水平过程的影响可达 30—40%。因此在陆架边缘海应用²³⁴Th/²³⁸U 不平衡法估算 POC 输出通量，进行高时空分辨率的²³⁴Th 采样是非常有必要的。需要说明的是，由于船时及调查条件的限制，本论文采用悬浮颗粒物上的 POC/²³⁴Th 比值计算 POC 输出通量，相当于 POC 输出通量的上限值。在 2004—2005 年四个季节调查期间，南海北部陆架区 POC 输出通量季节变化不明显，变化范围为 8.0—11.3 mmol C m⁻² d⁻¹。陆坡及海盆区 POC 输出通量则季节变化明显，冬季表现为高输出特征，输出通量平均为 9.0±6.4 mmol C m⁻² d⁻¹，其余三个季节 POC 输出通量在 3—5 mmol C m⁻² d⁻¹ 之间变化；POC 输出通量的季节变化与由季风驱动的初级生产力季节变化一致，同时也与浮游植物群落结构季节变化（冬季以微型浮游植物为主，其余季节以微微型浮游植物为主）相对应，三者的耦合表明季风是驱动南海北部 POC 输出通量季节变化的主要原因，即在冬季混合作用加强使得下层营养盐进入上层海洋，促进初级生产力增加和浮游植物群落结构改变，进而增加 POC 输出通量。

南海北部的 ThE（²³⁴Th 法得到的 POC 输出通量/初级生产力比值）在 4—68% 之间变化，大部分落在 10—50% 之间，平均为 24%，其生物泵效率高于寡营养盐海区（<10%）。简化的箱式模型计算结果显示，春季南海北部 DOC 向下扩散通量平均为 0.91 mmol C m⁻² d⁻¹，占 POC 输出通量的~30%，如果仅考虑 POC 输出通量，南海生物泵效率可能被低估。

综合分析南海与其它不同纬度陆架边缘海的生物泵效率（ThE），发现 ThE 均出现显著季节变化，高输出通量季节的 ThE 是其他季节的 2—3 倍。若 ThE 的季节变化为陆架边缘海基本特征，假设高输出通量季节的 ThE 是其他季节的 3 倍，则全球陆架边缘海的 POC 输出通量约占到全球海洋输出通量的~30%。因此，在全球输出通量估算中不能忽略陆架边缘海的贡献，而且进行陆架边缘海

的输出通量研究时必须考虑其季节性变化,若仅以单一季节的 POC 输出通量外推全年的输出通量,可能低估陆架边缘海的贡献。

关键词: $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 不平衡法 POC 输出通量 季节变化 陆架边缘海

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Continental margins play a disproportionately important role in the global ocean carbon cycling and the flux of biologically produced organic carbon from the upper ocean implies the net sequestration of carbon dioxide (CO₂) and the recycling of organic matter. However our understanding of the spatial and temporal variability of particulate organic carbon (POC) flux in the extremely dynamic marginal seas remains limited. In this study, we attempt to elucidate the spatial and seasonal variation of POC export based on the high resolution ²³⁴Th sampling in the northern South China Sea (SCS). ²³⁴Th were measured with a modified small-volume MnO₂ coprecipitation method. Samples were collected in four cruises conducted in the winter (Feb. 2004), the summer (Jul. 2004), the fall (Sept. 2004) and the spring (May. 2005).

In this study we examined the effect of different sampling methods on POC and particulate ²³⁴Th (PTh) data, which were collected by small-volume samplers (1-2 L) and large-volume (100-600 L) pumping methods. POC and PTh derived from small-volume samplers were frequently observable to be higher than from large-volume pumping. The absorption of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved ²³⁴Th onto the filters appeared to be a primary factor causing the discrepancy.

We also examined POC/²³⁴Th and POC/²²⁸Th ratios in three particle size classes (1-10 μm, 10-53 μm, >53 μm). The various trends in the POC/²³⁴Th ratio versus particle size were observed, which may be explained by a combination of ²³⁴Th decay and the preferential remineralization of POC relative to Th during particle aggregation.

During the survey, the deficit of ²³⁴Th generally decreased with the distance offshore in the northern SCS. Depth profiles of ²³⁴Th may be categorized into three types with seasonal variations. In the winter, the deficit of ²³⁴Th appeared to be substantial in the surface and decreased with depth. In other seasons, ²³⁴Th basically

showed a stratified structure, i.e., the subsurface maxima of ^{234}Th deficit. Such a stratified structure is characteristic of oligotrophic ocean. At some locations on the shelf, ^{234}Th activities were lower than ^{238}U throughout the water column and the enhanced deficit existed at the base of the euphotic zone, which were mainly caused by the resuspension of the bottom sediments.

Besides the distribution of ^{234}Th , POC distributions on the shelf and the slope were also investigated from 2000 to 2004. POC concentration decreased with the distance offshore, which indicates the influence of the Pearl River. POC concentration in the summer was higher than in the spring and the autumn and was lowest in the winter, which is consistent with the seasonal variation of the discharge of the Pearl River. POC concentration generally showed a decrease with depth. At some locations on the slope, POC peaked at 200 m and 400-500 m, which suggests the horizontal particle-transport or the particle transport along the slope in the northern SCS.

Using a three-dimensional steady state model, ^{234}Th flux was estimated. It is shown that horizontal and vertical transport account for less than 10% of the overall ^{234}Th balance for most of stations. However, the contribution of physical transport to the ^{234}Th flux was up to 30-40% at physically dynamic regimes such as at the salinity fronts. This strongly suggests that high resolution ^{234}Th sampling is necessary to correctly resolve the variability of POC fluxes in the marginal sea. Combined with the measurements of POC/ ^{234}Th ratio on suspended particles, ^{234}Th fluxes were converted to POC export rates and regarded as the upper limit of POC flux in the northern SCS.

In the northern SCS, POC export on the shelf varied from 8.0 to 11.3 $\text{mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ with no apparent seasonal variations. In contrast, the average POC export in the regime of the slope and the basin changed from a low of $3.6 \pm 2.2 \text{ mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ in the spring to a high of $9.0 \pm 6.4 \text{ mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ in the winter, with a medium value in the summer ($4.7 \text{ mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) and the autumn ($4.8 \pm 4.8 \text{ mmol C m}^{-2} \text{d}^{-1}$). The seasonal pattern of POC export matched the pattern of primary production and the community structure of the phytoplankton, the enhancement of which in winter may

be related to the nutrient supplies from the wind-induced mixing in the winter.

The ratio (^{234}Th -derived export production/Primary production ratio) in the northern SCS varied in the range of 4-68%, with an average of 24%, which was higher than the typical value in the oligotrophic ocean (<10%). Using a simple box model, we estimated that the diffusive flux of dissolved organic carbon (DOC) was $0.91 \text{ mmolC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and equaled to ~30% of POC export in the northern SCS in the spring, the efficiency of biological pump in the northern SCS would thus be underestimated without the consideration of the downward flux of DOC. Our updated synthesis of ThE in some marginal seas indicated the seasonal variation of ThE, which showed were two or three times of difference between seasons. Assuming that this seasonal signature is of characteristics of the marginal sea, it is estimated that POC export of the marginal sea might contribute up to 30% of the global export flux.

Keywords: $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$; POC Export Flux; Seasonal Variations; Marginal Sea

第一章 绪论

本章论述颗粒有机碳输出通量研究的意义及主要方法, 概述颗粒有机碳输出通量的研究现状及存在问题, 重点介绍陆架边缘海输出通量的重要性及其研究所存在的问题, 最后提出本论文的研究目标和结构框架。

工业革命以来, 由人类活动引起的二氧化碳 (CO_2) 浓度增加是导致全球气候变暖的重要原因 (IPCC, 2001)。最新的估计显示, 2000—2005 年期间每年大约 $7.2 \text{ Gt}^1 \text{ C}$ 的人为 CO_2 进入大气 (Canadell et al., 2007)。海洋作为地球上最大的碳储库之一, 在全球碳循环中具有举足轻重的作用, 这也引发人们对海洋生物地球化学过程如何影响和响应全球变化这一问题的关注。

海洋每年吸收 $\sim 2.0 \text{ Gt C}$ 的 CO_2 (Sarmiento and Sundquist, 1992), 海洋对大气 CO_2 的吸收能力主要受两个过程的净效应控制 (图1.1): 一是“物理泵”, 也称之为“溶解度泵” (solubility pump), 即海洋通过物理溶解和海水碳酸盐系统“缓冲作用”吸收 CO_2 , 继而通过物理交换过程将其从表层输送到深海, 从而与大气隔离, 其中物理过程主要指海洋温盐环流 (thermohaline circulation) 中深层水的形成和底层水的涌升 (Falkowski et al., 2000); 二是“生物泵”, 主要由海洋初级生产力驱动, 即浮游植物通过光合作用利用溶解无机碳 (DIC) 合成颗粒有机碳 (POC) 和溶解有机碳 (DOC) 以及 CaCO_3 骨骼, 还有浮游动物通过摄食产生粪便颗粒, 进而通过颗粒物沉降过程和 DOC 向下扩散将碳从海洋表层输送到深海或沉积物中埋藏, 从而降低海表的 CO_2 分压 (partial pressure)。可见, 海洋生物泵对调控大气 CO_2 浓度具有重要作用 (Volk and Hoffert, 1985), 在全球气候变暖的背景下, 这一点显得尤为重要。举例言之, 冰期时代大气 CO_2 浓度的下降幅度高达 $30 \mu\text{atm}$, 研究认为这与同时期生物泵的增强有关 (Sigman and Boyle, 2000)。

Falkowski et al. (2000) 基于稳态模型的估算认为表层海洋中有机碳的输出每年可以输送 $11-16 \text{ Gt C}$ 至深海中, 他们进一步推测如果海洋中所有的浮游植物死亡, 大气中 CO_2 将升高 $150-200 \text{ ppmv}$ 。全球海洋通量联合研究计划 (JGOFS) 的研究结果已经表明在正常年份, 北大西洋和两极地区是大气 CO_2 的主要汇区, 除了深层水形成时通过物理泵将其泵入深层海洋, 高生产力驱动的生物泵也是重

¹ $1 \text{ Gt (giga tons)} = 10^{15} \text{ g}$

要因素；相反在赤道太平洋，由于缺铁遏制生物泵作用，富含 CO_2 的底层水涌升至表层释放，使得该地区成为大气 CO_2 的主要源区 (Feely et al., 2001)。数值模式的结果同样证明：对于人为 CO_2 的吸收，生物泵与物理泵同等重要 (Sarmiento et al., 1998)，但至今为止，人们对生物泵的运用仍知之甚少 (Falkowski et al., 2000; Sigman and Boyle, 2000)。

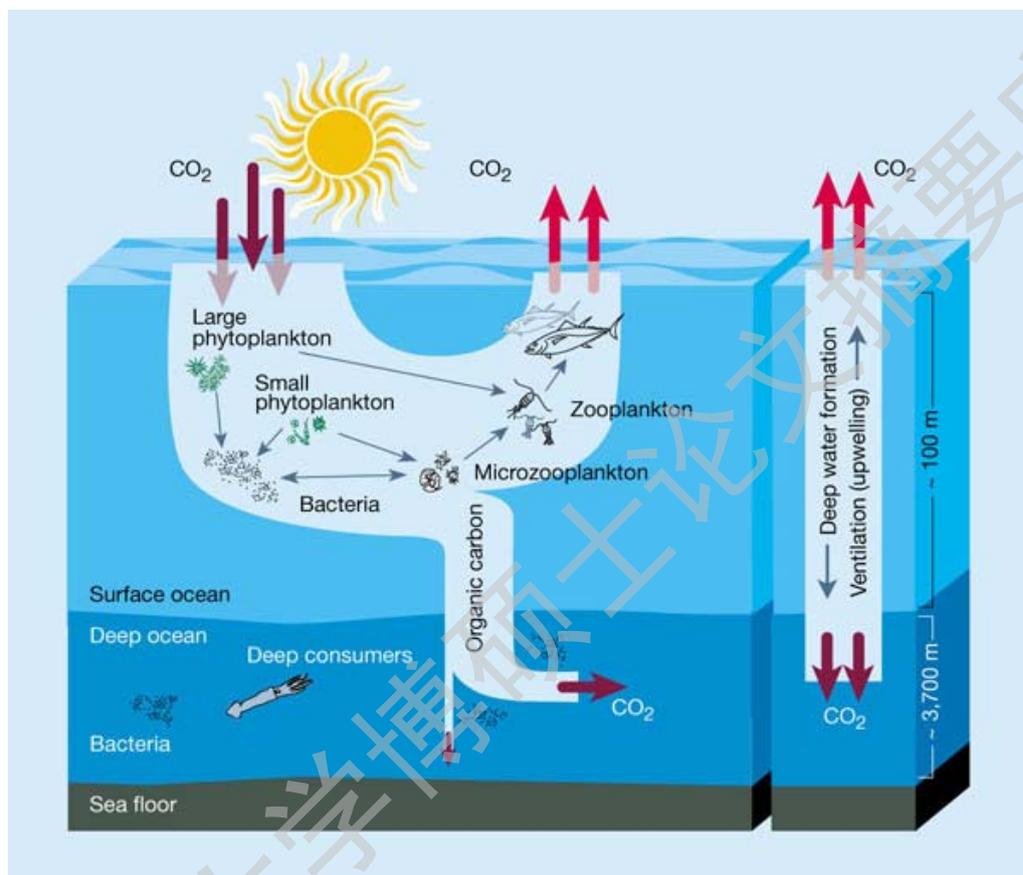


图 1.1 海洋“生物泵”与“物理泵”示意图

(左为生物泵，右为物理泵；来源：Chisholm, 2000)

Figure 1.1 The structure of biological pump (left) and physical pump (right) in the ocean (Chisholm, 2000)

综上，海洋生物泵过程是海洋碳循环研究中的一个关键环节，其中初级生产力 (PP, primary production) 是海洋生物泵过程的主要驱动力。初级生产力主

要受控于常量营养盐（氮（N）、磷（P）、硅（Si））以及一些痕量金属如铁（Fe）等。依据氮的来源和形态，可将其分为再生氮（Regenerated N）和新氮（New N），前者主要来自真光层内部营养盐的再循环，以（ NH_4^+ ）形式存在，后者主要由外部来源如大气沉降或富含营养盐的底层水涌升提供，以（ NO_3^- ）形式存在（Dugdale and Goering, 1967）。因此，初级生产力可划分为由再生氮支持的再生生产力（regenerated production）和由新氮支持的新生产力（NP, new production）。由于新生产力决定浮游植物固定的 CO_2 进入深海的量（Platt et al., 1992），这个概念成为海洋生物地球化学循环研究的基石（Michaels et al., 2001）。

假设海洋生态系统处于稳态前提下，新生产力必须与从上层海洋输出的有机物相互平衡——后者被定义为输出生产力（EP, export production）——即稳态条件下，新生产力和输出生产力是相等的（Eppley and Peterson, 1979）。因此，真光层的输出生产力反映浮游植物固定的 CO_2 进入深海的量，成为海洋碳循环研究中的核心内容。全球通量研究计划（JGOFS）就将表层海洋碳通量时空变化的准确评估列为两大核心目标之一（Buesseler et al., 2001a）。

输出生产力包括颗粒有机碳（POC）的沉降输出和溶解有机碳（DOC）的扩散/对流输出。利用物理混合和浓度梯度计算发现溶解有机碳的向下输出通量为0.1–0.3 tons C/ yr，未及10%的输出生产力（Eppley and Peterson, 1979）。相对而言，大颗粒物的沉降输出主导输出生产力（McCave, 1975），这个沉降通量甚至被认为与新生产力相平衡（Eppley and Peterson, 1979）。因而颗粒有机碳的输出通量成为海洋生物泵效率的表征，在季节以及年际尺度上反映海洋的净固碳能力。此外，颗粒有机碳的输出还决定了溶解氧、营养盐以及众多痕量元素在海洋中、特别是深海中的分布，在海洋物质循环中扮演重要角色。颗粒有机物沉降输出时，许多化学组分（元素或核素）与颗粒物一起从水体迁出进入到深海沉积物中。在向下输运过程中，颗粒物发生降解/破碎/聚集/解聚等颗粒动力学过程，这些化学组分随之释放或者富集，从而改变它们在水体中的分布。未被降解的有机物沉到海底，一部分为底栖生物提供食物来源，另一部分则埋藏在沉积物中参与更长时间尺度上的物质循环，成为沉积地球化学研究内容。因此，研究颗粒有机碳输出通量对于了解海洋生态系统的物质循环和能量流动、预测海洋水体中痕量元素的分布、变化以及全球气候的变化趋势均具有重要意义。

1.1 颗粒有机碳输出通量研究概况

1.1.1 估算颗粒有机碳输出通量的主要方法及其比较

颗粒物输出通量的观测方法自 JGOFS 计划以来有了长足的进步，图 1.2 示意的输出通量观测既包括沉降颗粒通量的直接测量，也包括基于食物网结构、海气交换、营养盐分布等的间接估算，后者多利用质量平衡及 Redfield 比值 (C: N: P=106: 16: 1) 进行换算。颗粒物输出通量可以通过颗粒物丰度的测定、沉积物捕获器和海洋中放射性同位素的不平衡三种方法来直接测量。颗粒物丰

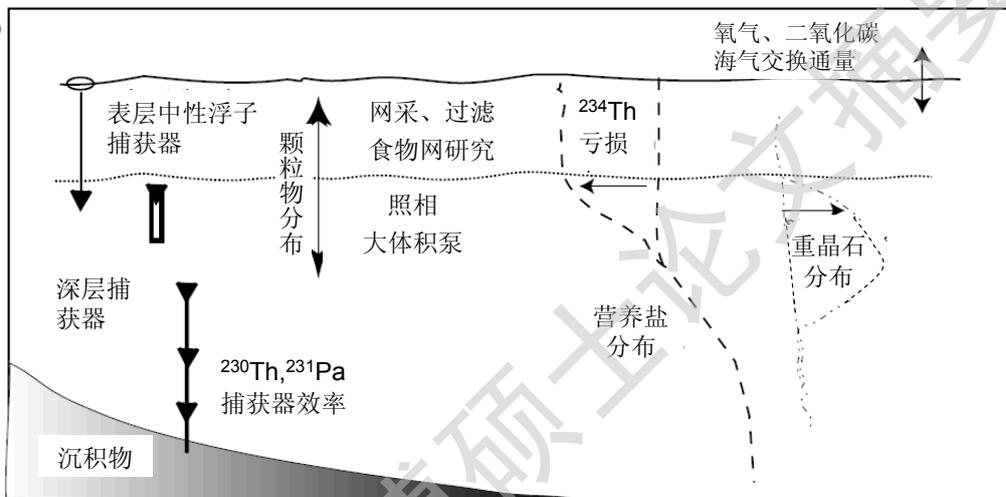


图 1.2 颗粒物输出通量观测方法示意图(Boyd and Trull, 2007)

Figure 1.2 Observations of export in the ocean (Boyd and Trull, 2007)

度，即颗粒物的含量，它可以通过Coulter计数器计数 (Costin, 1970; Eisma et al., 1990)或者用多功能照相机等光学仪器照相 (Agrawal and Pottsmith, 1993; 1994) 并根据得到的图象来定量，然后根据颗粒物组成与沉降速率来计算通量。这种方法无需接触颗粒物样品，减少了采样过滤等步骤带来的误差，但在实际研究中，不同颗粒物的组成及沉降速率变化很大，难以确定，同时图象的精度通常有限，容易引起大的误差，因此此法的应用并不多见。

沉积物捕获器通过单位时间、单位面积上收集到的颗粒物来定量通量。在 JGOFS计划之前，自由漂浮沉积物捕获器 (free floating particle interceptor traps,

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts 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.

厦门大学博硕士论文摘要库