

学校编码: 10384  
学号: 2242011151367

密级

廈門大學

硕士学位论文

九龙江河口溶解磷酸盐及沉积物中不同形态磷酸盐的氧同位素分布特征及意义

Distribution patterns and biogeochemical implications of oxygen isotope composition in dissolved phosphate and phosphate of different species in sediment in Jiulong River estuary

雷学铁

指导教师姓名: 陈志刚助理教授

专业名称: 海洋化学

论文提交日期: 2014年5月

论文答辩时间: 2014年5月

2014年5月

## 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(厦门大学海洋与地球学院同位素海洋化学)课题(组)的研究成果,获得(厦门大学海洋与地球学院同位素海洋化学)课题(组)经费或实验室的资助,在(厦门大学海洋与地球学院同位素海洋化学)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

摘要.....	X
<b>Abstract</b> .....	<b>XI</b>
<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 磷的海洋生物地球化学循环.....	1
1.1.1 磷循环的研究意义.....	1
1.1.2 磷的形态.....	1
1.1.3 海洋微生物的磷循环.....	2
1.1.4 河口区的磷循环.....	5
1.1.5 海底沉积物中磷的循环.....	6
1.2 磷酸盐氧同位素研究进展.....	8
1.2.1 磷酸盐氧同位素的测量方法.....	9
1.2.2 磷酸盐氧同位素的分馏特点.....	10
1.2.3 磷酸盐氧同位素对土壤-植物系统磷循环的示踪.....	13
1.2.4 磷酸盐氧同位素对湖泊、河口及海洋磷循环的示踪.....	14
1.3 研究目的及意义.....	16
<b>第二章 研究方法</b> .....	<b>17</b>
2.1 主要仪器.....	17
2.2 主要试剂.....	18
2.3 沉积物中磷的提取方法.....	19
2.4 磷含量的测定.....	20
2.4.1 水体中磷的测定.....	20
2.4.2 沉积物中不同形态磷含量的测定.....	21
2.5 水的氧同位素组成的测定.....	21
2.6 河口沉积物中不同形态磷酸盐氧同位素的测定.....	22
2.6.1 Mg(OH) <sub>2</sub> 共沉淀 (MAGIC) .....	23
2.6.2 磷钼酸铵沉淀 (APM) 的形成与溶解.....	23
2.6.3 磷酸铵镁沉淀 (MAP) 的形成与溶解.....	25

2.6.4 阳离子的去除.....	25
2.6.5 阴离子交换树脂除残余的 DOM .....	25
2.6.6 加酸通气除 $\text{HCO}_3^-$ .....	26
2.6.7 $\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 沉淀的形成和清洗 .....	26
2.6.8 $\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 样品 $\delta^{18}\text{O}$ 的测定 .....	26
2.7 结果与讨论.....	27
2.7.1 分离纯化流程的回收率.....	28
2.7.2 DOM 的去除效果 .....	29
2.7.3 判断提取、分离和纯化过程中氧同位素是否分馏.....	30
2.7.4 沉积物中 4 种形态磷酸盐氧同位素测量的精密度.....	33
2.8 结论.....	34
<b>第三章 九龙江河口表层水中磷酸盐氧同位素的分布特征.....</b>	<b>35</b>
3.1 前言.....	35
3.2 样品的采集.....	36
3.3 2013 年 10 月样品结果与讨论.....	39
3.3.1 溶解无机磷、SPM 和颗粒磷含量.....	39
3.3.2 水的氧同位素组成.....	41
3.3.3 磷酸盐的氧同位素组成.....	41
3.4 2013 年 7 月样品的结果与讨论.....	43
3.4.1 溶解无机磷含量.....	43
3.4.2 水的氧同位素变化.....	43
3.4.3 磷酸盐的氧同位素组成.....	43
3.5 地下水的结果与讨论.....	45
3.6 结论.....	45
<b>第四章 九龙江河口沉积物中不同形态磷酸盐的氧同位素特征... 51</b>	<b>51</b>
4.1 前言.....	51
4.2 样品采集.....	52
4.3 结果与讨论.....	53
4.3.1 溶解无机磷和溶解有机磷.....	53

4.3.2 悬浮颗粒无机磷和悬浮颗粒有机磷.....	54
4.3.3 沉积物中不同形态磷.....	56
4.3.4 表层沉积物中不同形态磷酸盐的氧同位素组成.....	59
4.4 结论.....	61
<b>第五章 结论与展望.....</b>	<b>65</b>
5.1 主要结论.....	65
5.2 不足与展望.....	65
参考文献.....	67
附录.....	81
致谢.....	82

厦门大学博硕士学位论文摘要库

**Contents**

**Abstract in Chinese** ..... X

**Abstract in English**..... XI

**Chapter 1 Introduction**..... 1

**1.1 Biogeochemical phosphorus cycle** ..... 1

        1.1.1 Implications for phosphorus cycle ..... 1

        1.1.2 Species of phosphorus..... 1

        1.1.3 Microbial phosphorus cycle in the ocean..... 2

        1.1.4 Phosphorus cycle in estuary ..... 5

        1.1.5 Phosphorus cycle in marine sediments ..... 6

**1.2 Process of oxygen isotope composition in phosphate** ..... 8

        1.2.1 Methods of oxygen isotopes composition in phosphate ..... 9

        1.2.2 Fractionations of oxygen isotopes composition in phosphate..... 10

        1.2.3 Tracing phosphorus cycle in soil-plant system using oxygen isotopes composition in phosphate..... 13

        1.2.4 Tracing phosphorus cycle in rivers, lakes and oceans using oxygen isotopes compositions in phosphate ..... 14

**1.3 Objectives of this thesis** ..... 16

**Chapter 2 Methods** ..... 17

**2.1 Main equipments** ..... 17

**2.2 Main reagents** ..... 18

**2.3 Extraction method of phosphorus of different species in sediment**..... 19

**2.4 Measurement of phosphorus** ..... 20

        2.4.1 Measurement of phosphorus in water ..... 20

        2.4.2 Measurement of phosphorus of different species in sediment..... 21

**2.5 Measurement of oxygen isotopes compositions in water** ..... 21

**2.6 Measurement of oxygen isotopes composition in phosphate of different species in estuary sediment** ..... 22

2.6.1 Phosphate co-precipitation with magnesium hydroxide (MAGIC) .....	23
2.6.2 Ammonium phospho-molybdate (APM) precipitation and dissolution .....	23
2.6.3 Magnesium ammonium phosphate (MAP) precipitation and dissolution .....	25
2.6.4 Cation exchange .....	25
2.6.5 Removal of excess DOM by anion chromatography .....	25
2.6.6 Removal $\text{HCO}_3^-$ by adding $\text{HNO}_3$ and carrying $\text{N}_2$ .....	26
2.6.7 $\text{Ag}_3\text{PO}_4$ precipitation .....	26
2.6.8 Measurement of oxygen isotopes compositions in $\text{Ag}_3\text{PO}_4$ .....	26
<b>2.7 Results and discussions</b> .....	27
2.7.1 Recovery of separation and purification protocol.....	28
2.7.2 Removal effect of dissolved organic matters .....	29
2.7.3 Determination of fractionation of extraction, separation and purification steps .....	30
2.7.4 Measurement of oxygen isotopes composition in phosphate of four species in surface sediment .....	33
<b>2.8 Conclusions</b> .....	34
<b>Chapter 3 Distribution patterns of oxygen isotopes compositions of phosphate in surface water in Jiulong River Estuary</b> .....	35
<b>3.1 Introduction</b> .....	35
<b>3.2 Sampling</b> .....	35
<b>3.3 Results and discussions of samples in October, 2013</b> .....	36
3.3.1 Concentrations of DIP, SPM, PIP and POP .....	39
3.3.2 Oxygen isotopes compositions in water .....	41
3.3.3 Oxygen isotopes compositions in phosphate .....	41
<b>3.4 Results and discussions of samples in July, 2013</b> .....	43
3.4.1 Concentrations of DIP .....	43
3.4.2 Variation of oxygen isotopes compositions in water .....	43



3.4.3 Variation of oxygen isotopes compositions in dissolved phosphate .....	43
<b>3.5 Results and discussions of groundwater .....</b>	<b>45</b>
<b>3.6 Conclusions .....</b>	<b>45</b>
<b>Chapter 4 Oxygen isotopes composition in phosphate of four inorganic species in surface sediment in Jiulong River Estuary and its tracing applications .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1 Introduction .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2 Sampling .....</b>	<b>52</b>
<b>4.3 Results and discussions .....</b>	<b>53</b>
4.3.1 Dissolved inorganic and organic phosphorus .....	53
4.3.2 Particulate inorganic and organic phosphorus .....	54
4.3.3 Phosphorus of different species in surface sediment .....	56
4.3.4 Oxygen isotopes compositions in phosphate of different species in surface sediment.....	58
<b>4.4 Conclusions .....</b>	<b>61</b>
<b>Chapter 5 Conclutions and Outlook .....</b>	<b>64</b>
<b>5.1 Main conclusions .....</b>	<b>64</b>
<b>5.2 Outlook.....</b>	<b>64</b>
<b>References .....</b>	<b>66</b>
<b>Appendix .....</b>	<b>80</b>
<b>Acknowledge ment .....</b>	<b>81</b>

## 摘要

磷是生物生长的必需营养盐,但目前磷循环的示踪手段仍十分有限。磷酸盐的氧同位素只有在生物或酶的作用下才会和外界水发生氧交换后产生分馏,因此其既可以示踪磷的源区,也具有指示生物对磷利用程度的潜力。目前磷酸盐氧同位素已被广泛用来示踪开阔大洋、河口及土壤中的磷循环。河口磷循环影响着河流向海洋的磷输入。以往相关研究以各种形态磷含量的分布特征为主,对于磷的源区及各种形态磷间的转化了解甚少。

本研究建立了河口底层沉积物中 4 种无机形态磷酸盐氧同位素的测定方法。利用  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液和国际磷矿标准 (NBS-120c) 对沉积物中磷的提取、分离和纯化方法进行验证,结果表明处理流程可以获得纯的  $\text{Ag}_3\text{PO}_4$ ,且不会造成明显的磷酸盐氧同位素分馏。利用一个石狮近岸的天然沉积物样品进行平行性测定,结果显示方法的精密度良好,且不同形态磷酸盐具有不同的氧同位素值。

对 2013 年 10 月九龙江河口区表层水溶解磷酸盐的氧同位素进行研究,发现河流端和海水端水体中磷酸盐的氧同位素接近平衡分馏值。根据磷酸盐保持着源区的氧同位素值,可以判断出龙海市区 (A5 站)、南溪口 (A8 站)、厦门第一码头 (X2 站) 和浒茂洲岔道口 (X7 站) 对九龙江河口存在的磷输入。2013 年 12 月河口周围地下水中溶解磷酸盐的氧同位素接近平衡分馏值。而 2013 年 7 月暴雨时河口表层水溶解磷酸盐的氧同位素远高于平衡分馏值。这些结果显示九龙江河口水体溶解磷酸盐氧同位素对环境具有灵敏的响应。

2013 年 7 月暴雨后 (10 天) 九龙江河口区表层沉积物具有高的磷含量,尤其有机磷高达  $6.6 \sim 10.2 \mu\text{mol/g}$ 。弱吸附态和铁氧化物结合态磷酸盐的氧同位素和相应水体溶解态磷酸盐接近,都呈现出由河流端向海端增高的特点,显示其来自于河口区水体的特征。自生磷灰石和碎屑磷灰石的磷酸盐氧同位素接近,都明显低于相应站位水体溶解态磷酸盐,由河流端向海端变化不大,显示其陆源特征。

**关键词:** 连续提取法; 磷酸盐; 氧同位素; 九龙江河口

## Abstract

Phosphorus is an essential nutrient for all living organisms, but analytical tools to trace phosphorus sources and cycles are limited. In the absence of biological activity and enzymatic hydrolysis, isotope exchange between phosphate oxygen and water is slow and can be considered negligible for the time scales of concern for most environmental applications. Oxygen isotope composition in phosphate ( $\delta^{18}\text{O}_\text{P}$ ) as a tracer can be utilized to determine the phosphorus sources and the degree of phosphorus cycling within the biomass. In the past decade,  $\delta^{18}\text{O}_\text{P}$  has been well applied in tracing phosphorus cycles in open ocean, estuary and soil. Riverine input as the main source for the ocean can be easily influenced by the phosphorus cycle in the estuary. Most studies focus on the distribution patterns of phosphorus of different species in estuary, but few studies report the phosphorus source and transformation in different species in the estuary.

This study has developed the measurement of oxygen isotope composition in phosphate of 4 inorganic species in sediment in estuary. In order to determine no oxygen isotope fractionation in phosphate in the procedure of extractions, separation and purification, we choose  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  solution and international phosphorite standard (NBS-120c) to achieve pure  $\text{Ag}_3\text{PO}_4$  through this procedure. To determine the accuracy of  $\delta^{18}\text{O}_\text{P}$  of different species in sediment, we choose a natural sediment sample in Shishi coastal area. The results show that the accuracy is sensitive and different  $\delta^{18}\text{O}_\text{P}$  values are variable in phosphate of different species.

An analysis assessing variations in the oxygen isotope composition of dissolved inorganic phosphate (DIP) in surface water was conducted in Jiulong river estuary in October, 2013. The results show that the  $\delta^{18}\text{O}$  values of DIP in the river end-member and ocean end-member are closely to the equilibrium value. According to the  $\delta^{18}\text{O}$  values of DIP retaining the original values of sources, phosphate point source inputs can be found in the Longhai city (station A5), the South river (station A8), Xiamen first wharf (station X2), tributary in Humao Bay (station X7). The  $\delta^{18}\text{O}$  values of DIP in groundwater near Jiulong river estuary are close to the equilibrium value. But the

$\delta^{18}\text{O}$  values of DIP in surface water during rainstorm event are much higher than the equilibrium value. Those results show that  $\delta^{18}\text{O}$  values of DIP in Jiulong river are sensitive to the environmental changes.

High concentration of phosphorus is in surface sediment, especially organic phosphorus, in Jiulong river estuary after rainstorm (10 days later) in July, 2013. The  $\delta^{18}\text{O}$  values of loosely-sorbed phosphate and Fe-bound phosphate have the characteristic of low value in river end-member and high value in ocean end-member, with same change trend with the  $\delta^{18}\text{O}$  values of DIP. The  $\delta^{18}\text{O}$  values of authigenic phosphate and detrital phosphate are close at the same station, but lower than  $\delta^{18}\text{O}$  values of DIP, with the no clear deviation in river and end-member and terrigenous characteristics.

**Key words:** SEDEX; phosphate; oxygen isotopes composition; Jiulong River estuary

## 第一章 绪论

### 1.1 磷的海洋生物地球化学循环

#### 1.1.1 磷循环的研究意义

磷是重要的生命元素，整个生物圈的构建都需要磷 (De Duve, 1991; Bridger 和 Henderson, 1983; Karl 和 Björkman, 2002; Lehninger 等, 1993; Schlesinger, 1991)。磷对于细胞构成 (磷脂)、遗传信息的存储和表达 (DNA、RNA)、能量转换 (ATP) 及许多新陈代谢过程都很重要 (Ruttenberg, 2003; Westheimer, 1987)。因此海洋磷循环对于海洋生态系统结构、海洋环境甚至全球气候变化都具有重要影响。随着工农业的发展，人类活动向环境中排放的磷通量急剧增大，其环境效应已引起了普遍关注。

在海洋环境中，磷以多种无机和有机形态存在，并可在溶解态和颗粒态之间相互转换 (Benitez-Nelson, 2000; Paytan 和 McLaughlin, 2007)。海洋中磷的来源最终受控于板块运动和紧接着的陆地岩石风化过程 (Compton 等, 2000; Delaney, 1998)。河水中的磷在河口会经历复杂的生物地球化学过程，这些过程会对河流向海洋的磷输入产生重大影响。因此河口磷循环研究具有重要的意义。

#### 1.1.2 磷的形态

磷 (P)，原子序数为 15，相对原子质量为 30.974，位于元素周期表第三周期 VA 族，属非金属元素。磷存在三种不同物理性质的同素异形体 (白磷、红磷和黑磷)，但是它们均不能稳定存在于自然界中。事实上，磷一般与氧结合形成五氧化二磷 ( $P_2O_5$ ) 或者以磷酸盐储存在地壳中。自然界中发现磷酸盐矿物约 300 种，但 95% 的磷都以磷灰石形式存在 (Jahnke, 1992)。

磷有不同的化合价：+5 价 (磷酸盐  $P_i$ ,  $PO_4^{3-}$ )，+3 价 (亚磷酸盐,  $PO_3^{3-}$ )，+1 价 (次磷酸盐,  $PO_2^{3-}$ ) 和 -3 价 (磷化氢气体,  $PH_3$ )。海洋中磷主要以 +5 价的磷酸盐存在于溶解态和颗粒态中 (van der Zee 等, 2007)。磷原子的质量可从 24 到 46，但只有  $^{31}P$  是稳定的，仅有  $^{32}P$  ( $T_{1/2} = 14.28$  d) 和  $^{33}P$  ( $T_{1/2} = 25.3$  d) 有足够长的半衰期能使它们作为示踪剂应用于实验室培养和野外观测 (张远辉等, 2003)。与大多数宇生核素一样， $^{32}P$  和  $^{33}P$  主要在大气中产生 (~90%)，通过湿

沉降进入上层海洋 (Lal, 2001)。相比于于表层水体中的 P 含量, 海水中  $^{32}\text{P}$ 、 $^{33}\text{P}$  含量 (即比活度) 相当低, 仅为  $0.1 \sim 1 \text{ dpm/m}^3$  (陈锦芳, 2006)。 $^{32}\text{P}$  和  $^{33}\text{P}$  在海洋中的沉降通量分别为每平方厘米  $5.82 \times 10^{-3}$  和  $6.93 \times 10^{-3}$  个/min (Lal, 2001)。尽管放射性磷具有低的丰度和通量,  $^{32}\text{P}$  和  $^{33}\text{P}$  仍是研究近岸及开阔大洋中磷循环的重要工具 (Benitez-Nelson 和 Karl, 2002; Lal 等, 1988; 陈锦芳, 2006)。通过添加人工放射性磷来示踪磷循环会造成环境污染和生态安全问题 (Melby 等, 2013)。

近二十年来, 随着超滤分离技术的发展, 溶解态磷可以被进一步分为胶体相和真溶解相 (Cai 和 Guo, 2009), 胶体态磷也由胶体无机磷 (CIP) 和胶体有机磷 (COP) 组成。近年来,  $^{31}\text{P}$  核磁共振技术 (nuclear magnetic resonance, NMR) 和连续提取技术 (sequential extraction technique, SEDEX, 图 1.1) 被用来研究颗粒态磷的组成、转化以及不同化学形态颗粒磷的行为和时空变化。连续提取技术已被广泛地应用于海洋沉积物磷的形态分析, 它可将颗粒态磷分为弱吸附态磷 (loosely-sorbed or exchangeable P)、铁结合态磷 (Fe-bound P)、生源磷灰石及与碳酸钙结合态磷 (authigenic apatite, biogenic apatite and  $\text{CaCO}_3$ -bound P)、碎屑磷灰石 (detrital apatite) 以及不溶于酸的颗粒有机磷 (organic P) (图 1.1)。

### 1.1.3 海洋微生物的磷循环

海洋微生物的磷循环是全球磷循环最活跃的组成部分 (Karl, 2014)。微生物磷循环的基本过程包括磷的摄取、磷同化到各种有机分子和有机磷的再矿化 (图 1.2)。在低磷环境下微生物能够生存依赖于其对磷的成功获取, 微生物中磷酸盐转运蛋白具有高的亲合力使其在磷转化不停变化环境中处于竞争优势 (Arrigo, 2005; Zubkov 等, 2007)。另外, 能获取磷酸盐底物外其他磷的能力更使微生物处于竞争优势, 但这需要大的基因组和更复杂的代谢调节方式 (Dyhrman 等, 2006, 2009; Van Mooy 等, 2009)。

海洋微生物能够同化至少四种不同的溶解磷: (a) 多种价态的无机含氧分子, 包括磷酸盐 ( $\text{P}_i$ ), 次磷酸盐 ( $\text{PO}_3^{3-}$ ), 亚磷酸盐 ( $\text{PO}_2^{3-}$ ), 焦磷酸盐 (pyro-P) 和无机聚磷酸盐 (poly-P); (b) 单酯键和双酯键相连的有机磷 (C-O-P); (c) 有机磷酸酐 (C-O-P-O-P); 和有机磷 (C-P)。后面三种包括了从单酯到聚合物一系列底物, 他们集体组成了 DOP 库 (Karl, 2014)。尽管已经能够准确测定大

洋表层的 DOP 浓度, 但 DOP 的化学组成、分子图谱及生物可利用性依然有待解决 (Karl 和 Björkman, 2002)。如果 DOP 最终来源是活体生物, 那这些 DOP 应该可以被生物利用而不会在全球大洋表层海水中累积。因此, 热带和亚热带环境中升高的 DOP:Pi 浓度比一定是 DOP 产生与吸收动力学平衡过程的结果, 维持 DOP 通量平衡的相关过程是分泌、摄食、病毒溶解和细胞死亡 (Karl 和 Björkman, 2002)。

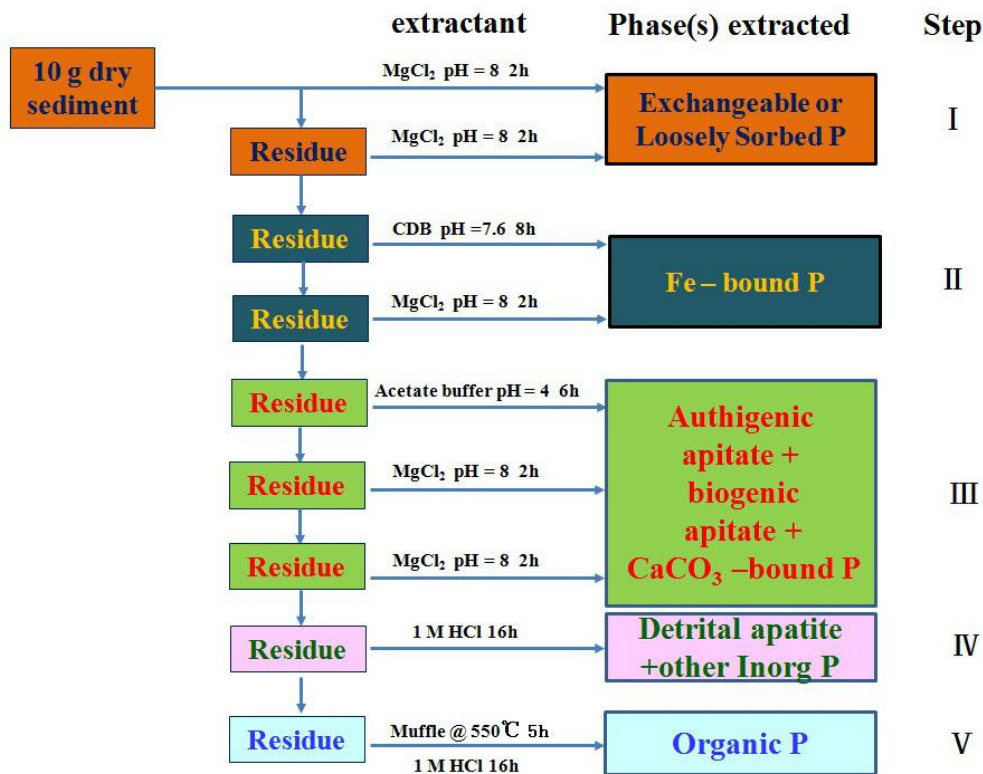


图 1.1 连续萃取法 (SEDEX) 分离出的不同形态的颗粒磷 (Ruttenberg 等, 2009)

Figure 1.1 Various species of particulate phosphorus separated by sequential extraction technique (SEDEX) (from Ruttenberg 等, 2009)

吸收到细胞的磷酸盐和有机磷在细胞内会被合成为许多低分子量的有机磷化合物。细胞内的磷份额和亚细胞内的磷分子在生物群落中变化非常大, 尤其是某些生物为了适应相应的环境 (Zubkov 等, 2003, 2007)。例如, 尽管许多微生物的磷与核酸相关联, 相对于 DNA 而言 RNA 中磷的相对比例与生长速率和基因组大小存在一定关系。低生长速率和线性基因都是生物为了生活在长期磷匮乏

海域而形成的减少细胞内磷份额的进化策略。

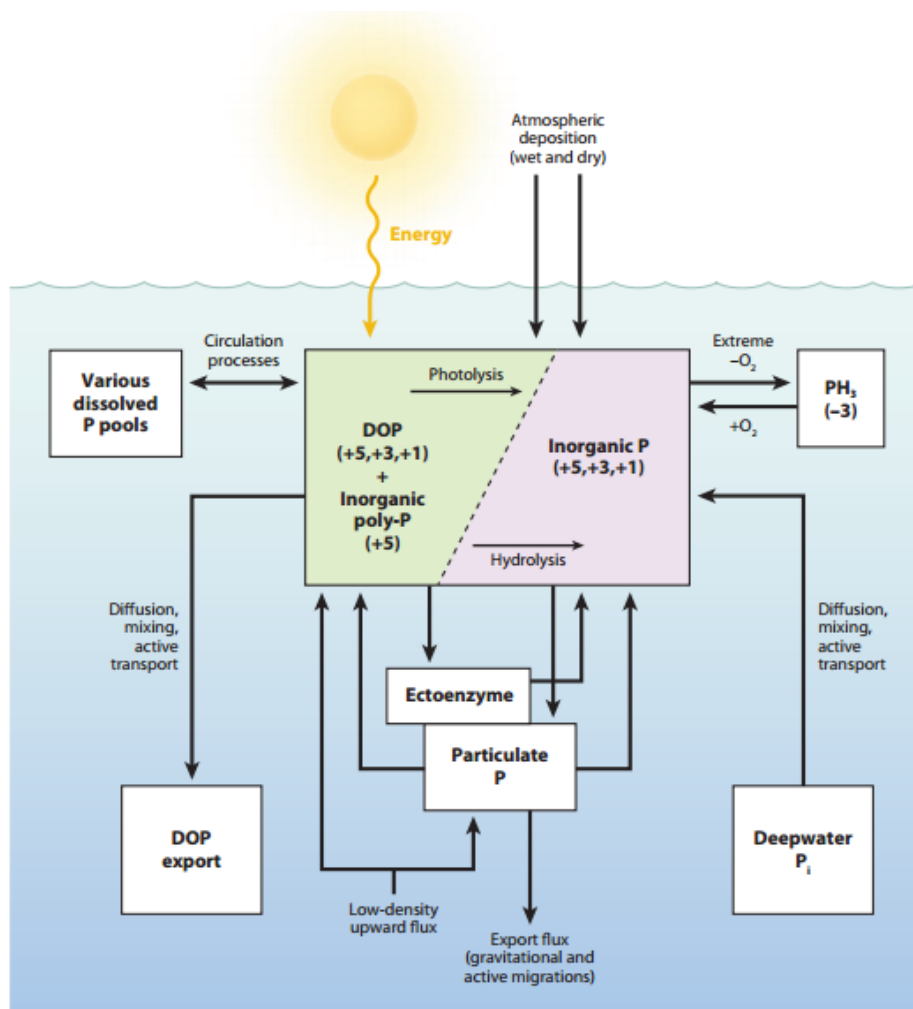


图 1.2 开阔大洋磷循环简图 (Karl, 2014) (方框代表储库, 箭头代表流通方向)

Figure 1.2 Schematic representation of the inventories (boxes) and fluxes (arrows) that constitute the open-ocean P cycle. (from Karl, 2014)

多数被微生物同化的磷酸盐和溶解有机磷在大洋表层被再矿化成磷酸盐, 然后重新被微生物吸收来维持再生生产力和能量存储。在开阔海洋生态系统中, 约 90% 的总初级生产力是依靠当地磷的再循环来维持; 剩下的 10% (甚至更少) 是依靠外源输入新磷 (通常为磷酸盐形态) 来维持 (Benitez-Nelson, 2000)。一般认为在相对长的时间尺度 (几十年到几百年), 开阔大洋系统处于磷稳态 (磷的输入=磷的输出), 然而, 稳态假说在短时间尺度 (几天到几年) 可能并不适合 (Benitez-Nelson 和 Karl, 2002)。如果磷酸盐的短期供应超过原地的输出速率, 那么有机磷库会扩张直到磷的输入和输出达到新的平衡, 但这需假定其他营养盐



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](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

廈門大學博碩士論文摘要庫