

海水中溶解有机磷的测定方法*

于 志 刚

(青岛海洋大学化学化工学院, 青岛 266003)

关键词 溶解有机磷 生物地球化学 紫外线光化学氧化 过二硫 酸盐化学氧化
加热水解

1 海水中的溶解有机磷

磷和氮一样, 都是海洋环境中的重要生源要素, 其在水环境中的时空分布控制着海洋生态系统中的初级生产过程. 在大洋或深海区, 氮的供应相对不足常是初级生产的制约因素, 但在浅海区, 特别是河口和海湾, 由于农业施肥、城市污水及大气干湿沉降等的作用, 氮/磷比值常远高于 Redfield 比值, 从而使磷成为初级生产的制约因素^[1~6].

近一二十年来, 海洋环境科学研究重点转向近岸浅水生态系统, 磷的生物地球化学循环问题在海洋生态系统研究中日益引起重视. 随着对磷的生物地球化学循环研究的深入, 科学家们发现, 当水环境中溶解态活性磷(DRP)被生物耗尽时, 溶解有机磷(DOP)也可被浮游生物利用^[7~13]. DOP 作为溶解态总磷(DTP)的一部分, 其浓度常常超过 DTP 的另一组成部分——溶解态活性磷 DRP, 而成为浮游生态系中磷的重要来源^[14~17]. 因此, DOP 在磷的生物地球化学循环和海洋初级生产过程中起着十分重要的作用. DOP 的分析测定方法随之成为海洋环境科学研究中的一个重要问题.

2 海水中溶解有机磷分析方法的发展

通常将溶解有机磷定义为溶解总磷扣除溶解活性磷后的那部分, 即 $DOP = DTP - DRP$. 这一定义可能带来的问题是: (1) DOP 中易分解部分会在 DRP 测定过程中显色, 此时 DRP 高于 DIP, 从而使 DOP 测定值偏低; (2) 同样, 若测定 DTP 过程中无机多聚磷酸盐解聚并显色, 则会导致 DOP 测定值偏高. 显然, 海水中 DOP 并不是一个严格的定义, 而只是一个可操作的定义. 尽管如此, 这一定义还是为人们普遍接受. 绝大多数测定 DOP 的方法都依据这一定义, 首先测定 DRP, 之后通过不同方法将 DTP 分解为可以为磷钼蓝法显色的活性磷, 用测

本文于 1998-06-19 收到, 修改稿于 1998-11-09 收到.

* 山东省自然科学基金(编号: Q95B0314)和国家自然科学基金资助项目(编号: 497901001).

作者简介: 于志刚, 男, 37 岁, 副教授, 硕士, 从事海洋生物地球化学研究.

定 *DRP* 相同的方法测定 *DTP* 含量, 则两者测定之差值即为 *DOP*. 因此, 将 *DTP* 定量转化为正磷酸盐就成为 *DOP* 分析的关键问题.

表 1 分解溶解总磷的方法(只列代表性文献)

分解方法	作者	备注
硫酸和过氧化氢消化法	Redfield 等 ^[4]	
	Harvey 等 ^[18]	
高氯酸消化法	Hansen 等 ^[20]	
	Strickland 等 ^[21]	
过二硫酸钾法	Menzel 等 ^[23]	
	Koroleff 等 ^[22]	酸性方法
	Valderrama 等 ^[24]	碱性方法
紫外法	Armstrong 等 ^[25,26]	
硫酸镁高温氧化法	Solorzano 等 ^[27]	450℃ 高温
硝酸盐氧化法	Cembella 等 ^[28]	蒸干, 有飞溅问题
氢化物-气相色谱法	Hushimoto 等 ^[29]	形成氢化物后, 用
		气相色谱分析

分解 *DTP* 的方法有硫酸和过氧化氢消化法^[18,19]、高氯酸消化法^[20,21]、过二硫酸盐化学氧化法^[22-24]、紫外线光化学氧化法^[25,26]、硫酸镁高温氧化法^[27]、硝酸盐氧化法^[28]、氢化物-气相色谱法^[29]等(表 1). 在这些分析方法中, 适合改进为自动分析方法的紫外线光化学氧化法(以下简称 UV 法)和过二硫酸盐化学氧化法(以下简称 $K_2S_2O_8$ 法)为大多数实验室采用, 且出现了将此两种方法结合起来的研究报告^[30-32]. 下面着重讨论这两种方法.

3 紫外线光化学氧化法、过二硫酸盐化学氧化法及两种方法的结合

3.1 UV 法

Armstrong 等^[25,26]最早提出了用紫外线照射分解海水中溶解有机物质的方法. 他们在海水样品中加 1~2 滴 30% H_2O_2 之后用紫外线照射海水样品 1~2 h, 发现可以有效地分解其中的有机物. 笔者将此方法应用于 *DOP* 的分析, 并以几种含磷化合物作为标准样品加入到海水中测定其回收率, 以检查方法的分解效率, 结果发现, 磷酸甘油(β -glycerol phosphate)、RNA、磷酸胆碱(choline phosphate)和 2-氨基乙基磷酸(2-aminoethane-phosphoric acid)可以完全分解, 但 *ATP* 和无机多聚磷酸盐不被分解. 笔者认为要完全分解这些化合物, 需增加一个酸性条件下的加热水解步骤. Solorzano 等^[33]采用 3 步法确定海水中 *DOP* 和多聚磷酸盐(无机和有机), 他们首先测定过滤海水样品得到 *DRP*, 之后用 UV 法测得 *DTP* (UV), 则差值得 *DOP*; 最后将经 UV 处理过的样品在酸性条件下沸水浴 2 h, 测得 *DTP* (UV 加水解), 则两种方法之差值 *DTP* (VU 加水解) - *DTP* (UV) 为多聚磷酸盐, 但此方法未用任何标准物质进行实验. Ridal 等^[31]用紫外法分析不同海区的海水样品, 并对方法作了修改, 即将样品进行酸化后再用紫外线照射, 但也没有标准物质进行回收率实验. Ormaza-Gonzalez 等^[34]用 8 种含磷化合物作为标准物质, 测定了紫外法对每种化合物的回收率, 结果发现, 对 4-硝基苯酚磷酸盐(4-nitrophenyl phosphate)、磷酸甘油、6-磷酸葡萄糖(glucose-6-phosphate)、2-氨基乙基磷酸回收率高于 80%, 但对三聚磷酸盐、三偏磷酸盐、5'-二磷酸鸟嘌呤核苷(guanosine-5-diphosphate)(GDP)和 *ATP*, 回收率低于 20%.

3.2 $K_2S_2O_8$ 法

Menzel 等^[23]提出用 5% $K_2S_2O_8$ 作为氧化剂加入到海水样品中, 之后在 120℃ 下反应

30 min,或沸水浴中煮沸 1 h,以分解 DOP.对一些样品进行测定并与硫酸消化法比较,两者结果一致,但未用标准物质进行回收率测定. Armstrong 等^[26]将经紫外线照射 5 h 后的海水样品用盐酸酸化,之后煮沸 1 h,发现测得 DTP 较仅经紫外线照射处理的 DTP 值升高 0.02~0.05 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$,并称这是第一次证实海水中多聚磷酸盐存在. 笔者还发现在上述煮沸过程中,加入的焦磷酸盐可以回收 80%. Lennox^[35]也用酸性过二硫酸钾法测定 DTP,但消化温度提高为 145 $^{\circ}\text{C}$ 下反应 1.5 h,之后 250 $^{\circ}\text{C}$ 下再反应 1.5 h. 试验了 5 种含磷化合物的分解效率,这 5 种化合物为:腺苷 5'-磷酸(adenosine-5-monophosphoric acid)(AMP)、六偏磷酸钠、苯磷酸二钠(disodium phenylphosphate)、1-磷酸葡萄糖(glucose-1-phosphoric acid)(钾盐)和 6-磷酸果糖(fructose-6-phosphoric acid)(钠盐),回收率均接近 100%. Ridal 等^[31]对不同海区的海水样品用酸性过二硫酸钾消化法进行测定,所用反应条件为 126 $^{\circ}\text{C}$ 下反应 1.5 h,并试验了高、低两种浓度过二硫酸钾的分解效率,发现高浓度时(40 $\text{mgK}_2\text{S}_2\text{O}_8/\text{cm}^3$ 样品)获得较高的测定值,但由于测定精密度及其他问题,笔者仍建议采用低浓度 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ (4 $\text{mg K}_2\text{S}_2\text{O}_8/\text{cm}^3$ 样品)作为氧化剂. Ormaza-Gonzalez 等^[34]对 Koroleff 等^[22]的酸性 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 法和 Valderama^[24]的碱性 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 法进行了实验比较,两种方法的反应条件均为 120 $^{\circ}\text{C}$ 下反应 30 min. 应用 8 种含磷化合物作为标准物质进行了回收率测定,这 8 种化合物为:4-硝基苯酚磷酸盐(4-nitrophenyl phosphate)、磷酸甘油、6-磷酸葡萄糖、2-氨基乙基磷酸、三聚磷酸钠、三偏磷酸钠、5'-二磷酸鸟嘌呤核苷(GDP)和 ATP. 结果表明,碱性方法总体上比酸性方法回收率高,但对 GDP、ATP 和无机多聚磷酸盐,酸性方法的回收率高.

3.3 UV 法和 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 法的结合(记为 UV- $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 法)

Ridal 等^[31]将两种方法简单地进行了组合,即先用紫外线照射样品 6 h 之后用酸性 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 在 125 $^{\circ}\text{C}$ 下反应 1.5 h. 对天然海水样品进行分析,并与 UV 法和 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 法比较,发现较任一种单独的方法都高:

$$DOP(\text{UV}) = (90 \pm 6)\% \times DOP(\text{UV} - \text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8),$$

$$DOP(\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8) = (87 \pm 8)\% \times DOP(\text{UV} - \text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8).$$

Ron-Vaz 等^[32]将 UV 法和 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 法组合为一个自动分析方法,用于分析土壤溶液或提取液中的 DOP. 他们将未经酸化的样品加入 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 后经紫外线照射,并强调不酸化是为了避免多聚无机磷酸盐的分解,因而测出的是“真正的”DOP. 笔者对 9 种含磷化合物进行了回收率实验,得出了两点值得注意的结果:(1) 加与不加 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$,回收率几乎相同;笔者认为,紫外线照射已足以分解 DOP(ATP、NADH 等除外);(2) 对无机多聚磷酸盐和 ATP、NADH 等,加与不加 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 其回收率也相同,但均低于 10%,笔者推测 UV 和 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 都不能分解多聚磷酸盐. Collos 等^[30]发展了一种 UV- $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 结合的自动分析方法,先将酸化的样品经紫外线照射,此后再加 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 和 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 溶液,在中、碱性条件下继续用紫外线照射. 用此方法对 6 种含磷化合物进行了回收率实验,发现回收率为 73%~100%. 这 6 种化合物为:腺苷 5'-磷酸(adenosine-5-monophosphate)、磷酸甘油、5'-二磷酸鸟嘌呤核苷(guanosine-5'-diphosphate)、phosphoenolpyruvate、phosphoryl choline chloride 和 5-磷酸核糖(ribose-5-phosphate),但可以看到,这些化合物不包括难分解的无机和有机多聚磷酸盐.

4 分析和展望

综上所述,已被用作标准物质测定回收率的含磷化合物可以分为 3 类:(1) 含有一个磷酸根基团的有机磷化合物,其包含有 P-O-C 或 P-C 键,是有机非聚磷化合物. 这一类化合物有:5'-二磷酸鸟嘌呤核苷(AMP)、1-磷酸葡萄糖(glucose-1-phosphate)、果糖-1-磷酸盐(fructose-1-dihydrogen phosphate)、4-硝基苯酚磷酸盐、2-氨基乙基磷酸等. 或其含有多个磷酸根基团,但不是以聚磷酸盐形式存在,即只含有 P-O-C 键. 这样的化合物有 RNA 等. 这类物质以下均简记为 OMP(organic mono-phosphate). (2) 含有多个磷酸根基团且以聚合磷酸盐形式存在的有机聚磷化合物,其含有 P-O-P-O-C 键,例 ATP、GDP 等,记为 OPP(organic poly-phosphate). (3) 含有多个磷酸根基团且以聚合磷酸盐形式存在的无机聚磷化合物,其含有 P-O-P 键,例三偏磷酸钠、焦磷酸钠等记为 IPP(inorganic polyphosphate). 为讨论方便,将正磷酸盐的非聚磷化合物记为 IMP(inorganic mono-phosphate). 这样,海水中 DTP 按结构分类,就有 DIMP、DIPP、DOMP 和 DOPP 4 类.

对已发表文献依据此分类进行分析和归纳不难发现,单纯的紫外线照射仅能有效地分解 DOMP,而对 DIPP 和 DOPP 作用甚微,说明紫外线光化学氧化法可以破坏 P-O-C 或 P-C 键,但对 P-O-P-O-C 键的破坏无效,这可能是由于 O-C 键断裂后 UV 对 P-O-P 键缺乏足够的破坏力,即 UV 对多聚磷酸盐的解聚无效.

$K_2S_2O_8$ 法大多采用较高温度($>100\text{ }^\circ\text{C}$)和酸性条件,分解效率也令人满意,说明 $K_2S_2O_8$ 法可以有效地分解海水中各种形式的溶解有机磷. Ormaza-Gonzalez 等^[34]比较了酸性和碱性条件对 $K_2S_2O_8$ 分解含磷化合物的影响,发现总体上虽碱性方法回收率稍高,但对多聚磷酸盐(ATP、GDP、三聚磷酸钠、三偏磷酸钠),酸性方法明显高些,说明酸性条件有利于聚合磷酸盐水解.

值得注意的是,UV- $K_2S_2O_8$ 结合法一般都得到比单一方法更高的回收率^[31],但用此方法时保持样品之天然 pH 条件^[32],对 ATP、NADH、三聚磷酸盐、三偏磷酸盐的回收率一般均很低(10%). 这进一步说明虽然 UV 和 $K_2S_2O_8$ 法可有效分解有机磷化合物,但对聚合磷酸盐解聚(破坏 P-O-P 键)不很有效,热和酸性条件才是聚合磷酸盐水解的关键.

当然,以上仅是依据已发表文献进行的归纳和引伸,含有一定的推测,应进行实验验证. 为此,我们应用一台 TECHNICON 连续流动分析仪(AA II)进行了初步实验. 实验是在普通活性磷酸盐分析流路之前,增加

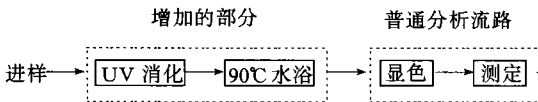


图 1 实验流程简图

一套紫外(UV)消化装置(15 W)和水浴消化装置(均系德国 BRAN+LUEBBE 公司提供). 分析流程简图如图 1. 分别试验了 UV 法(水浴温度为 $90\text{ }^\circ\text{C}$)、UV- H_2SO_4 法(水浴温度为 $90\text{ }^\circ\text{C}$,并在样品中加入少量硫酸)、 $K_2S_2O_8$ 法(样品中加入 $K_2S_2O_8$,水浴温度为 $90\text{ }^\circ\text{C}$,并关闭 UV 电源)和 UV- $K_2S_2O_8$ 法(样品中加入 $K_2S_2O_8$,水浴温度为 $90\text{ }^\circ\text{C}$,并打开 UV 电源). 实验用标准化合物为焦磷酸盐(代表 DIPP)、ATP、NAD(代表 DOPP)和 AMP、果糖磷酸盐(FRP)(代表 DOMP). 实验结果见表 2.

表2 UV、K₂S₂O₈对海水中不同类型含磷化合物的分解效率(%)

类型	化合物	UV法	UV-H ₂ SO ₄ 法	K ₂ S ₂ O ₈ 法	UV-K ₂ S ₂ O ₈ 法
DIPP	焦磷酸盐	3.2	14	6.4	9.5
DOPP	ATP	3.3	12	11	14
	NAD	8.0	17	24	34
DOMP	AMP	94	94	55	68
	FRP	109	108	57	71

可以看到,本文分析归纳的基本结论正确,但有两点是未曾料到的:(1) K₂S₂O₈法较UV法提高了DIPP和DOPP的分解效率,但对DOMP的分解效率仅为50%~60%,远低于文献报道的数值,可能与温度低(90℃)、时间短(<30min)有关;(2) UV-K₂S₂O₈法对DIPP和DOPP获得了较任何一种单一方法都高的分解效率,但对DOMP却低于单一方法,其原因尚待进一步研究。

需要指出的是,我们面临着一个矛盾:一方面ATP、GDP等在天然水环境中存在,已被证实可为生物利用的DOP^[36~38],测定DOP时将它们包括在内对讨论磷的生物地球化学循环十分有益,但同时也不得不将无机多聚磷酸盐包括在内,此时称DOP未免牵强。若想避免无机聚磷水解,则ATP等也不能被测定,会导致DOP测定结果偏低。因此,DOP仍只是一个可操作定义。基于这一点,我们建议将DOP改称为溶解非活性磷(DUP)更为恰当。

Shan等^[39]提出用大肠杆菌固定化酶流动注射分析法测定生物可利用磷,据称可包括磷单酯化合物、多聚磷酸酯化合物、无机焦磷酸和三聚磷酸盐等,是一个颇有吸引力的方法。由于固定化酶技术在现行海洋调查中不易广泛应用,故若能与现行的上述DOP测定方法进行比较当十分有益,但此问题已超出本文内容,此不赘述。

笔者感谢德国汉堡大学生物地球化学和海洋化学研究所Dr.Brockmann和Dr.Raabe在资料收集方面所给予的帮助。本文也得益于与他们的一些讨论。

参考文献

- 1 Codispoti L A. Phosphorus vs. nitrogen limitation of new and export production. In: Berger W. H *et al.* eds. Productivity of the Oceans: Present and Past. Wiley, 1989, 377~394
- 2 Fanning K A. Influence of atmospheric pollution on nutrient limitation in the ocean. Nature, 1989, 339(6224):460~463
- 3 Harrison P J, Hu M H, Yang Y P *et al.* Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China. J. Exp. Mar. Biol., 1990, 140(1~2):79~87
- 4 Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment. Am. Sci., 1958, (46):205~222
- 5 Turner R E, Rabalais N N, Zhang Z N. Phytoplankton biomass, production and growth limitations on the Huanghe River (Yellow River) continental shelf. Cont. Shelf Res., 1990, 10(6):545~571
- 6 Zhang J, Yu Z G, Liu S M *et al.* Dynamics of nutrients in three estuaries of North China: the Luanhe, Shuangtaizi and Yalu Estuaries, 1997, 20(1):110~123
- 7 Cembella A D, Antia N J, Harrison P J. The utilization of inorganic and organic phosphorus compounds as nutrients by eukaryotic microalgae: a multidisciplinary perspective. Part A. Crit. Review Microbiol., 1984, (10):317~391
- 8 Hong Huasheng, Wang Haili, Huang Bangqin. The availability of dissolved organic phosphorus compounds to marine phytoplankton. Chin. J. Oceanol. Limnol., 1995, 13(2):169~176

- 9 Siuda W, Guede H. Evaluation of dissolved DNA and nucleotides as potential sources of phosphorus for planktons organisms in lake constance. In: Simon M *et al.* eds. Aquatic Microbial Ecology. 1996, 155~162
- 10 Smith R E H, Harrison W G L. Phosphorus exchange in marine microplankton communities near Hawaii. Mar. Biol., 1985, (86):75~84
- 11 Smith S V, Kimmerer J, Walsh T W. Vertical flux and biochemical turnover regulate nutrient limitation of net organic production in the North Pacific gyre. Limnol. Oceanogr., 1986, (31):161~167
- 12 Veldhuis M J W, Admiraal W. Influence of phosphate depletion on the growth and colony formation of *Phaeocystis pouchetii*. Mar. Biol., 1987, (95):47~54
- 13 Veldhuis M J W, Yankamp L A H, Letsnart T. Availability of phosphorus sources for *Phaeocystis pouchetii* in the North Sea: impact on the River Rhine. Neth. J. Sea Res., 1987, (21):219~229
- 14 Fourqurean J W, Jones R D, Ziemann J C. Processes influencing water column nutrient characteristics and phosphorus limitation of phytoplankton biomass in Florida Bay, FL, USA: influences from spatial distributions. Estuar. Coast. Shelf. Sci., 1993, 36(3):295~314
- 15 Ormaza-Gonzalez F I. Phosphorus in estuarine and open ocean oligotrophic waters: analytical and biogeochemical studies. PhD. Thesis. University of Southampton, England., 1990
- 16 Orret K, Karl D M. Dissolved organic phosphorus production in surface waters. Limnol. Oceanogr., 1987, (32):383~395.
- 17 Romankevich E A. Geochemistry of Organic Matter in the Ocean. Berlin: Spring-Verlag, 1984
- 18 Harvey H W. The estimation of phosphate and total phosphorus in sea water. J. Mar. Biol. Ass. UK., 1948, (28):337~359
- 19 Redfield A C, Smith H P, Ketchum B. The cycle of organic phosphorus in the Gulf of Maine. Biol. Bull., 1937, (73): 421~443
- 20 Hansen A L, Robinson R J. The determination of organic phosphorus in sea water with perchloric acid oxidation. J. Mar. Res., 1953, (12):31~42
- 21 Strickland J D H, Parsons T R. A practical handbook of sea water analysis. Bull. Fish. Res. Bd. Can., 1972, (167):1~310
- 22 Koroleff F I. Determination of phosphorus, chemistry of the element in sea Water. In: Grasshoff K *et al.* eds. Sea Water Analysis. Weinheim: Verlag-Chemie, 1983, 125~139
- 23 Menzel D W, Corwin C. The measurement of total phosphorus in sea water based on the liberation of organically bound fraction by persulphate oxidation. Limnol. Oceanogr., 1965, (10):441~451
- 24 Valderrama J C. The simultaneous analysis of total N and total P in natural waters. Mar. Chem. 1981, (10) :109~122
- 25 Armstrong F A J, Williams P M, Strickland J D H. Photooxidation of organic matter in sea water by ultraviolet radiation, analytical and other applications. Nature, 1966, (211):481~483
- 26 Armstrong F A J, Tibbitts S. Photochemical combustion of organic matter in sea water, for nitrogen, phosphorus, and carbon determination. J. Mar. Biol. Assoc. UK, 1968, (48):143~152
- 27 Solorzano L, Sharp J H. Determination of total dissolved phosphorus and particulate phosphorus in natural waters. Limnol. Oceanogr., 1980, (25):754~758
- 28 Cembella A D, Antia N J, Talor F J R. The determination of total phosphorus in sea water by nitrate oxidation or the organic component. Water Research, 1986, (20):1 197~1 199
- 29 Hushimoto S, Fujiwara K, Fuwa K. Determination of phosphorus in natural water using hydride generation and gas chromatography. Limnol. Oceanogr. 1987, (32):729~735
- 30 Collos Y, Mornet F. Automated procedure for determination of dissolved organic nitrogen and phosphorus in aquatic environments. Mar. Biol., 1993, (116): 685~688
- 31 Ridal J J, Moore R M. A re-examination of the measurement of dissolved organic phosphorus in sea water, Mar. Chem., 1990, (29):19~31
- 32 Ron-Vaz M D, Moore A C Edwards, Shand C A. Determination of dissolved organic phosphorus in soil solutions by an im-

- proved automated photooxidation procedure. *Talanta*, 1992, **39**(11):1 479~1 487
- 33 Solorzano L, Strickland J D H. Polyphosphates in sea water. *Limnol. Oceanogr.*, 1968, (13):515~518
- 34 Ormaza-Gonzalez F I, Stotham P J. A comparison of methods for the determination of dissolved and particulate phosphorus in natural waters. *Water Research*, 1996, **30**(11):2 739~2 747
- 35 Lennox L J. An automated procedure for the determination of phosphorus. *Water Research*, 1979, (13):1 329~1 333
- 36 Bentzen E, Taylor W D, Millar E S. Estimating organic P utilization by freshwater plankton using (^{32}P) ATP. *J. Plankton Res.*, 1991, **13**(6):1 223~1 238
- 37 Bentzen E, Taylor W D, Millar E S. The importance of dissolved organic phosphorus to phosphorus uptake by limnetic plankton. *Limnol. Oceanogr.*, 1992, **37**(2): 217~231
- 38 Cotner J B Jr, Wetzel R G. 5' - nucleotidase activity in a eutrophic lake and an oligotrophic lake. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1991, **57**(5):1 306~1 312
- 39 Shan Y, Mckelvie I D, Hart B T. Determination of alkaline phosphate hydrolyzable phosphorus in natural water systems by enzymatic flow injection. *Limnol. Oceanogr.*, 1994, **39**(8):1 993~2 000

Analysis of dissolved organic phosphorus in sea water

Yu Zhigang¹

1. *College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003*

Key words Dissolved organic phosphorus, biogeochemistry, ultraviolet photooxidation, persulphate oxidation, heating hydrolysis