

# 九龙江河口春季磷的形态分配及浮游植物对磷的响应

王振红, 石圣吉, 李顺兴

(漳州师范学院化学与环境科学系, 福建 漳州 363000)

**摘要:** 以石码河口及上游水域为研究对象, 2007 年 5 月对表层水中不同形态的磷及浮游植物生物量叶绿素 a (Chl a) 进行了调查, 分析河口磷形态分配的影响因素及与浮游植物生物量的关系。以颗粒态有机磷 (POP) 为主的颗粒态磷 (PP) 占总磷的 61.2%; 溶解态无机磷 (DIP) 占溶解态磷 (TDP) 的 72.8%。河口区上游磷与河口磷的组成相似, 雨水的淋洗作用对水体中磷的组成有较大影响, 以颗粒态无机磷 (PIP) 的显著增高为特征。水中 Chl a 与 TP 和 DOP 存在极显著的正相关, 表明生物活动在一定程度上控制着该水域表层水中磷形态的分布。

**关键词:** 九龙江河口; 叶绿素 a 磷形态分配

中图分类号: X835

文献标识码: C

文章编号: 1006-2009(2008)04-0062-04

## The Constituent Distribution of Phosphorus to Phytoplankton of Jiulong River Estuary in Spring

WANG Zhen-hong SHI Sheng-ji LI Shun-xing

(Department of Chemistry and Environment Science, Zhangzhou Normal University, Zhangzhou, Fujian 363000 China)

**Abstract** The different forms of phosphorus and the phytoplankton biomass (Chl a) was investigated in shima estuary and its upper reaches in May 2007. The results showed that the particulate organic phosphorus, which was the main component of the particulate phosphorus was the primary state of phosphorus in shima estuary and its content accounted for 61.2% of total phosphorus. Meanwhile, the dissolved inorganic phosphorus was the main constituent of the dissolved phosphorus for its content accounted for 72.8% of the dissolved phosphorus. The phosphorus composition of the upper reaches was similar to that of estuary. The research also found that the rainwater leaching effect had a greater impact on the composition of phosphorus, especially the significant increase of the particulate inorganic phosphate was taken as the main feature. Phytoplankton biomass in estuary showed a significantly positive relationship with the total phosphorus and the dissolved organic phosphorus and it indicated that the algae activity in surface water affected the distribution of phosphorus heavily in the estuary.

**Key words** Jiulong river estuary; Chlorophyll a; Phosphorus form distribution

九龙江是福建省的第二大河流, 河流干线长度 285 km, 流域面积约 14 477 km<sup>2</sup>, 年径流量约 1.17 × 10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>, 由北溪、西溪和南溪三条支流组成, 于龙海市石码镇和浮宫入海<sup>[1]</sup>。九龙江东经 116°50′—118°02′, 北纬 24°12′—25°44′, 地处亚热带, 年平均气温 19.9℃~21.1℃, 年无霜期 300 d~330 d, 年平均降雨量为 1 400 mm~1 800 mm, 降雨年内分配不均匀, 春、夏季两季多雨; 流域内生物资源丰富, 是闽南主要的捕捞和养殖基地<sup>[2]</sup>。九龙江河口区径流量小, 潮差大, 河口盐度较高。据《2003

年漳州市海洋环境监测通报》2003 年 6 月 3 日—2003 年 6 月 6 日, 九龙江海域发现赤潮, 优势种为裸甲藻, 赤潮面积约 40 km<sup>2</sup>。

九龙江河口属于缺磷海域, 磷为浮游植物生长的限制因素, 也是水环境质量的重要控制因素, 磷的分布和迁移是海域环境生态的重要研究内

收稿日期: 2008-02-28 修订日期: 2008-06-20

基金项目: 漳州师范学院科研基金资助项目 (SK06002)

作者简介: 王振红 (1979-), 女, 河北平山人, 讲师, 硕士, 从事水环境生态研究。

容<sup>[3]</sup>。在河水与海水混合过程中, 由于水体的水文动力状况及物理化学条件急剧变化及生物活动的作用, 营养要素的生物地球化学行为复杂, 因此, 河口区的环境监测和研究对该地区的经济发展和养殖业有重要意义。通过对九龙江河口水域中不同形态磷的调查研究, 探讨九龙江河口水域溶解态总磷、有机磷、无机磷的时空分布特征, 及浮游植物对其的响应, 旨在为深入了解该河口水域营养盐的特征及循环提供依据<sup>[2,4-5]</sup>。

## 1 采样与分析

于 2007 年 5 月分别对九龙江西溪和北溪汇合口处的石码河口区及上游西溪漳州大桥段表层水中不同形态的磷及浮游生物量进行了调查。于河口中泓线处和近岸两侧采集表层水 (水面下 0.5 m 处), 水样采集后立即用处理过的 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜减压过滤, 部分滤液加硫酸 (至 pH 值 = 2) 固定测定总溶解态磷 (TDP), 其余滤液立即用于测定溶解态无机磷 (DIP)。滤膜烘干 (60  $^{\circ}\text{C}$ )<sup>[6]</sup> 后供测定总悬浮物量 (TSM)、颗粒态无机磷 (PIP) 等, PIP 用酸性  $\text{NH}_4\text{F}$  提取后, 用磷钼蓝法测定<sup>[7]</sup>。总磷 (TP) 和 TDP 用过硫酸钾氧化法测定; 溶解态有机磷

(DOP)、颗粒态磷 (PP) 和颗粒态有机磷 (POP) 分别由  $\rho(\text{DOP}) = \rho(\text{TDP}) - \rho(\text{DIP})$ 、 $\rho(\text{PP}) = \rho(\text{TP}) - \rho(\text{TDP})$  和  $\rho(\text{POP}) = \rho(\text{PP}) - \rho(\text{PIP})$  算出。以 Chl a 代表浮游植物生物量, 其测定方法参照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 河口磷形态分配

#### 2.1.1 河口区各形态磷含量的组成及空间差异

九龙江石码河口区及其上游西溪漳州大桥段 (以下简称上游段) 水中 TP 质量浓度为 0.124 mg/L, 其中 PP 为 0.076 mg/L, 占 TP 61.2%, 成为水体中 TP 的主要组成部分, 说明九龙江河口水域表层水体中 PP 有着特殊的地位, 是 TP 分布变化的主要控制因素<sup>[2,8-9]</sup>。其中 POP 是 PP 的主要存在形态, 占 PP 83.8%, 这与陈淑美等<sup>[10]</sup>调查显示河口区春季以 PIP 为主出现较大差异, 在一定程度上表明近年来河口区港口建设和人为活动对水体的频繁扰动是水域中磷的形态分布发生变化的一个重要影响因素。DIP 占 TP 的百分比是 DOP 的近 3 倍, 成为该季节水体溶解态磷的主要组成, 见表 1。

表 1 河口区及上游段各形态磷含量及浮游植物生物量 (Chl a)

mg/L

研究区域	采样点	DIP	DOP	PP	PIP	POP	TP	Chl a
河口	1港口岸	0.025	0.015	0.103	0.018	0.084	0.143	$2.30 \times 10^{-3}$
	2中心点	0.028	0.005	0.058	0.008	0.050	0.090	$1.96 \times 10^{-3}$
	3居民岸	0.051	0.020	0.067	0.011	0.056	0.138	$1.66 \times 10^{-3}$
	均值	0.035	0.013	0.076	0.012	0.063	0.124	$1.97 \times 10^{-3}$
上游段		0.068	0.025	0.157	0.002	0.155	0.251	$6.32 \times 10^{-2}$
河口/上游段		0.510	0.530	0.480	7.65	0.410	0.490	3.12

从站点分布来看, 河口近岸处 (1、3 站点) TP 含量要高于中心位置 (2 站点), 说明近岸人为活动对水体中磷的分布有较大影响。较明显的是中心 DOP 含量较两岸处明显低, 这主要是水体中 DOP 大部分源自有机体的分解, 中间水流水力梯度较两岸高, 加之水中有机生物体密度相对较低所致。1 站点临近港口, 有许多来往的运输船只, 船身对水体产生较大扰动, 故 1 站点的 PP 含量与 2、3 站点相比相对较高。3 站点位于居民生活区附近, 生活污水的注入使得 TDP 中的 DIP 含量较其他点位要高。

近年来九龙江河口水域中 TP 和 PP 及 DIP 均呈上升趋势, 大约是 1995 年监测数值<sup>[10]</sup> 的 1.5

倍, 其中 POP 含量增高明显, 是 1995 年含量的近 6.3 倍, 与之相反的是 DOP 呈现小幅下降, 而 PIP 则仅约为 1995 年监测值的 1/3。总之, 随着人为活动 (施肥和污水注入等) 对水体的影响, 水中 TP 含量呈一定增高趋势, 尤其是 DIP 含量的显著增高应引起足够的重视, 因为 DIP 是生物生长的必需营养元素之一。另外, 对 POP 的增高可能引起的生态效应也不容忽视, 见表 2。

#### 2.1.2 河流上游段对河口磷形态分配的影响

九龙江石码河口区上游段与河口具有相似的磷的组成特征, 都以 PP 占主要地位, PP 占 TP 的百分比均超过 60%。其中 POP 占 PP 的百分比均在

表 2 春季调查的河口区磷的质量浓度 mg/L

年份	DIP	DOP	PP	PIP	POP	TP
2007年	0.035	0.013	0.076	0.012	0.063	0.124
1995年	0.020	0.014	0.051	0.041	0.010	0.085
比值	1.75	0.93	1.49	0.29	6.30	1.46

80%以上,成为水中磷的主要存在形态。DIP是水体溶解态磷的主要组成部分。河口处除其 PIP含量呈增高外(为上游段的 7.6 倍),其余形态磷的含量都呈现降低(约 0.5 倍),表明随着水流的混合,河口处水盐度增大,水面拓宽,水深变深,悬浮颗粒物沉降较多,加之海水的潮汐造成对上游段带入的磷稀释,造成水中 TP、PP 含量下降。河口处 PIP 占 PP 的百分比与上游段相比较要高出许多(约为上游段的 16 倍),其原因可能是由于区域位置不同所导致的水中悬浮颗粒物中磷组成的不同,同时反映淡水与海水交界处颗粒物中的无机磷含量较淡水水域颗粒物中的无机磷含量相对要高,见表 3。

表 3 上游段和河口各形态磷占 TR、TDR、PP 的比值 %

研究区域	$\rho(\text{DIP})/\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{DOP})/\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{PP})/\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{PIP})/\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{POP})/\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{TP})/\rho(\text{TR})$
	上游段	27.2	10.1	62.7	72.8	16.2
河口	28.0	10.8	61.2	72.2	17.6	16.2

### 2.1.3 降雨径流对河口磷形态分配的影响

春季是九龙江流域雨水相对较多的季节,又是农田施用大量含磷化肥的季节,雨水携带沿岸土壤径流及其他生活污水等的注入使水中各种形态磷的含量均有所增高,表明降雨后的地表径流对九龙江石码河口水域中磷酸盐的变化具有增殖作用,见表 4。

表 4 雨天不同时段各形态磷的均值和

时间	叶绿素 a 的均值							mg/L
	DIP	DOP	PIP	POP	PP	TDP	TP	
9:00~10:00	0.024	0.372	0.002	0.012	0.014	0.402	0.416	$3.43 \times 10^{-3}$
15:00~16:00	0.030	0.438	0.015	0.027	0.042	0.462	0.504	$4.42 \times 10^{-3}$
下午/上午	1.25	1.18	7.50	2.25	3.00	1.15	1.21	1.29

下午与上午不同形态磷的比值表明,由雨水携带进入水体的磷以 PP 为主,对水质产生了较大影响。由于近岸土壤弱吸附态磷以无机磷为主要成

分(约占 87.7%),因此雨水携带进入水体的 PP 中的 PIP 比例最高。

### 2.2 浮游植物对磷形态分配的响应

浮游植物都依靠 Chla 进行光合作用,以 Chla 来代表浮游植物生物量<sup>[6-11]</sup>,探究浮游植物生物量对各形态磷的响应。结果显示 Chla 与 TP 和 DOP 呈极显著正相关,相关系数分别为 0.970 ( $P < 0.01$ ,  $n = 6$ )和 0.962 ( $P < 0.01$ ,  $n = 6$ ),与 TDP 呈显著正相关,相关系数为 0.955 ( $P < 0.05$ ,  $n = 6$ )。这说明浮游植物能很好地响应 TP、DOP 及 TDP 的变化。TDP 与 DIP 受到水流运动与生物活动综合作用的影响<sup>[12]</sup>,而 DOP 则主要受生物活动的控制。因为它是生物活动的产物(包括浮游植物分泌和浮游动物的排泄),在生产 DOP 方面浮游植物和浮游动物可能同样重要<sup>[13-14]</sup>。

Chla 含量在雨天的变化表明雨水携带周边径流的注入具有促进该水域表层水中浮游植物生物量增高的趋势,与之相应的是水中 DOP 含量较晴天也明显增高,由此可见生物活动在一定程度上控制着磷形态的分布。

DIP 包括正磷酸盐、无机缩聚磷酸盐,其中正磷酸盐可作为营养物质被水中藻类大量摄取,是赤潮发生、发展过程的重要限制因素之一<sup>[15]</sup>。浮游植物及自养细菌吸收 DIP 而繁殖,使无机磷(IP)进入有机体,开始磷形态的转化,IP 被转化为有机磷(OP)<sup>[16]</sup>。研究已证明<sup>[12]</sup>,当有磷酸盐供应时,大多数藻类都表现出可以积累过量的磷酸盐,以多磷酸盐颗粒形式储存于细胞中,在磷酸盐供应不足时,这种形式的磷可用来支持种群的生长。调查水域中 Chla 与 DIP 和 PP 均呈负相关,相关系数分别为 -0.471 和 -0.61,表明该季节浮游植物对 DIP 的主动消耗,浮游植物增殖会导致 DIP 含量的匮乏;同时由于浮游植物的初级生产过程会消耗大量  $\text{CO}_2$ ,引起表层水 pH 值升高,从而会促进颗粒物中磷的释放<sup>[17]</sup>,表现出与 PP 的负相关。

## 3 结论

(1) PP 是九龙江石码河口区磷的主要赋存形态,其中 POP 占有较高的比例 [ $\rho(\text{POP})/\rho(\text{PP})$  为 83.8%]; DIP 是水中溶解态磷的主要成分;九龙江上游段与河口区具有相似的磷的组成特征,除其 PIP 含量外,其余形态磷的含量均比河口处要高,成为河口区磷的主要补给源,而 PIP 由上游段以较

低浓度的注入在一定程度上对河口区 PIP 含量的增高具有一定的缓冲作用。

(2) 降雨所形成的地表径流对河口水域表层水中磷酸盐具有增加作用, 雨水携带沿岸土壤中的磷进入水体, 尤以表层水域中 PIP 的增高最为显著; 水中磷含量的增高对水域中浮游植物的生长繁殖也表现出一定的促进作用。

(3) 浮游植物生物量与 TP、TDP 和 DOP 呈显著正相关, 能响应 TP、DOP 及 TDP 的变化; 与 DIP 呈负相关, 表现对 DIP 的主动消耗; 生物活动在一定程度上控制表层水中磷形态的分布。

#### [参考文献]

- [1] 陈敏. 真光层的颗粒动力学—— $^{34}\text{Th}/^{238}\text{U}$  不平衡的应用 [D]. 厦门: 厦门大学, 1996.
- [2] 陈淑美, 林建云, 傅天保. 厦门西港水体中的各形态磷 [J]. 海洋学报, 1992, 14(1): 47.
- [3] 陈松, 廖文卓, 许爱玉. 九龙江口水体中 1995 年磷的转移 [J]. 台湾海峡, 1998, 17(1): 71-75.
- [4] 洪华生, 戴民汉, 陈水土. 春季厦门港、九龙江口各种形态磷的分布与转化 [J]. 海洋环境科学, 1989, 8(2): 1-8.
- [5] 张水浸, 许昆灿, 陈其焕, 等. 厦门西港区一次赤潮的观测 [J]. 海洋学报, 1988, 10(5): 602-608.
- [6] 国家环保局《水生生物监测手册》编委会. 水生生物监测手

册 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1993.

- [7] 陈水土, 阮五崎, 郑瑞芝. 九龙江口、厦门西海域磷的生物地球化学研究 I 水体中溶解态磷与颗粒态磷的含量、分布与转化 [J]. 海洋学报, 1993, 15(1): 62-70.
- [8] 韦蔓新, 董万平, 何本茂, 等. 北海湾磷的化学形态及其分布转化规律 [J]. 海洋科学, 2001, 25(2): 50-53.
- [9] 商少凌, 洪华生. 厦门西海域磷的研究 [J]. 海洋环境科学, 1996, 15(1): 15-21.
- [10] 陈淑美, 卢美鸾, 傅天保. 九龙江口水体中各形态磷的行为 [J]. 台湾海峡, 1997, 16(3): 299-305.
- [11] 杨广利, 韩爱民, 刘铁琨, 等. 洪泽湖富营养化与环境理化因子间的关系 [J]. 环境监测管理与技术, 2003, 15(2): 17-20.
- [12] 赖利 J.P., 斯基罗 G. 化学海洋学 [M]. 2 版. 崔清晨, 译. 北京: 海洋出版社, 1982.
- [13] ARMSTRONG F.A.J. Phosphorus chemical oceanography [M]. London: Academic Press, 1965.
- [14] WATT W.D., HAYES F.R. Tracer study of the phosphorus cycle in seawater [J]. Limnol Oceanogr, 1963, 8(2).
- [15] 林玉辉, 连光山, 杨清良. 略谈我国的赤潮及对策 [J]. 福建水产, 1988, 6(2): 50-56.
- [16] 陈洪涛, 陈淑珠, 张经, 等. 南黄海海水中各种形态磷的分布变化特征 [J]. 海洋环境科学, 2002, 21(1): 9-13.
- [17] 黄清辉, 王子健, 王东红, 等. 夏季梅梁湾水体中生物有效磷的分布及来源 [J]. 中国科学 (D 辑), 2005, 35 (增刊 II): 131-137.

(上接第 61 页)

不同相对湿度条件下  $\text{PM}_{10}$  质量浓度值与能见度之间的相关性分析, 得到两个乘幂指数回归方程:

相对湿度在 80% ~ 90% 时:

$$y = 0.7237x^{-0.8562} \quad (\text{相关系数 } r = 0.7316)$$

相对湿度 > 90% 时:

$$y = 0.1142x^{-1.4168} \quad (\text{相关系数 } r = 0.6401)$$

由此可见, 当相对湿度 < 80% 时, 两者间相关性好, 而当相对湿度 > 90% 时, 两者间相关性差。

### 3 结论

颗粒物质量污染水平与能见度间存在较为明显的相关性, 应用数理统计的方法得到不同相对湿度条件下  $\text{PM}_{10}$  质量浓度与水平能见度间的相关方程, 由此进行大气能见度的分析预测, 从而为灰霾预报提供依据。但导致能见度下降的影响因素非常复杂, 除相对湿度等气象条件以及颗粒物质量浓度影响外, 颗粒物的粒径分布、颗粒物成分以及环境空气中气体污染物均会导致颗粒物对光的吸收

和散射作用不同, 导致能见度下降的程度不同。

#### [参考文献]

- [1] 国家环境保护总局《空气和废气监测分析方法》编委会. 空气和废气监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2003: 201-203.
- [2] 张伟. 环境空气质量预报准确率分析 [J]. 环境监测管理与技术, 2005, 17(2): 44.
- [3] 孙劭, 刘伟, 张赞. 城市典型气象条件与大气颗粒物污染之间的关系 [J]. 中国环境监测, 2005, 21(2): 80-83.
- [4] BAK N., KIM Y.P., MOON K.C. Visibility study in Seoul 1993 [J]. Atmospheric Environment, 1996, 30: 2319-2328.
- [5] 吴兑. 霾与雾的区别和灰霾天气预警建议 [J]. 广东气象, 2004, 4: 1-4.
- [6] 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系 [J]. 环境科学学报, 2003, 23(4): 468-471.
- [7] BARTHELEMIER J.PRYOR S.C. Implications of ammonia emissions for fine aerosol formation and visibility impairment: a case study from the lower Fraser valley, British Columbia [J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(3): 345-352.
- [8] TANG I.N. Chemical and size effects of hygroscopic aerosols on light scattering coefficients [J]. Geophysical Research, 1996, 101(D14): 19245-19250.