

香港海域叶绿素-a 浓度的时空分布规律

陈晓玲¹, 李毓湘², 李志林³

(1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉, 430072;

2. 香港理工大学土木工程学系, 香港; 3. 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港)

摘要: 选取香港海域 7 个水环境控制区在 1988 ~ 1999 年期间每月或每半月定位连续取样的 37 个水质测站, 每个测站选用 17 个水质参数, 研究香港海域海岸带水体叶绿素 -a 浓度及其相关因子的时空分布规律。对 37 个测站 17 个参数作聚类分析, 结果表明, 香港海域东部由半封闭海湾组成的水域控制区, 其赤潮发生频率较高; 西部水域属于河口环境。多变量分析结果表明, BOD₅ 对叶绿素 -a 浓度普遍存在显著性影响, 氮和光照条件在东部海域对叶绿素 -a 浓度的影响比西部海域更显著, 而磷以及包括盐度、温度、溶解氧和 pH 在内的海洋物理化学条件在西部海域有更显著的影响。在整个香港海域, 年内平均最高叶绿素 -a 浓度主要出现在冬末春初和夏末秋初, 东部海域的年平均叶绿素 -a 浓度一般高于西部海域。香港海域的叶绿素 -a 浓度普遍存在一个 8~10 年的周期性变化规律。

关 键 词: 香港海域; 叶绿素 -a 浓度; 时空分布规律

中图分类号: X144

1 引言

叶绿素 -a 浓度的高低是海藻生物量大小的标志。一般说来, 未受污染的外海水域, 叶绿素 -a 浓度低于 2 $\mu\text{g/l}$, 而平均水平在 10 $\mu\text{g/l}$ 以上则标示着不可接受的富营养化水平。在湖泊环境中, 当叶绿素 -a 浓度高于 40 $\mu\text{g/l}$ 时, 则意味着海藻大量繁殖^[9]。在香港海域, 大多数测站的叶绿素 -a 浓度与赤潮发生频率呈显著正相关, 因此, 本文选择叶绿素 -a 浓度作为海藻生长强度以及富营养化程度的标志, 进而研究与赤潮相关的叶绿素 -a 浓度时空分布规律。

香港海域面积为 1800 km^2 , 海岸带水体大量用于娱乐、水产养殖、工业用冷却水源、废水排放以及航运等。为了保护水质与评价水污染控制措施的有效性, 香港海域自 20 世纪 80 年代以来依据区位与水质特性先后划分了 10 个水环境控制区, 并设置定位水质测站 79 个^[1]。位于海岸线附近或受人为活动影响严重海域的测站, 每月或每半月取样一次, 这种海域包括本文选用的 7 个水环境控制区; 临近外海或人为活动影响较小的海域, 包括其余 3 个水环境控制区, 所设测站每 2 个月取样一次。由于 2 个月的取样间隔不适于分析诸如叶绿素 -a 浓度这样变化较快的要^[2], 因此, 本文的分析主要基于每月或每半月取样分析的 7 个水环境控制区, 由西向东分别为深圳湾、西部缓冲区、维多利亚港、将军澳、东部缓冲区、牛尾海以及吐露港与赤门海峡水环境控制区 (图 1)。

本文选取 7 个水环境控制区内在 1988 ~ 1999 年间具有连续取样实测数据的所有 37

收稿日期: 2001-06-04; 修订日期: 2001-09-26

基金项目: 香港理工大学基金项目 (No. 8755); 国家自然科学基金项目 (40176032); 测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金项目 (WKL(98)0401) [Foundation Item: National Natural Science Foundation of China, No. 40176032]

作者简介: 陈晓玲 (1962-), 女, 湖北武汉人, 教授, 博士, 主要从事资源环境及其遥感与 GIS 应用研究。

E-mail: ceyyli@polyu.edu.hk

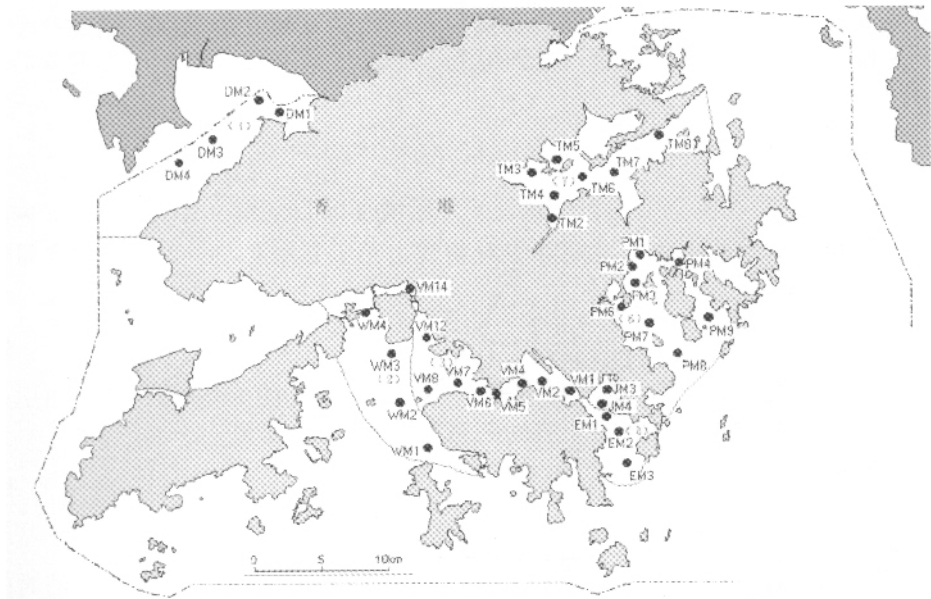


图 1 香港海域 7 个水环境控制区中的水质测站位置分布图 (资料来源: 香港环保署)

Fig. 1 Locations of monitoring stations in 7 Water Control Zones of Hong Kong (Data source: HKEPD)

个水质测站，分析叶绿素 -a 浓度的时空分布规律及其原因，这些测站分别包括深圳湾水环境控制区的 DM1-DM54，西部缓冲区的 WM1-WM4，维多利亚港水环境控制区的 VM1-VM14，将军澳水环境控制区的 JM3, JM4，东部缓冲区的 EM1-EM3，牛尾海水环境控制区的 PM1-PM9 以及吐露港与赤门海峡水环境控制区的 TM2-TM8 (其中，编号为 DM4, PM5, VM3, VM9, WM10, VM11, VM13, JM1, JM2 和 TM1 的测站已不存在，主要是因为人为活动或自然环境变迁等原因而撤消)。在上述 7 个水环境控制区中，后 2 个控制区位于东部的半封闭海湾，是研究时段里赤潮发生频率较高的海域。尤其是吐露港与赤门海峡水环境控制区，其“瓶颈状”地貌形态使海湾内潮流交换非常弱^[3,4]，加之沿岸城市建设与人口迅速增长，使之早在 20 世纪 80 年代就成为香港第一个出现严重海洋环境问题的海域^[5]。

2 数据与方法

研究所用数据来自于香港环保署，每个测站用于分析的包括 17 个海洋水质参数，其中标示海洋条件的有：温度、酸碱度、盐度、溶解氧饱和度 (DO_SAT)；表明海水的透明度与透光性的有：混浊度 (TURB)、悬浮固体 (SS) 和总溶解态固体 (TVS)；与有机污染有关的有：5 日生化需氧量 (BOD₅)；与营养状况有关的参数有：氨氮 (NH₄)、亚硝酸盐氮 (NO₂)、硝酸盐氮 (NO₃)、总凯氏氮 (TKN_SP)、正磷酸盐 (PO₄)、总磷 (TP_SP)、二氧化硅 (SiO₂)、叶绿素 -a 浓度 (CHL) 和褐色素 (PHAE)。相关分析表明，叶绿素 -a 浓度与其它 16 个参数存在不同程度的显著性相关关系。

首先对数据集进行标准化处理，以消除量纲影响。然后，采用聚类分析方法分析包括 CHL 及其 16 个相关参数在内的数据集结构在时空域上的分异规律，其聚类规则采用的是离差平方和法^[7]，欧氏距离用于目标聚类。多元逐步回归分析方法^[8]用于分析对叶绿素 -a 浓度产生影响的主要因子。在多元逐步回归分析中，将叶绿素 -a 浓度作为因变量 (y)，其它各个与叶绿素 -a 浓度具有显著性相关关系的因子为自变量 (x_i)，按照自变

量 x_i 对因变量 y 作用的显著性程度, 逐个变量引入一检验新建立的模型, 剔除模型中的不显著因子—新变量引入一检验剔除, 直到得到一个最佳的变量组合。引入变量后对回归方程中的回归平方和的贡献为:

$$p_i = U(x_1, \dots, x_i, x_i) - U(x_1, \dots, x_i) = \frac{b_i^2}{c_{ii}} \quad (2-1)$$

式中: $x_1, \dots, x_i$ 为已引入模型中的自变量, x_i 为新增加的自变量, b_i 为变量 i 的偏回归系数, c_{ii} 为正规方程组系数矩阵的逆矩阵主对角线上第 i 个元素。引入与剔除变量的标准为:

$$F_s = \frac{p_i/l}{Q/(n-l-1)} \quad (2-2)$$

该统计量服从第一自由度 $f_1 = 1$, 第二自由度 $f_2 = n - l - 1$ 的 F-分布, Q 为与引入自变量 x_i 有关的残差平方和。所得到的一般回归系数 b_i 和 b_0 分别为

$$b_i = b_i^* \sqrt{S_{yy}/S_{ii}} \quad (2-3)$$

$$b_0 = \bar{y} - (b_1\bar{x}_1 - b_2\bar{x}_2 - \dots - b_l\bar{x}_l)$$

式中: b_i^* 为由相关系数矩阵得到的标准回归系数, S_{ii} 和 S_{yy} 为方差协方差矩阵中的对应元素, 分别表示 x_i 和 y 的方差。

3 叶绿素 -a 浓度的空间聚类及其显著性回归因子

对所选取的香港海域 7 个水环境控制区 17 个参数在 1988 ~ 1999 年间的观测数据进行聚类分析, 结果表明, 所有测站可分为 2 大类, 第 I 类海域包括东部由半封闭海湾组成的 2 个水环境控制区: 吐露港及赤门海峡、牛尾海; 第 II 类海域由其余的 5 个水环境控制区组成 (图 2)。这两种不同类型水域的空间分布明显反映了海洋水文条件的差异。第 I 类海域主要是在潮流涨落背景下的环流交换微弱的环境, 而第 II 类海域则主要受珠江河口入流的影响^[9]。

多元逐步回归分析结果表明, BOD_5 和 PHAE 与叶绿素 -a 浓度普遍存在显著性相关, BOD_5 高值在冬、春季, 低值出现在夏季, 其峰值与海藻大量繁殖有明显的一致性趋势。第 I 类所包括的 2 个半封闭海湾的水流交换微弱, 赤潮发生频率较高。根据这两个海湾的水环境特性, 各自又可以进一步划分为内海湾 (测站 TM2-TM4 和 PM1-PM6 分别代表这 2 个控制区的内海湾环境) 和外海湾 (测站 TM5-TM8 和 PM7-PM9 分别代表它们的外海湾环境)。在这两个海湾中, 虽然营养元素对叶绿素 -a 浓度的影响存在明显的空间差异, 但是, 氮、磷对叶绿素 -a 浓度普遍具有显著性贡献。在内海湾中叶绿素 -a 浓度受氮和磷显著影响, 外海湾则主要受氮的显著影响, 而氮对叶绿素 -a 浓度的制约作用早在 20 世纪 70 年代就引起关注^[10]。在第 II 类海域中, 与叶绿素 -a 浓度显著相关的突出参数是海洋水文条件, 营养元素亦起重要作用, 磷为最显著因子, 有关磷对叶绿素 -a 浓度的制约作用在伊兹密尔湾也有类似报道^[11]。而与透明度、透光性有关的参数在第 I 类海域对叶绿素 -a 浓度的影响比第 II 类海域更重要。硅在研究时段里对香港海域叶绿素 -a 浓度没有明显的显著性影响, 但在第 II 类海域比第 I 类海域略显重要。

4 叶绿素 -a 浓度的季节变化及其空间分异

别为 1988~1999 年间第 I 类海域的月平均叶绿素 -a 浓度值，2 图分别表明东部 2 个半封闭海湾组成的水环境控制区：吐露港及赤门海峡、牛尾海中，叶绿素 -a 浓度的季节变化和空间分异。图 3 中叶绿素 -a 浓度表现为：吐露港及赤门海峡水环境控制区远远高于牛尾海水环境控制区，在这 2 个水环境控制区中，均表现为内海湾的叶绿素 -a 浓度明显高于外海湾；在所有测站中，叶绿素 -a 浓度在一年存在 2 个明显的峰值，一个出现在冬末春初，另一个出现在夏末秋初。图 4 亦明显反映了所有测站在冬、秋两季较高的平均叶绿素 -a 浓度，以及叶绿素 -a 浓度在每一个海湾中由内湾向外海方向逐渐减小的空间变化规律，这种变化规律反映了陆源污染对叶绿素 -a 浓度分布的控制作用。吐露港与赤门海峡水环境控制区叶绿素 -a 浓度最高，季节变化最大，也是香港海域在研究时段赤潮发生频率最高的海域，牛尾海水环境控制区的叶绿素 -a 浓度比吐露港与赤门海峡水环境控制区低得多，最低水平在 $2 \sim 4 \mu\text{g/l}$ 左右，几乎接近近海自然海水的正常水平。但是，由于其半封闭的海湾环境中较弱的水体交换，其赤潮发生频率仍然较高。可见，水体循环与交换状况是赤潮发生与否的一个重要触发因子。

第 II 类海域的 7 个水环境控制区中，叶绿素 -a 浓度在整体上表现为由西向东波动下降的趋势。平均叶绿素 -a 浓度高值仍然出现在冬、秋季节，其季节变化则表现出 2 种明显的空间分异（图 5、6），一种出现在香港海域西部的深圳湾水环境控制区，其叶绿素 -a 浓度高，空间与季节变化大，叶绿素 -a 浓度在一年中有 4 个峰值，特别出现在春、夏季节；另一种出现在香港海域南部的 4 个水环境控制区，叶绿素 -a 浓度的季节变化相对较小，叶绿素 -a 浓度由西部缓冲水环境控制区向东经过维多利亚港、将军澳水环境控制区到东部水环境控制区表现为低-高-更高-低的空间变化格局。维多利亚港水环境控制区位于这 4 个水环境控制区的中部，虽然其叶绿素 -a 浓度处于相对较高的水平，由于它是一个潮汐通道，涨潮时水流向西，落潮时向东^[12]，水体交换较为迅速，赤潮发生频率不高。

5 叶绿素 -a 浓度的长期变化趋势

选取香港海域 7 个水环境控制区范围内所有的 37 个测站，通过对 1988 ~ 1999 年叶绿素 -a 浓度的分析表明，叶绿素 -a 浓度在时间序列上有明显的长期波动趋势。结果显示，香港海域在 80 年代后期叶绿素 -a 浓度明显偏高，1988 年出现最高峰值，90 年代早期为低值时段，最低谷值出现在 1993 年，到 90 年代后期，叶绿素 -a 浓度又有明显回升。所有测站的平均波动间隔时间大约为 8 ~ 10 年。这种波动趋势除明显受制于海岸带水体的营养状况外，还需要有利的气候条件及其它相关环境因子的配合与激发。

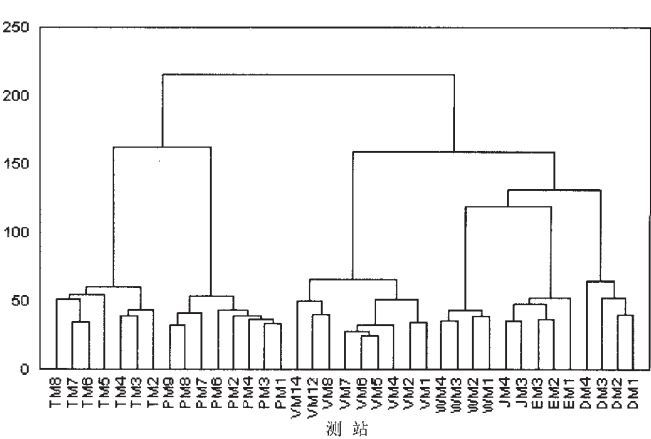


图 2 1988 ~ 1999 年期间香港海域 37 个测站的叶绿素 -a 浓度及其 16 个相关参数的聚类图
Fig. 2 Dendrogram of chlorophyll-a concentration and its correlated parameters for 37 monitoring stations in Hong Kong's coastal waters during the period of 1988 and 1999

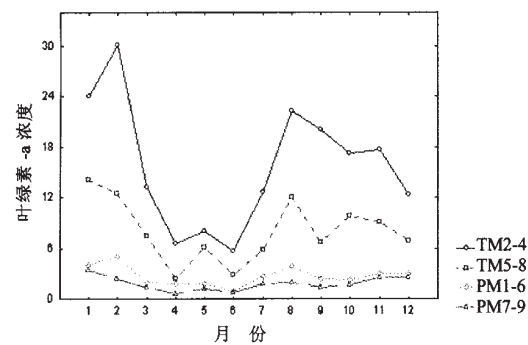


图 3 1988 ~ 1999 年第 I 类海域叶绿素 -a 浓度的季节变化

Fig. 3 Seasonal fluctuation of average monthly chlorophyll-a concentration for Cluster I (1988-1999)

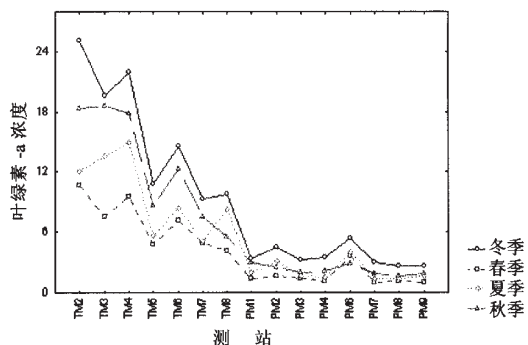


图 4 1988 ~ 1999 年第 I 类海域叶绿素 -a 浓度季节变化的空间分异

Fig. 4 Spatial variation of average seasonal fluctuation of chlorophyll-a concentration for Cluster I (1988-1999)

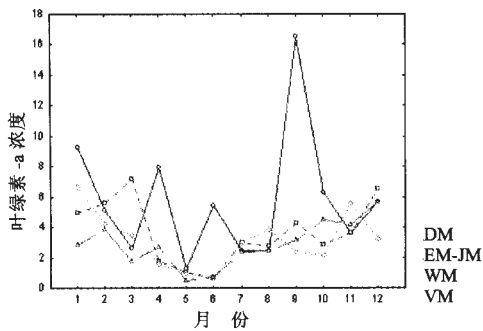


图 5 1988~1999 年第 II 类海域平均叶绿素 -a 浓度的季节变化

Fig. 5 Seasonal fluctuation of average monthly chlorophyll-a concentration for Cluster II (1988 ~1999)

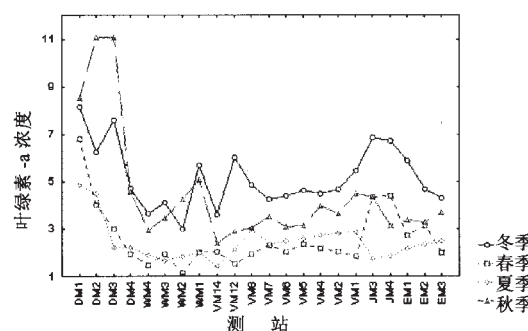


图 6 1988 ~1999 年第 II 类海域叶绿素 -a 浓度平均季节变化的空间分布

Fig. 6 Seasonal fluctuation of average monthly chlorophyll-a concentration for Cluster II (1988~1999)

对于第 I 类海域而言, 2 个水环境控制区的叶绿素 -a 浓度水平差异明显。牛尾海水环境控制区几乎为研究海域中的最低水平, 但其半封闭海湾内相对较弱的水体交换有利于诱发赤潮, 因此, 赤潮发生频率在研究海域研究时段内仅次于吐露港与赤门海峡水环境控制区。而吐露港与赤门海峡水环境控制区的叶绿素 -a 浓度则为研究海域的最高水平, 该水环境控制区在 20 世纪 80 年代污染严重, 赤潮频发, 几乎所有的测站在所有年份的平均叶绿素 -a 浓度均在 $2\text{ }\mu\text{g/l}$ 以上, 最高平均水平在 $20\text{ }\mu\text{g/l}$ 以上。同时, 叶绿素 -a 浓度虽然在该区内存在显而易见的空间分异, 但是, 仍然表现出明显的由西向东逐渐降低的一致性变化趋势, 在西部内海湾部分 (TM2-4), 叶绿素 -a 浓度在整个时间序列上几乎均高于 $10\text{ }\mu\text{g/l}$, 而东部靠近外海部分 (TM7-8) 则一般在 $10\text{ }\mu\text{g/l}$ 以下。对于第 II 类海域而言, 深圳湾和维多利亚港 2 个水环境控制区的平均叶绿素 -a 浓度在整个研究时段均高于 $2\text{ }\mu\text{g/l}$, 但一般不超过 $5\text{ }\mu\text{g/l}$, 虽然叶绿素 -a 浓度甚至高于第一类海域中的牛尾海水环境控制区的平均水平, 但是, 由于水体浑浊度较高, 同时, 水体交换较为迅速, 其赤潮发生频率反而低于牛尾海水环境控制区。这种特性明显地反映出, 水环境污染、透光性与水体交换条件是忽略的引发赤潮的重要原因。

在时间序列上, 整个香港海域的叶绿素 -a 浓度水平表现为波动背景下的递减趋势,

最高值均出现在 80 年代后期, 最低水平在 90 年代早期, 次高水平在 90 年代后期, 其波动时间间隔大多数在 8 ~ 10 年左右。叶绿素 -a 浓度水平在时间系列上的递减趋势很明显与香港海域的水环境控制及营养水平的逐渐降低有关, 香港海域自 80 年代以来采取一系列水环境控制措施, 在 1982 年, 开始对海岸带水域实施分区管理和污染物处理与排放控制, 公布的第一个水环境控制区是位于香港海域东部, 陆源污染严重, 水体交换较微弱, 水环境问题突出的吐露港与赤门海峡水环境控制区, 随后又陆续建立了另外 9 个水环境控制区。在海上设立了 79 个水质测站, 由环保署具体负责实施对海岸带水体的监测计划。特别是在污染较为严重的吐露港与赤门海峡水环境控制区, 一方面通过制订法规控制流域内作为主要污染源的家禽饲养业的规模和数量, 同时增加污水排放前的处理数量和处理水平; 另一方面, 新辟排污通道, 使其排入水体交换迅速的维多利亚港水环境控制区, 并将排污口设置到离岸较远的海中。这些措施使香港海域的水质得到很大程度的改善, 它们使赤潮发生频率在时间序列上有明显的减少趋势, 但是, 香港海域 1982 ~ 1999 年水质观测数据仍然表现出周期性波动趋势, 叶绿素 -a 浓度与赤潮发生峰值分别出现在 80 年代后期和 90 年代后期。叶绿素 -a 浓度在整个海域几乎一致的波动趋势则很可能受制于大尺度环境因子, 对这种趋势的机理与规律的深刻认识将有助于预测未来赤潮的可能发生规律。通过对比分析太阳黑子活动、地球自转运动等, 发现它们的变化与叶绿素 -a 浓度、赤潮的峰谷值的出现时间具有一定程度的相关关系, 较高的叶绿素 -a 浓度正好与太阳活动上升期相一致, 此时, 地球自转正好处在一个加速时期, 地球物质的相对西移, 亦会助长西岸的相对海平面上升, 这些均会对位处太平洋西岸的香港海域的污染物扩散起到一定程度的阻滞作用。当所有那些有利于海藻大量繁殖的因素同时出现时, 一旦营养状况达到一定水平, 赤潮会突然爆发。

6 结论

通过对香港海域 7 个水环境控制区在 1988~1999 年期间包括叶绿素 -a 浓度及其 16 个相关参数在内的多变量进行聚类分析, 可将研究海域分为 2 大类, 第 I 类海域位于东部, 包括两个由半封闭海域组成的水环境控制区所组成, 该类海域受陆源污染影响较严重, 营养盐含量偏高, 水体浑浊度相对较小, 同时水体交换较为微弱, 在研究海域中赤潮发生频率较高, 最高叶绿素 -a 浓度出现在吐露港与赤门海峡水环境控制区。第 II 类海域包括西部的 5 个水环境控制区, 受珠江入流及潮流影响较大, 虽然叶绿素 -a 浓度甚至高于第 I 类海域的牛尾海水环境控制区, 由于水体较为浑浊, 水体交换较为迅速, 其赤潮发生频率仍然低于第 I 类海域。对于整个香港海域而言, 水质污染、水体的透光性和水循环状况是引发赤潮的重要因子。营养元素是第 I 类海域主要的与叶绿素 -a 浓度显著相关的因子, 而海洋水文条件对第 II 类海域更为重要。叶绿素 -a 浓度在整个香港海域空间上的分布明显地与营养元素的分异规律相一致, 在第 I 类海域表现为由内海湾向外减少, 而第 II 类海域则由西向东波动式下降; 在时间上, 一方面表现为明显的季节变化, 较高的叶绿素 -a 浓度在一年中普遍出现在冬末春初和夏末秋初, 另一方面, 在研究时段里还普遍存在 8 ~ 10 年时间间隔的波动趋势, 这种趋势似乎受制于全球性环境变化因素。

参考文献 (References)

- [1] EPD HK (1988-1998). Marine Water Quality in Hong Kong, 1988-1998 (One volume for each year).
 - [2] Thompson G B, Ho J. Some effects of sewage discharge upon phytoplankton in Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 1981, 12: 168-173.
- 21994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

- [3] Yung Y K, Wong C K, Broom M J *et al.* Long-term changes in hydrography, nutrient and phytoplankton in Tolo Harbour, Hong Kong. *Hydrobiologia*, 1997, **352**: 107-352.
- [4] Lee J H W. Eutrophication dynamics of Tolo Harbour, Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, **39**(1-12) 187-192.
- [5] Morton B. Pollution of the coastal waters of Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 1986, **20**(7): 310-318.
- [6] James R Thomas. Algal bloom probability in a large subtropical lake. *Water Resources Bulletin*, 1996, **33**(5) 995-1006.
- [7] Ward J H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 1963, **58**: 236-244.
- [8] Hu Yikeng. Multivariate Analysis in Geochemistry. Beijing: China University of Geosciences Press, 1991. [胡以铿. 地球化学中的多元分析. 北京: 中国地质大学出版社, 1991.]
- [9] Morton B, Wu S S. The hydrology of the coastal waters of Hong Kong. *Environmental Research*, 1975, **10**: 319-347.
- [10] Ryther J H. Nitrogen, phosphorus and eutrophication in the coastal marine environment. *Science*, 1971, **171**: 1008-1013.
- [11] Bizsel N, Uslu O. Phosphate, nitrogen and iron enrichment in the polluted Izmir Bay, Aegean Sea. *Marine Environmental Research*, 2000, **49**: 101-122.

Spatio-temporal Distribution of Chlorophyll-a Concentration in Hong Kong's Coastal Waters

CHEN Xiaoling¹, Yok Sheung Li², LI Zhilin³

(1. State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing (LIESMARS), Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China; 3. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract: Seven Water Control Zones in Hong Kong's coastal waters with sampling data of 17 parameters collected at 37 monitoring stations from 1988 to 1999 were selected to analyze the spatio-temporal variations of chlorophyll-a concentration. The results suggest that frequent red tides occurred in eastern Hong Kong's coastal waters, and less red tides occurred in an estuarine environment in the west. In all coastal waters, the organic contents indicator, BOD₅, was a common significant influential factor of the chlorophyll-a level. Nitrogen and light penetration condition related to turbidity, total volatile solids and suspended solids had greater influence on the chlorophyll-a level in the east than in the west, while phosphorus and oceanographic condition associated with salinity, temperature, dissolved oxygen and pH was more important in west than in east. Generally, there was a higher average chlorophyll-a level in the late winter and early spring, and late summer and early autumn in a year. The chlorophyll-a level was higher in the east than in the west among all seasons in general. The chlorophyll-a concentration has a fluctuation period of 8-10 years generally in the whole region.

Key words: Hong Kong's coastal waters; chlorophyll-a concentration; spatial-temporal variations