

doi: 10.7702/dlydxkx20130524

杭州湾邻近海域浮游植物吸收特性的冬、夏季变化特征

张晋芳, 沈芳*, 余小龙, 周云轩

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要:通过 2012 年 3 月和 7 月在杭州湾邻近海域两个航次实测数据的对比, 分析了冬、夏季节叶绿素 a 浓度 (Chla)、浮游植物吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 和浮游植物比吸收系数 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的时空变化特征。总体看, Chla 冬季明显低于夏季, 空间上呈条带状分布, 最高值分布在 123°E 附近, 向东西两侧递减。 $a_{ph}(\lambda)$ 的时空变化与 Chla 相似, 而 $a_{ph}^*(\lambda)$ 冬季较夏季高, 与冬季辅助色素影响和夏季打包效应有关, 空间分布特征与 Chla 基本相反。研究了两个季节 674 nm 处 $a_{ph}(\lambda)$ 与 Chla 的线性关系, 两者的皮尔逊相关系数为 0.938, 使用 2009 年 8 月长江口邻近海域的独立数据对模型进行验证, 反演的均方根误差为 1.599 mg/m³, 结果理想。

关键词:杭州湾; 叶绿素 a 浓度; 吸收系数; 比吸收系数; 季节变化

中图分类号: Q945.11; TP79 文献标识码: A 文章编号: 1672-0504(2013)05-0112-07

叶绿素 a 浓度 (Chla) 是衡量水体富营养化程度和估算初级生产力的关键指标之一。浮游植物吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 和比吸收系数 $a_{ph}^*(\lambda)$ 是水体的固有光学量, 它们是建立遥感反演 Chla 的生物-光学模型的前提和基础^[1-3], 对于实现海洋 Chla 遥感反演和环境监测具有重要作用。近年来国内外研究人员发现 $a_{ph}^*(\lambda)$ 在近岸海域具有明显的时空变化。Babin 等^[4-6]对欧洲近岸水体的浮游植物光学特性的时空变化进行了研究, Brunelle 等^[7]在加拿大北极洋大范围海域分析 $a_{ph}(\lambda)$ 和 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的变化特征, Lohrenz 等^[8,9]在卡罗莱纳、加利福尼亚附近海域及加利福尼亚海流北部海域对比了 $a_{ph}(\lambda)$ 和 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的时空差异, 王桂芬等^[10-12]对南海北部和珠江口邻近海域 $a_{ph}(\lambda)$ 和 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的变化进行研究, 朱建华等^[14-17]分析了黄海、东海 $a_{ph}(\lambda)$ 和 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的冬夏季节变化。这些研究结果表明, Chla、 $a_{ph}(\lambda)$ 和 $a_{ph}^*(\lambda)$ 存在显著的季节和空间变异。 $a_{ph}(\lambda)$ 的时空分布特征与 Chla 相似, 主要与水体中光照、营养盐、温度等的变化有关^[18], 而 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的时空分布与 Chla 大致相反, 主要与辅助色素含量和色素打包效应的变化有关^[19]。

杭州湾是一个强潮型海湾, 在不同季节浮游植物总丰度和各藻类所占比例都有显著变化, 导致浮游植物光学特性有明显的时空变异。本文以 2012 年 3 月和 7 月在杭州湾邻近海域两个航次采集的实测数据为基础, 研究了该海域冬、夏季 Chla、 $a_{ph}(\lambda)$

和 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的时空变化特征及相关环境因子的分布特点, 分析了影响浮游植物光学特性冬、夏季节变化的因素, 并建立了适合杭州湾的 Chla 和 $a_{ph}(\lambda)$ 的关系, 为今后提高遥感参数反演的精度奠定了基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域和测站

2012 年冬季 (3 月 6—14 日) 和夏季 (7 月 14—17 日) 在杭州湾邻近海域 (121.75°~124.25°E, 29.5°~30.57°N) 进行了两次巡航观测, 采样站位见图 1。7 月与 3 月采样点重合, 另增加了 4 个点 (A11、B8、C8 和 D9), 两个航次共计实测站位 54 个, 其中 3 月测站 26 个, 7 月测站 28 个, 定义为样品集 A。

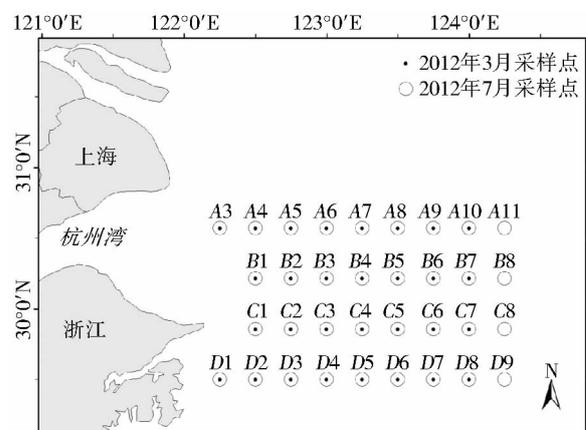


图 1 采样点位分布

Fig. 1 Map of the sampling stations in Yangtze River Estuary

收稿日期: 2013-02-22; 修回日期: 2013-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271375); 教育部博士点基金项目 (20120076110009); 河口海岸学国家重点实验室科研业务项目 (2012KYYW02)

作者简介: 张晋芳 (1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事海岸带遥感及 GIS 应用研究。* 通讯作者 E-mail: fshen@sklec.ecnu.edu.cn

1.2 采样与测定方法

样品的采集方法参考 NASA 的生物光学调查规范^[20]和国家海洋局 908 专项办公室编制的海洋光学调查技术规程^[21]。对于颗粒物吸收样品,采集水样置于阴暗处,将 GF/F(WhatmanTM Φ47 mm)滤膜预先在 0.22 μm 海水中浸泡 60 min,在低真空状态下过滤一定体积(V_f)水样到 GF/F 滤膜上,同时过滤适量蒸馏水作为参比样品,过滤完成后放入贴有标签的样品盒,加一滴 0.22 μm 海水后转移至液氮桶保存。现场采集的样品运回实验室后即准备测量工作,颗粒物吸收系数测量使用紫外可见分光光度计(PerkinElmer, Lambda-1050),波段范围 350~1 000 nm,间隔 2 nm,采用 Röttgers 等^[22]的吸收法进行测量。经与透射法与透射-反射法测定颗粒物吸收系数的结果对比,吸收法受滤膜差异性和滤膜分布是否均匀等因素的影响小,测量精度较高^[23]。叶绿素 a 浓度使用荧光分光光度计(HITA-CHI, FL-2500)测定,激发波长为 436 nm,发射波长为 670 nm。

1.3 浮游植物吸收系数估算

颗粒物吸收系数计算公式如下:

$$a_{p,NAP}(\lambda) = \frac{2.303A_f}{\beta V_f} [D_s(\lambda) - D_r(\lambda)] \quad (1)$$

式中: A_f 和 V_f 分别为滤膜上颗粒物富集面积和过水体积; $D_s(\lambda)$ 为样品滤膜光学密度; $D_r(\lambda)$ 为空白参

比滤膜的光学密度; β 为光程放大校正因子,取 $\beta=4.5$ 。 $a_p(\lambda)$ 、 $a_{NAP}(\lambda)$ 分别是褪色前、后的颗粒物吸收系数,即总颗粒物吸收系数和无机颗粒物吸收系数,两者的差即为浮游植物吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$:

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_{NAP}(\lambda) \quad (2)$$

浮游植物比吸收系数定义为浮游植物吸收系数与叶绿素 a 浓度的比值:

$$a_{ph}^*(\lambda) = a_{ph}(\lambda) / Chla \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 Chla 的时空分布与环境因子

Chla 反映了海水中浮游植物的生长情况。为研究杭州湾邻近海域浮游植物的分布特征及环境因子对其影响,文中给出两个航次采集的 Chla、浊度、盐度的空间分布(图 2)。图 2a 显示 3 月杭州湾邻近海域表层 Chla 的变化范围为 0.027~0.728 mg/m³,平均值为 0.386 mg/m³。北部自西向东逐渐降低,南部自西向东先增后降,最高值出现在 123°E 附近海域,最低值出现在浙江南岸附近海域。图 2b 显示 7 月 Chla 较 3 月显著升高,调查海域表层 Chla 的变化范围 0.322~8.880 mg/m³,平均值 2.980 mg/m³ 为 3 月平均值的 7.72 倍。7 月 Chla 呈明显的条带状分布特征,高值出现在 123°E 附近,高值区南部与 3 月空间分布重叠,北部向东移动。

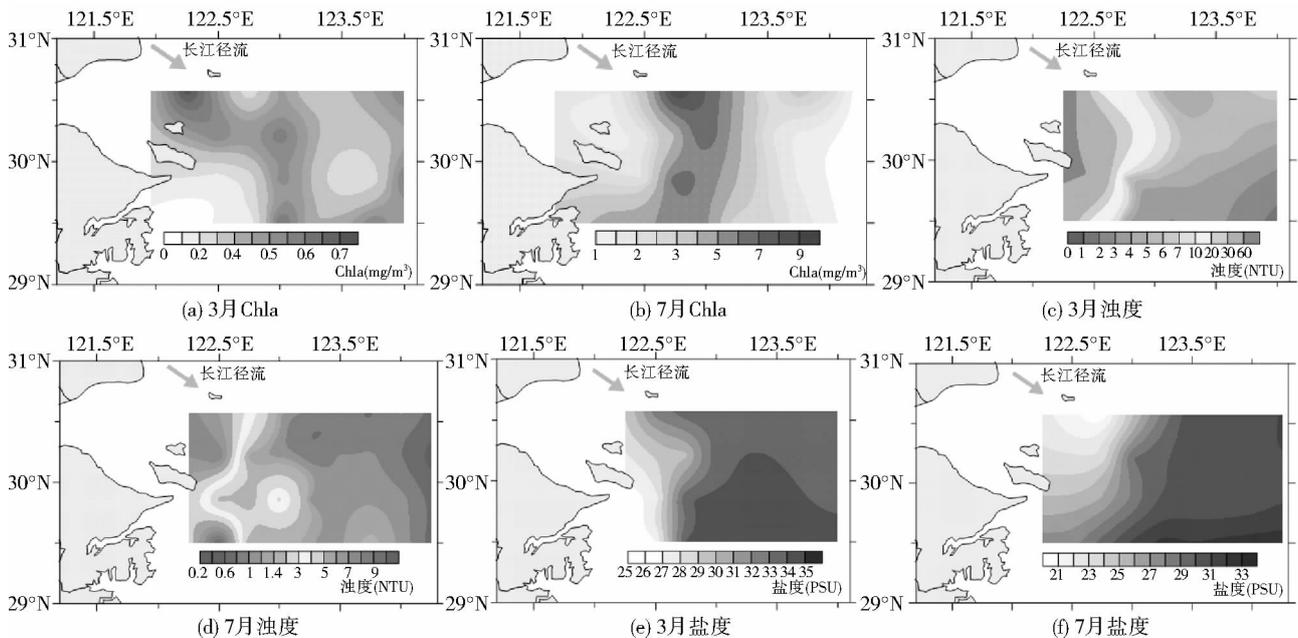


图 2 2012 年 3 月和 7 月测量区域内 Chla、浊度(NTU)、盐度(PSU)的空间分布
Fig. 2 Space distribution of Chla, turbidity, salinity in March and July 2012

空间分布上,冬、夏季 Chla 均在 123°E 附近出现最大值。分析原因可能是,在 122.5°E 以西海域水体浊度非常高(图 2c、图 2d),悬浮颗粒的消光作用较强,

不利于浮游植物光合作用,故 Chla 较低;在 123.5°E 以东海域,距离海岸较远,陆源的营养盐供应不足,限制了浮游植物的生长,故 Chla 也较低;在 122.5°~

123°E 区域的海域,由于水体浊度在 123°E 附近骤减,光照充足,同时长江冲淡水带来的营养盐较充足,最适宜浮游植物生长,故出现了 Chla 的高值区,这与 Gao 等^[24,25]在长江口的研究结果一致。季节变化上,冬季 Chla 显著低于夏季,分析原因:其一,相对于 3 月海水温度 (7.0~12.5°C),7 月海水温度 (24.9~27.4°C) 更适合浮游植物的生长;其二,3 月由于强烈风浪下泥沙再悬浮作用加强,导致杭州湾附近海域浊度较夏季明显下降,泥沙消光作用限制了浮游植物生长;其三,夏季正值长江的洪季,长江径流作用增强带来了更多的营养盐,也有利于浮游植物生长。此外发现,3 月 Chla 的高值区与盐度 31~33 PSU 等值线对应(图 2a、图 2e),7 月 Chla 的高值区与盐度 28~30 PSU 等值线对应(图 2b、图 2f)。其原因可能是,盐度与营养盐呈现出显著的负相关,3 月盐度与总 N、P、Si 相关系数分别是 -0.966、-0.903、-0.979,而且盐度

与浊度也呈现显著的负相关,3 月和 7 月相关系数分别是 -0.844、-0.582,即盐度越高浊度越低,水下光照条件越好,故对于中等盐度的海域,光照条件较好,营养盐也充足,最适合浮游植物生长,Chla 出现高值分布。这与陈炜清^[26]对长江口附近海域的研究结果一致。

2.2 浮游植物吸收系数

浮游植物吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 是 Chla 浓度遥感反演的光学代理,在水色遥感应用中非常重要。Babin 等^[4,27]对不同近岸水体的研究发现,不同季节浮游植物 $a_{ph}(\lambda)$ 差异较大。文中去除了部分近岸水体样品(叶绿素吸收系数波谱没有波峰现象)和蓝波段吸收系数测量为负值的样品后,得到 43 个有效数据(3 月 19 个,7 月 24 个),定义为样品集 B。为了比较冬、夏季节该海域浮游植物 $a_{ph}(\lambda)$ 的变化特征,文中给出了两个航次样品集 B 的 $a_{ph}(\lambda)$ 光谱(图 3),图中不同线条代表不同的站位测定数据。

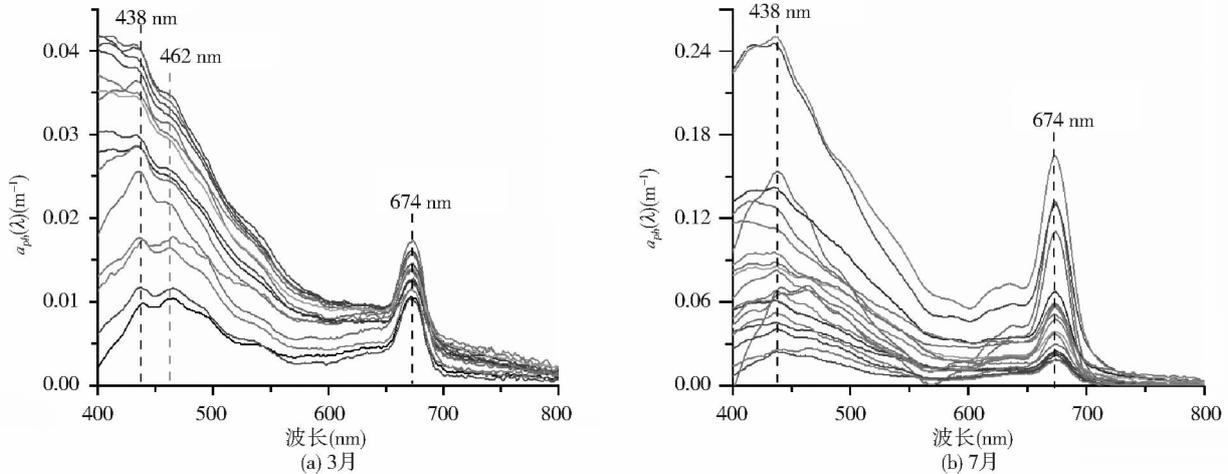


图 3 2012 年 3 月和 7 月实测浮游植物吸收系数波谱曲线
Fig. 3 Absorption coefficient of phytoplankton in March and July 2012

总体看,杭州湾邻近海域浮游植物 $a_{ph}(\lambda)$ 与 Chla 的时空变化一致。以 674 nm 波长处吸收系数为例,3 月 $a_{ph}(\lambda)$ 变化范围为 0.011~0.017 m^{-1} ,7 月的变化范围为 0.018~0.165 m^{-1} 。浮游植物 $a_{ph}(\lambda)$ 不仅大小随季节有较大变化,其光谱形状也随季节变化呈现不同特征,3 月 $a_{ph}(\lambda)$ 在蓝光波段 440 nm 和 462 nm 附近有两个吸收峰,7 月 $a_{ph}(\lambda)$ 只在蓝光波段 440 nm 附近有一个吸收峰,原因可能与辅助色素对 $a_{ph}(\lambda)$ 的影响有关。 $a_{ph}(\lambda)$ 光谱形状特征可以用蓝红比值(一般为 $a_{ph}(440)/a_{ph}(674)$)代表。辅助色素如叶绿素 b、叶绿素 c、 β -胡萝卜素、硅甲藻黄素、墨角藻黄素等在蓝光波段(440~490 nm)存在吸收峰^[28],而在红光波段(670 nm 附近)只有叶绿素 a 和脱镁叶绿素 a 存在吸收峰,故蓝红比值可以大体反映辅助色素对 $a_{ph}(\lambda)$ 的影响。文中计算两个航次样品集 B 蓝红比值(表 1)。

表 1 $a_{ph}(\lambda)$ 的蓝红比值 ($a_{ph}(440)/a_{ph}(674)$)
Table 1 The ratio of phytoplankton absorption coefficient in blue and red band ($a_{ph}(440)/a_{ph}(674)$)

点位	3 月	7 月	点位	3 月	7 月
A2	—	3.64	C2	2.83	—
A3	—	3.39	C3	1.13	—
A4	—	2.17	C4	2.40	—
A5	1.28	1.50	C5	1.53	—
A6	3.26	—	C6	2.26	1.38
A7	2.28	—	C8	—	2.36
A8	—	1.96	D1	5.10	0.82
A9	—	1.20	D2	3.44	—
A10	2.59	1.41	D3	0.95	1.15
A11	—	2.93	D4	1.61	1.86
B3	2.90	0.63	D5	2.05	2.61
B4	—	1.13	D6	2.47	2.10
B5	—	1.45	D7	2.51	2.06
B6	—	2.15	D8	2.00	1.07
B7	2.66	1.69	D9	—	2.33
			平均值	2.38	1.80

3 月蓝红比值变化范围为 0.95~5.10,平均值 2.50,

7 月变化范围为 0.20~3.64, 平均值 1.80, 说明 3 月辅助色素所占比例较高。

2.3 浮游植物比吸收系数

浮游植物比吸收系数 $a_{ph}^*(\lambda)$ 是水色遥感模型的重要参数, 受辅助色素和色素打包效应的影响, 在不同海域 $a_{ph}^*(\lambda)$ 有着较大的差异, 研究 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的时空变化对于提高海域生物-光学建模的精度有重要意义。本文计算了 3 月和 7 月两个航次的

$a_{ph}^*(\lambda)$, 以 674 nm 为例, 图 4 给出了两个航次 $a_{ph}^*(674)$ 的分布。3 月 $a_{ph}^*(674)$ 变化范围为 0.025~0.059 m^2/mg , 最小值出现在 123°E 附近, 与 Chla 的最大值空间分布范围大致对应; 7 月 $a_{ph}^*(674)$ 变化范围为 0.007~0.059 m^2/mg , 在近杭州湾和 124°E 以东海域出现高值, 而低值出现在研究区域的中间部分, 与 Chla 高值区 ($>2 mg/m^3$) 基本对应。

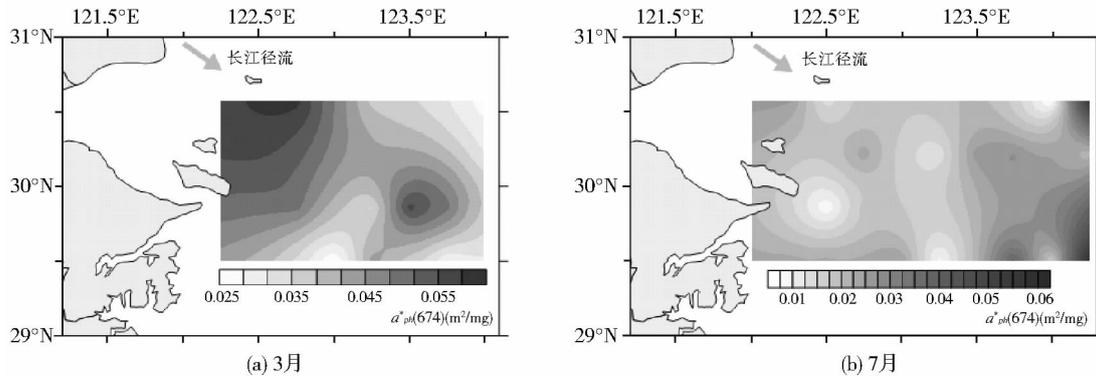


图 4 2012 年 3 月和 7 月 $a_{ph}^*(674)$ 空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of $a_{ph}^*(674)$ in March and July 2012

总体上, 浮游植物 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的季节差异明显, 冬季高于夏季, 与 Chla 的变化特征相反。分析原因可能为: 3 月蓝红比值平均值为 2.38, 7 月为 1.80, 可见 3 月的辅助色素对浮游植物 $a_{ph}^*(\lambda)$ 贡献较大, 故 3 月 $a_{ph}^*(\lambda)$ 较 7 月高; 7 月 Chla 较 3 月高(图 2), Chla 增高时色素打包效应增强, 导致 $a_{ph}^*(\lambda)$ 变小, 故 7 月 $a_{ph}^*(\lambda)$ 较 3 月小, 与王桂芬等^[10,4] 研究结果一致; 长江口邻近海域表层浮游植物粒径冬季 $>20 \mu m$ 占 25%、 $5\sim20 \mu m$ 占 45%、 $<5 \mu m$ 占 30%, 而夏季 $>20 \mu m$ 占 55%、 $5\sim20 \mu m$ 占 25%、 $<5 \mu m$ 占 20%, 总体上冬季浮游植物粒径较夏季小^[29], 粒径增大色素打包效应增强^[8,18,28], 故夏季的 $a_{ph}^*(\lambda)$ 较冬季小。

为了将本文研究结果与其他近岸海域的 $a_{ph}^*(\lambda)$ 进行对比, 文中给出了 440 nm 附近和 674 nm 附近 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的变化范围(表 2)。整体看, 不同近岸海域的 $a_{ph}^*(\lambda)$ 存在较大差异, 最大值与最小值相差可达两个数量级, 且在相同海域 $a_{ph}^*(\lambda)$ 在不同季节也存在可变性。本文夏季的结果与 Wang 等^[11] 在珠江口地区得到的 $a_{ph}^*(674)$ 变化范围相近, 而较王桂芬等^[10] 在南海北部海区测得的结果小。冬季杭州湾地区的 $a_{ph}^*(\lambda)$ 整体高于 Millán-Núñez 等^[9] 在加利福尼亚湾流南部海域和 Stuart 等^[27] 在温哥华岛邻近海域的测量结果。近岸海域的环境条件各不相同, 适合生长的浮游植物种类及其生长状况有所不同, 故 $a_{ph}^*(\lambda)$ 有较大差别。

表 2 世界不同海区的 $a_{ph}^*(\lambda)$
Table 2 Values of specific absorption coefficient $a_{ph}^*(\lambda)$ at λ_1 (about 440 nm) and λ_2 (about 674 nm) in different regions of world oceans

海区	调查季节	$a_{ph}^*(\lambda_1)(m^2 \cdot mg^{-1})$	$a_{ph}^*(\lambda_2)(m^2 \cdot mg^{-1})$	参考文献
加利福尼亚湾流南部海域	冬季	0.008~0.102(0.041)	0.001~0.038(0.015)	文献[9]
温哥华岛邻近海域	冬季	0.037±0.008	0.022±0.003	文献[27]
北海和英吉利海峡西部	春夏秋季	0.017~0.194		文献[5]
阿拉伯海	夏季	0.045±0.012	0.020±0.005	文献[27]
	秋季	0.089±0.014	0.035±0.005	
巴塔哥尼亚海域	春季	0.018~0.173	0.009~0.046	文献[30]
珠江口	夏季	0.011~0.082	0.007~0.042	文献[11]
南海北部海区	夏季	0.041~0.295(0.137)	0.023~0.107(0.047)	文献[10]
长江口邻近海域	夏季	0.014~0.334(0.077)	0.006~0.132(0.035)	文献[17]
杭州湾邻近海域	夏季	0.010~0.164(0.050)	0.007~0.059(0.026)	
	冬季	0.041~0.140(0.084)	0.025~0.059(0.039)	本研究

注: λ_1 为 440 nm 附近, λ_2 为 674 nm 附近。

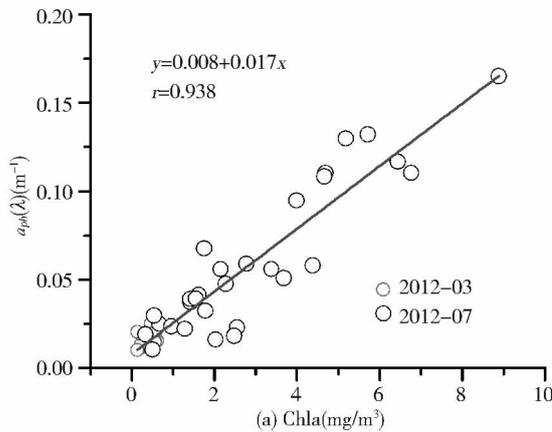
2.4 冬、夏季浮游植物 $a_{ph}^*(\lambda)$ 与 Chla 的关系

叶绿素 a 是浮游植物最重要的色素, $a_{ph}^*(\lambda)$ 与

Chla 有着共同变化趋势, 两者的关系是遥感半分析模型中重要的组成部分, 是遥感反演 Chla 的基础。

在不同海域两者的拟合关系不一^[10,12,27],故建立适合于杭州湾临近海域的 $a_{ph}(\lambda)$ 与 Chla 的关系对于改善该海域遥感反演 Chla 的精度有重要作用。学者们在不同海域使用不同的关系式建立两者间的关系,如朱建华等^[14,18]使用幂指数函数,Sathyendranath 等^[31]使用正交双曲函数,Cleveland^[32]采用二次多项式。本文对样品集 B 中 674 nm 波段的吸收系数与 Chla 建立散点图,为获得最佳的关系式,采用了多种函数(线性函数、二次多项式、幂指数、双曲函数)进行拟合,表 3 为各种方法拟合得到的参数及相关系数,可以看出,线性拟合精度最高且线性关系式计算简单,故选用线性关系建立 $a_{ph}(674)$ 与 Chla 的关系(图 5a),可以看出, $a_{ph}(674)$ 与 Chla 有较高相关性,皮尔逊相关系数为 0.938,拟合的关系式为:

$$a_{ph}(\lambda) = 0.008 + 0.017Chla \quad (4)$$



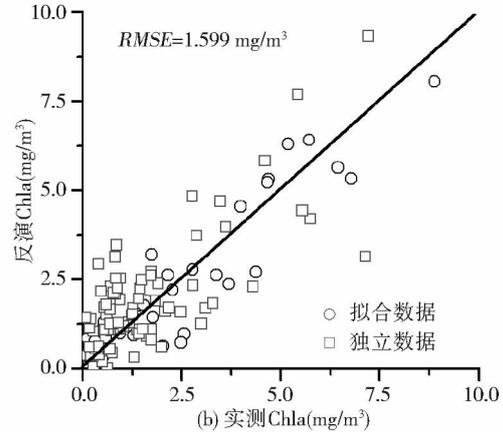
两边同时除以 Chla 得到:

$$a_{ph}^*(\lambda) = \frac{0.008}{Chla} + 0.017 \quad (5)$$

由式(5)知, $a_{ph}^*(674)$ 随着 Chla 的增大而减小,当 Chla 趋于无穷大时 $a_{ph}^*(674)$ 趋于 0.017,而 Chla 趋于 0 时, $a_{ph}^*(674)$ 趋于正无穷大。使用 2009 年 8 月长江口邻近海域的独立数据对建立的 $a_{ph}(674)$ 与 Chla 的关系进行精度检验,将反演得到的 Chla 与实测的 Chla 进行对比(图 5b),反演精度较好,独立数据反演的均方根误差为 1.599 mg/m³。

表 3 不同函数拟合 $a_{ph}(674)$ 与 Chla 关系的结果
Table 3 Fitting results between $a_{ph}(674)$ and Chla using different functions

关系式	参数 1	参数 2	r	N
线性	0.008	0.017	0.938	43
幂指数	0.024	0.861	0.935	43
二次多项式	0.000	0.022	0.936	43
双曲函数	0.881	39.406	0.936	43



注:拟合数据为数据集 A 中的数据,独立数据为 2009 年 8 月在长江口杭州湾海域的测量数据。

图 5 Chla 与 $a_{ph}(674)$ 的关系和使用 $a_{ph}(674)$ 反演得到的 Chla 与实测 Chla 的关系

Fig. 5 Relation between Chla and $a_{ph}(674)$ and relation between retrieval Chla using $a_{ph}(674)$ and measured Chla

3 结论

本文分析了长江口邻近海域浮游植物光学特性的冬、夏季变化特征,得到以下结论:1)研究区域内 Chla 分布特点为高浓度区域呈条带状,在 123°E 出现最高值,Chla 最高值冬季与盐度 31~33 PSU 等值线对应、夏季与盐度 28~30 PSU 等值线对应,空间分布主要受到光照与营养盐的影响。该海域冬季 Chla 变化范围为 0.015~0.726 mg/m³,夏季 Chla 变化范围为 0.322~8.880 mg/m³,差异的原因与水温、盐度、浊度和营养盐等因子有关。2)杭州湾邻近海域浮游植物 $a_{ph}(\lambda)$ 与 Chla 的时空变化相似,以 $a_{ph}(674)$ 为例,冬季变化范围为 0.011~0.017 m⁻¹,夏季变化范围为 0.018~0.165 m⁻¹,夏季较冬季高; $a_{ph}(\lambda)$ 的光谱特征表现为蓝红比值冬季平均值为 2.19,夏季平均值为 1.77,冬季较夏季大。3)浮游植物 $a_{ph}^*(\lambda)$ 的季节变化

特征与 Chla 相反,冬季 $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(674)$ 平均值分别为 0.084、0.039,夏季 $a_{ph}^*(440)$ 、 $a_{ph}^*(674)$ 平均值分别为 0.050、0.026,夏季小于冬季,主要原因为,夏季辅助色素贡献较小且打包效应更强。4)在建立浮游植物 $a_{ph}(\lambda)$ 与 Chla 的关系时, $a_{ph}(674)$ 与 Chla 有较好的线性相关性,皮尔逊相关系数为 0.938。引入 2009 年 8 月获取的长江口邻近海域独立数据对建立的 $a_{ph}(674)$ 与 Chla 关系进行验证,结果较好,均方根误差为 1.599 mg/m³。

感谢国家自然科学基金委对 2012 年 3 月和 7 月两个航次的经费赞助,感谢实验室同学在数据采集集中付出的辛勤劳动!

参考文献:

[1] CARDER K L, CHEN F R, LEE Z P, et al. Semianalytic moder-

- ate-resolution imaging spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures[J]. *Geophysical Research-Oceans*, 1999, 104(C3):5403-5421.
- [2] GARVER S A, SIEGEL D A. Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation 1. Time series from the Sargasso Sea[J]. *Geophysical Research*, 1997, 102(C8):18607-18618.
- [3] LEE Z P, CARDER K L, ARNONE R A. Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27):5755-5772.
- [4] BABIN M, STRAMSKI D, FERRARI G M, et al. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe[J]. *Geophysical Research*, 2003, 108(C7):3211.
- [5] TILSTONE G H, PETERS S W M, VAN DER WOERD H J, et al. Variability in specific-absorption properties and their use in a semi-analytical ocean colour algorithm for MERIS in North Sea and Western English Channel Coastal Waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 118:320-338.
- [6] GOELA P C, JOHN I, CRISTINA S, et al. Specific absorption coefficient of phytoplankton off the Southwest coast of the Iberian Peninsula: A contribution to algorithm development for ocean colour remote sensing[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 52(1):119-132.
- [7] BRUNELLE C B, LAROUCHE P, GOSSELIN M. Variability of phytoplankton light absorption in Canadian Arctic seas[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2012, 117(C00G17).
- [8] LOHRENZ S E, WEIDEMANN A D, TUEL M. Phytoplankton spectral absorption as influenced by community size structure and pigment composition[J]. *Plankton Research*, 2003, 25(1):35-61.
- [9] MILLÁN-NÚÑEZ E, SIERACKI M E, MILLÁN-NÚÑEZ R, et al. Specific absorption coefficient and phytoplankton biomass in the southern region of the California Current[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, 51(6):817-826.
- [10] 王桂芬, 曹文熙, 许大志, 等. 南海北部水体浮游植物比吸收系数的变化[J]. *热带海洋学报*, 2005(5):1-10.
- [11] WANG G, CAO W, YANG Y, et al. Variations in light absorption properties during a phytoplankton bloom in the Pearl River estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(9):1085-1094.
- [12] CAO W, YANG Y, LIU S, et al. Spectral absorption coefficient of phytoplankton and its relation to chlorophyll a and remote sensing reflectance in coastal waters of southern China[J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(4):342-350.
- [13] WU J Y, HONG H S, SHANG S L, et al. A preliminary study of the variation of phytoplankton absorption coefficients in the northern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 28(5):17-29.
- [14] 朱建华, 李铜基. 黄东海海区浮游植物色素吸收系数与叶绿素 a 浓度关系研究[J]. *海洋技术*, 2004, 23(2):117-122.
- [15] 王林, 赵冬至, 杨建洪, 等. 北黄海浮游植物吸收系数的季节性变化研究[J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(1):60-65.
- [16] LEI H, PAN D, BAI Y, et al. The proportions and variations of the light absorption coefficients of major ocean color components in the East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 31(2):45-61.
- [17] 洪官林. 长江口及邻近海域叶绿素的光学特性及其遥感应用[D]. 华东师范大学, 2011.
- [18] BRICAUD A, CLAUSTRE H, RAS J, et al. Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: Influence of the size structure of algal populations[J]. *Geophysical Research*, 2004, 109(C11):C11010.
- [19] SATHYENDRANATH S, LAZZARA L, PRIEUR L. Variations in the spectral values of specific absorption of phytoplankton[J]. *Limnology and Oceanography*, 1987, 34(11):403-415.
- [20] MUELLER L J, FARGION S G. Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation [M]. NASA/TM, 2002. 231-254.
- [21] 国家海洋局专项办公室. 海洋光学调查技术规程[M]. 北京: 海洋出版社, 2006. 11-12.
- [22] RÖTTGERS R G S. Measurement of light absorption by aquatic particles: Improvement of the quantitative filter technique by use of an integrating sphere approach[J]. *Applied Optics*, 2011, 51(9):1336-1351.
- [23] 余小龙, 沈芳, 张晋芳. 影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(5):1745-1753.
- [24] GAO X, SONG J. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(3):327-335.
- [25] ZHU Z, NG W, LIU S, et al. Estuarine phytoplankton dynamics and shift of limiting factors: A study in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent area[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 84(3):393-401.
- [26] 陈炜清. 叶绿素活性荧光在长江口的应用研究[D]. 华东师范大学, 2011.
- [27] STUART V, SATHYENDRANATH S, PLATT T, et al. Pigments and species composition of natural phytoplankton populations: Effect on the absorption spectra[J]. *Plankton Research*, 1998, 20(2):187-217.
- [28] FUJIKI T, TAGUCHI S. Variability in chlorophyll alpha specific absorption coefficient in marine phytoplankton as a function of cell size and irradiance[J]. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24(9):859-874.
- [29] ZHOU W, YIN K, LONG A, et al. Spatial-temporal variability of total and size-fractionated phytoplankton biomass in the Yangtze River Estuary and adjacent East China Sea coastal waters, China[J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2012, 15(2):200-209.
- [30] FERREIRA A, STRAMSKI D, GARCIA C A E, et al. Variability in light absorption and scattering of phytoplankton in

- Patagonian waters; Role of community size structure and pigment composition[J]. *Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(2): 698—714.
- [31] SATHYENDRANATH S, PLATT T. The spectral irradiance field at the surface and in the interior of the ocean; A model for applications in oceanography and remote-sensing[J]. *Geophysical Research: Oceans*, 1988, 93(C8): 9270—9280.
- [32] CLEVELAND J S. Regional models for phytoplankton absorption as a function of chlorophyll a concentration[J]. *Geophysical Research: Oceans*, 1995, 100(C7): 13333—13344.

Variations of Phytoplankton Absorption Properties in Winter and Summer in Hangzhou Bay Adjacent Coastal Ocean

ZHANG Jin-fang, SHEN Fang, YU Xiao-long, ZHOU Yun-xuan

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Phytoplankton absorption properties, critical components of inherent optical properties of oceanic and coastal waters, are the bases of chlorophyll-a retrieval using remote sensing. According to the data of chlorophyll-a concentration (Chla), phytoplankton absorption coefficient $a_{ph}(\lambda)$ and phytoplankton specific coefficient $a_{ph}^*(\lambda)$ acquired from the adjacent waters of Hangzhou Bay in March and July 2012, the spatial and temporal variations of phytoplankton absorption properties are analyzed. Results show that Chla ranged from 0.029 mg/m³ to 0.728 mg/m³ in winter and from 0.322 mg/m³ to 8.880 mg/m³ in summer, phytoplankton absorption coefficient at 674 nm, $a_{ph}(674)$, ranged from 0.011 m⁻¹ to 0.017 m⁻¹ in winter and the range in summer is 0.018 m⁻¹ to 0.165 m⁻¹, for specific absorption coefficient at 674 nm, $a_{ph}^*(674)$, the range are 0.025~0.059 m²/mg and 0.007~0.059 m²/mg in winter and summer, respectively. Spatial distribution of Chla indicated that peak value appeared around the 123°E area in both seasons. $a_{ph}(\lambda)$ showed a similar distribution with Chla, while $a_{ph}^*(\lambda)$ almost distribute inversely to Chla. $a_{ph}(\lambda)$ value in winter was higher than that in summer, which may related to pigment packaging effects and pigment composition in phytoplankton cells. At last, the authors study the linear relationship between Chla and $a_{ph}(\lambda)$ at 440 nm and 674 nm, both of which are mostly used wavelength in chlorophyll retrieval from satellite. The relationship between $a_{ph}(674)$ and Chla is given in this study with the Pearson correlation coefficients of 0.938. The accuracy of the $a_{ph}(674)$ and Chla model is testified when independent data acquired from Yangtze estuary in August 2009 put into the function with a root mean square error of 1.599 mg/m³.

Key words: Hangzhou Bay; chlorophyll-a concentration; absorption coefficient of phytoplankton; specific absorption coefficient; seasonal variation

(上接第 101 页)

Tourist Flow's Response to Degree of Consumer Network Attention to Zunyi Tourism

LONG Mao-xing¹, SUN Gen-nian², LONG Zhen-fu³

(1. School of History and Tourist Management, Zunyi Normal College, Zunyi 563099; 2. College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062; 3. The Library of Zunyi Normal College, Zunyi 563099, China)

Abstract: This paper studies the tourist flow's response to the degree of consumer attention of travel network by comparative and correlative analysis based on the everyday degree of consumer network attention and tourist flow data of Zunyi tourism in 2010. The results are shown as follows. Firstly, both of the tourist network attention and tourist flow have attenuation characteristic as the increasing in the distance, and they are perfect synchronization with each other in three sections of distance. Secondly, the correlation coefficient of the tourist network attention and tourist flow is 0.757022, and it shows that the tourist flow has the high degree of response to the tourist network attention. The lastly, though both of the correlation coefficients of the tourist network attention and tourist flow with the economic levels are low which shows us that they have no correlation with the economic levels, but they have a certain correspondence in different economic levels.

Key words: the tourist network attention; tourist flow; Zunyi