

长江口外海区浮游植物生物量分布及其与环境因子的关系

林军^{1,2}, 朱建荣^{1*}, 张经¹, 吴辉¹, 罗文俊²

(1. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062;

2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 200090)

摘要: 根据2006年7月对长江口外海域67个站点的大面积综合调查结果, 分析了浮游植物的优势种、细胞丰度和叶绿素a转换生物量的分布特征。硅藻细胞丰度占绝对优势, 其中以菱形海线藻和中肋骨条藻数量最大。各站点浮游植物细胞丰度范围 $1.42 \sim 448.25 \times 10^6 \text{ cell/m}^3$, 平均值为 $90.47 \times 10^6 \text{ cell/m}^3$ 。通过细胞体积生物量转换法, 计算了2006年夏季长江口外海区浮游植物的叶绿素a转换生物量, 平均值为 $4.41 \text{ mg Chl. a/m}^3$, 各站点间变幅较大, 范围从 0.02 到 $34.08 \text{ mg Chl. a/m}^3$ 。长江口外海区夏季的浮游植物生物量在冲淡水区最高, 江苏外海居中, 而近河口区和台湾暖区最低。转换生物量大于 $4.0 \text{ mg Chl. a/m}^3$ 的高值区位于冲淡水区(3 m层)盐度为23.0的等值线两侧, 且处于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和P的低值区。悬浮物浓度、温盐、水体稳定性和营养盐是影响长江口外海域浮游植物分布的主要环境因子。在本次调查期间长江口外海不存在氮营养盐限制, 冲淡水区存在明显的P营养盐限制, 台湾暖流区存在潜在的Si营养盐限制。

关键词: 浮游植物; 生物量; 细胞体积转换法; 环境因子; 长江口外海区

中图分类号: Q 178.1; S 917

文献标识码: A

长江是我国第一大河, 年平均径流量达 $9.32 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ^[1]。长江巨量径流带来的丰富营养盐使长江口外海区成为高生产力海区, 在我国海洋渔业生产中占有重要地位。近20多年来, 随着经济迅猛发展和城市化进程的加快, 工农业废水和生活污水排放不断增加, 长江径流输入长江口海域的氮、磷增加了近2倍, 富营养化加剧, 导致长江口外海区赤潮频发、规模扩大、危害程度加重^[2]。夏季是长江径流量最大的季节, 长江冲淡水的扩展, 尤其是夏季长江冲淡水的转向现象, 是长江口外海区的一个突出的水文特征^[3], 而夏季恰恰又是台湾暖流最强盛的季节和赤潮现象频发的季节^[4]。研究夏季长江口的浮游生态系统, 对于长江口外海区的生态修复、环境保护和渔业资源的可持续利用具有重要的科学和现实意义。

在经典的海洋学研究中, 浮游植物生物量的

表示主要通过细胞丰度计数法和“集团生物量 (aggregative biomass, AB)”测量法。细胞丰度计数主要对单位水体中不同种类浮游植物细胞的数量进行统计, 但是不能区分不同种类浮游植物细胞大小的差异, 因而无法正确定量分析不同种类浮游植物对海域初级生产力的贡献进行定量; “AB”测量法通过简单快速的方法获得浮游植物某一组分(如叶绿素a等)的信息, 但无法在种属的水平上对生态系统进行定量研究^[5]。把上述两者的优点相结合的浮游植物生物量细胞体积转换法将有助于我们从生物种的水平研究浮游植物的生物量。浮游植物优势种构成了海域初级生产力的主要部分, 且部分优势种也是常发的赤潮种。由于不同浮游植物个体体积的差异很大, 其细胞丰度优势种与生物量的优势种往往不一致。本文根据2006年夏季长江口外海域的浮游植物的细胞丰度计数结

收稿日期: 2010-03-29

修回日期: 2010-10-15

资助项目: 国家自然科学基金创新团队(40721004); 上海市自然科学基金项目(10ZR1414100); 上海市教委重点学科(J50702)

通讯作者: 朱建荣, E-mail: jrzh@sklec.ecnu.edu.cn

果,结合细胞体积的测量数据,应用细胞体积转换法计算优势种的细胞体积转换叶绿素生物量,分别分析细胞丰度和转换生物量占优的浮游植物种类,探讨转换生物量的主要环境影响因子,为浮游生态系统模型提供浮游植物生物量的基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域

浮游植物样品采集于 2006 年夏季(7 月 18 日至 7 月 23 日),共设置 6 个东西向断面(30.0°N~32.5°N,断面南北间隔 1/2°;123.0°E 以西海域站点东西间距一般为 1/8°,123.0°E 以东海域 1/4°)67 个站点(图 1),同时对长江口外海区的盐度、温度、总悬浮物、营养盐(其中营养盐测量站点为 27 个站点,图 1 中实心矩形所示)等进行了多学科综合走航式观测,由第一海洋地质调查大队勘 407 测量船执行。

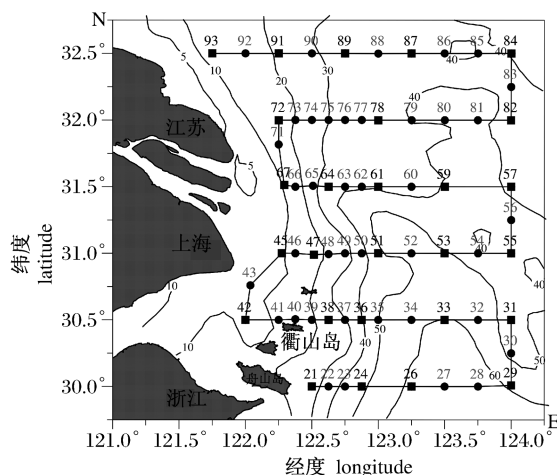


图 1 长江口外海区走航观测路线和观测站点
等值线为水深分布。

Fig. 1 The survey line and stations off the
Changjiang River Estuary

The contours are water depths and symbols filled-box are the stations that nutrients were observed.

1.2 样品采集和处理

夏季的长江口外海区正处于赤潮高发期,浮游植物生物量较高,因此浮游植物样品采样、分析鉴定和资料整理按《海洋监测规范——第 7 部分:近海污染生态调查和生物监测》(GB 17378.7-1998)进行。浮游植物样品采集采用水样法,水样由卡盖式采水器取自每个站点的

表层 3 m 水深处,每个站点采水样 2 L,用复方碘液固定。样品带回实验室后,将水样静置 48 h 以上,采用浓缩计数法鉴定,水样浓缩至 50 mL,再次静置 48 h 以上,将水样浓缩至 10 mL,浓缩液混合均匀后从中取 0.1 mL 在光学显微镜下于浮游植物计数框内进行种类鉴定和个体计数,每个水样取 3 个样本,全视野计数。浮游植物细胞的几何特征值测量在 NIKON 80I 型光学显微镜(测量精度可达 0.01 μm)下进行,每个种类取 20 个样本的平均值,所测几何特征值用于计算细胞体积,测量和计算方法参考文献[6-7]。水采浮游植物样本在采样的完整性上虽然存在一定缺陷,可能无法鉴定出一些占丰度比例小的生物种,并同时造成转换生物量的损失,但对于研究高生产力区浮游植物的优势种及其生物量是可行的。

用作营养盐分析的水样按照国家海洋局《海洋调查规范》中的分光光度法测定,温盐和总悬浮物浓度由 OBS 测定垂向剖面。

1.3 浮游植物细胞体积转换生物量研究方法

浮游植物细胞体积是研究浮游植物生物量的重要生物学参数,与其相关的细胞体积转换生物量有重要的生态学意义^[6]。有关浮游植物细胞体积转换碳生物量的研究起始于 20 世纪 60 年代,并在近十年里得到进一步的发展和应。此项研究的开拓者, MULLIN 等^[8]、STRATHMAN^[9]和 EPPLEY 等^[10]各自建立了浮游植物细胞体积(对数值)和细胞碳含量(对数值)之间的线性回归方程。他们的研究表明可以将各种浮游植物种类鉴定、细胞计数和体积测量的结果,通过细胞体积与碳含量之间的函数关系转换为碳生物量,从而可以在物种水平上对浮游植物群落生物量进行合理的估算。类似地,20 世纪 80 年代的研究还建立了浮游植物细胞体积与氮、蛋白质和叶绿素 a 等转换生物量之间的关系^[11-13]。为方便与叶绿素 a 遥感资料的直接对比,本文选用 DAVID 等^[13]公式计算浮游植物的细胞体积转换叶绿素 a 生物量:

$$y = 0.00429x^{0.917} \quad (1)$$

式中, x 为细胞体积(μm^3), y 为每个细胞叶绿素 a 含量(pg)。

1.4 优势度

优势种是具有控制群落和反映群落特征的种

类,因此优势种是数量或生物量所占比例最多的种。关于优势种的优势度有多种方法表示,本文对浮游植物细胞丰度优势度(Y)和转换生物量优势度(Y_c)分别采用以下公式计算^[14]: $Y = n_i/N \cdot f_i$,式中, n_i 为第*i*种总个体数; f_i 为该种在各个站点出现的频率; N 为所有种的总个体数。

类似地, $Y_c = c_i/C \cdot f_i$,式中, c_i 为第*i*种的总转换生物量; f_i 为该种在各个站点出现的频率; C 为所有种的转换生物总量。

1.5 等效球径

由上述方法所测得的细胞体积根据下式可得浮游植物个体的等效球径 $R = (3V/4\pi)^{1/3}$ 。

1.6 水体稳定度

水体稳定度是影响浮游植物生长的重要环境因素,常采用势能异常系数(Potential energy anomaly parameter, PEAP, 单位 J/m^3)来表示水柱的垂向稳定度^[15-17],其定义如下^[18]:

$$\varphi = \frac{1}{h} \int_h^0 (\bar{\rho} - \rho) g_z d_z; \quad \bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_h^0 \rho d_z \quad (2)$$

式中, φ 为PEAP, $\rho(z)$ 为水体垂向密度剖面, z 为所处水层, $\bar{\rho}$ 为垂向平均密度, h 为水深, g 为重力加速度。PEAP为负值时,表明水体不稳定;为正值时,值越大表示水柱的层化越强烈,水体稳定度越高^[17-18]。

2 结果

2.1 细胞丰度

本次调查共鉴定浮游植物2门9科13属,其中硅藻18种,甲藻9种。浮游植物细胞丰度高值区主要位于长江口外海和舟山群岛东部海域,浮游植物细胞丰度 $1.42 \times 10^6 \sim 448.25 \times 10^6 \text{ cell}/\text{m}^3$,平均值为 $90.47 \times 10^6 \text{ cell}/\text{m}^3$ 。硅藻类的细胞丰度占绝对优势,主要优势种为菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*),两者是长江口外海域常见的细胞丰度优势种^[19-21],本次调查中分别占到了个体计数总量的70.4%和14.4%,其中中肋骨条藻是本海域的终年优势种^[21]。若定义出现某一种藻类的站点占所有观测站点的百分比为出现频率,出现中肋骨条藻的站点为44个,出现频率为65.7%。菱形海线藻在67个站点中的66个有检出,仅在细胞丰度最小的45号站点(高浊度区)未检出,其出现频率高达98.5%。两者细胞丰度的优势度分别为0.693 1

和0.094 5。除了口门附近具有较高的中肋骨条藻细胞丰度、衢山岛附近海域具有较高的圆筛藻细胞丰度外,浮游植物总细胞丰度大于 $100.0 \times 10^6 \text{ cell}/\text{m}^3$ 的高值区主要位于 122.75°E 以东海域(图2a),并且同菱形海线藻的细胞丰度高值区基本一致(图2b)。菱形海线藻在衢山岛附近细胞丰度较低,而琼氏圆筛藻等大个体的硅藻具有较高的细胞丰度。菱形海线藻细胞丰度在 122.5°E 以东海域较高(图2b),而在 122.5°E 以西盐度相对较低的河口区,低盐性种类中肋骨条藻的细胞丰度较大。

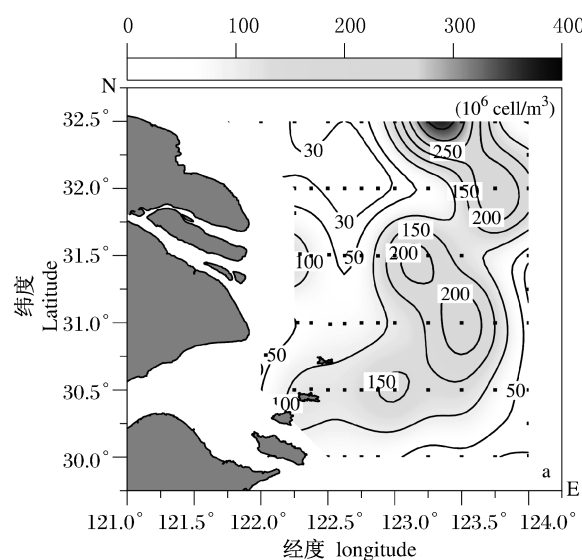


图2a 总细胞丰度

Fig. 2a Total phytoplankton cell abundance

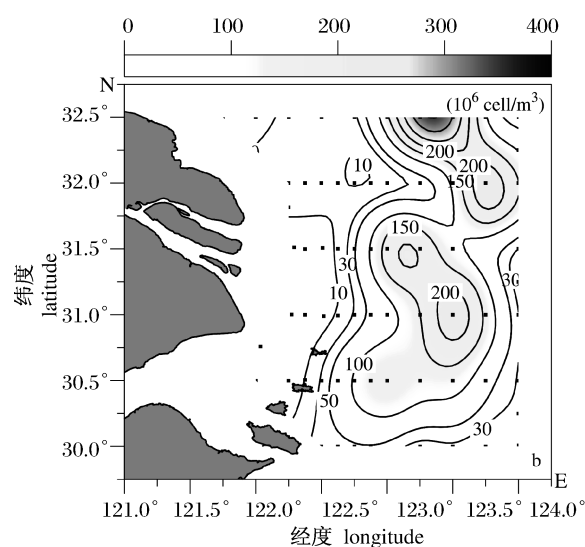


图2b 菱形海线藻细胞丰度

Fig. 2b Cell abundance of *T. nitzschioides*

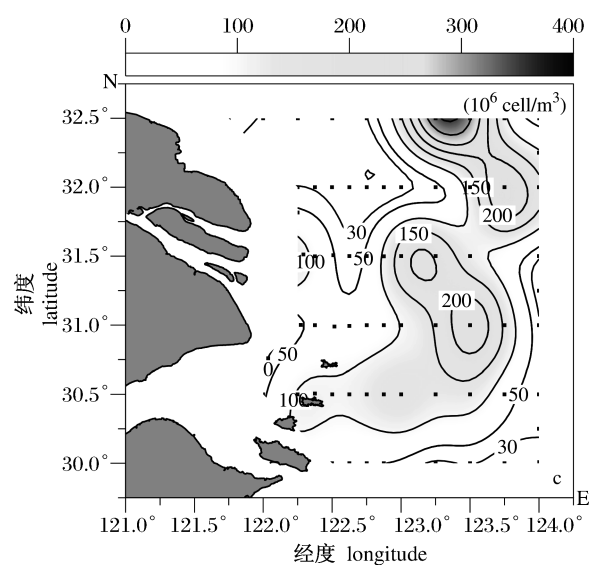


图 2c 硅藻细胞丰度

Fig. 2c Cell abundance of diatoms

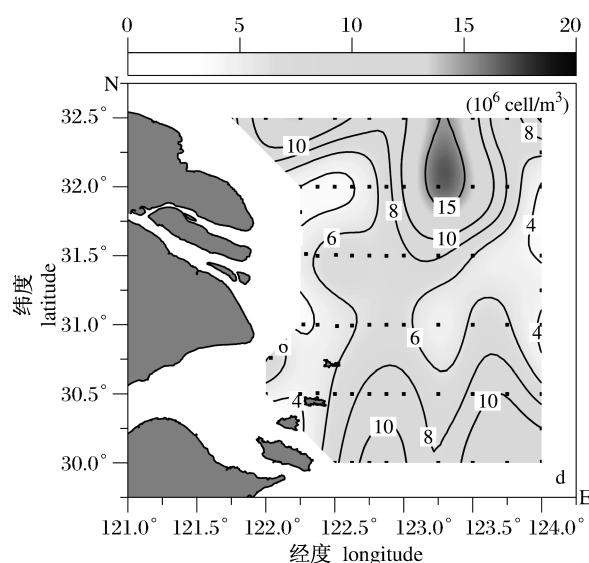


图 2d 甲藻细胞丰度

Fig. 2d Cell abundance of dinoflagellates

从硅藻和甲藻类群的细胞丰度来看,各站点硅藻细胞丰度平均为 $82.89 \times 10^6 \text{ cell/m}^3$,甲藻细胞丰度平均为 $7.59 \times 10^6 \text{ cell/m}^3$,硅藻细胞丰度远大于甲藻,因此,硅藻细胞丰度分布基本与总细胞丰度分布相似(图 2c);甲藻细胞丰度在整个调查海区相对较为均匀(图 2d),江苏外海和台湾暖流影响区有相对较高的细胞丰度。

2.2 细胞体积转换生物量

本文应用光学显微镜测量细胞几何,考虑具有足够样本数的浮游植物种类的细胞体积及其转

换生物量。几何代码对应几何形态及体积计算公式见文献[7]中的 Table II。常见种的几何尺度在定种鉴定和几何测量过程中比对了《海洋浮游生物学》等文献所述的几何特征值^[22-23]。

根据以上方法测量的细胞体积,按上述 DAVID^[3]的方法,计算得到 2006 年 7 月长江口浮游植物细胞体积转换叶绿素 a 生物量范围为 $0.02 \sim 34.08 \text{ mg Chl. a/m}^3$,平均值为 $4.41 \text{ mg Chl. a/m}^3$ 。与细胞丰度的分布相同,除了衢山岛附近海域外,转换生物量大于 $4.00 \text{ mg Chl. a/m}^3$ 的高值区也位于 122.75°E 以东海域(图 3a)。转换生物量最高值位于衢山岛以东(39 号站点),其中琼氏圆筛藻(*Coscinodiscus jonesianus*)的转换生物量高达 $32.55 \text{ mg Chl. a/m}^3$ 。由于菱形海线藻和中肋骨条藻的个体体积较小,因此其对转换生物量的贡献远比细胞丰度小,菱形海线藻的转换生物量仅占总生物量的 10.53%(细胞丰度占总细胞数 70.36%),优势度 0.104(细胞丰度优势度 0.693)。长江口门外中肋骨条藻细胞丰度高值区的转换生物量很低,小于 $2.0 \text{ mg Chl. a/m}^3$ (图 3b)。与长江口门对应的同纬度海域附近,即 $30.5^\circ\text{N} \sim 31.5^\circ\text{N}$ 、 123.75°E 以东海域也有一个小于 $2.0 \text{ mg Chl. a/m}^3$ 的转换生物量低值区,且营养盐的调查显示,这一海域的营养盐较其西侧海域高。 122.75°E 以东海域的悬浮物浓度相对降低,透明度升高,光限制降低,营养盐利用率高,浮游植物生物量达到一个高值。由菱形海线藻支持的硅藻转换生物量在 31.5°N 以北的冲淡水转向扩展海域较高(图 3b)。

从转换生物量角度来看,硅藻类优势种是琼氏圆筛藻、辐射圆筛藻(*Coscinodiscus radiatus Ehrenberg*)和菱形海线藻,转换生物量相对百分比分别占到 51.93%、15.40% 和 10.53%,优势度分别为 0.504、0.138 和 0.104,中肋骨条藻不再是优势种;甲藻类转换生物量优势种为锥多甲藻(*Peridinium conicum*)、纺锤角藻(*Ceratium fusus*)、三角角藻(*Ceratium tripos*)和分叉角甲藻(*Ceratium furca*),转换生物量相对百分比分别占到 7.54%、6.81%、3.27% 和 1.45%,优势度分别为 0.070、0.065、0.030 和 0.011。在长江冲淡水东北转向扩展区、江苏沿海以及 30.5°N 以南的台湾暖流影响区有较高的甲藻转换生物量(图 3c)。4 个硅藻丰度优势种占总丰度的 89.85%,

而其转换生物量占总量的 78.02% ;4 个甲藻优势种的丰度占总丰度的 7.70% ,而其转换生物量占总量的比例则为 19.07% (表 1)。在海洋浮游生态系统中,各种浮游植物对群落的数量贡献和生物量贡献不同,同一种浮游植物在不同时期内亦由于浮游植物自身个体体积大小、生长阶段的差异,而对浮游植物生物量的贡献大小有异。因此,转换生物量的优势种、相对百分比、优势度与细胞丰度差异较大。

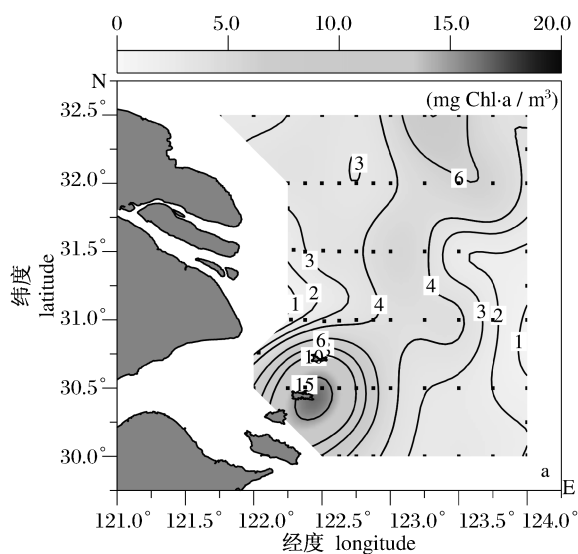


图 3a 总叶绿素 a 生物量

Fig. 3a Distribution of total Chlorophyll-a biomass

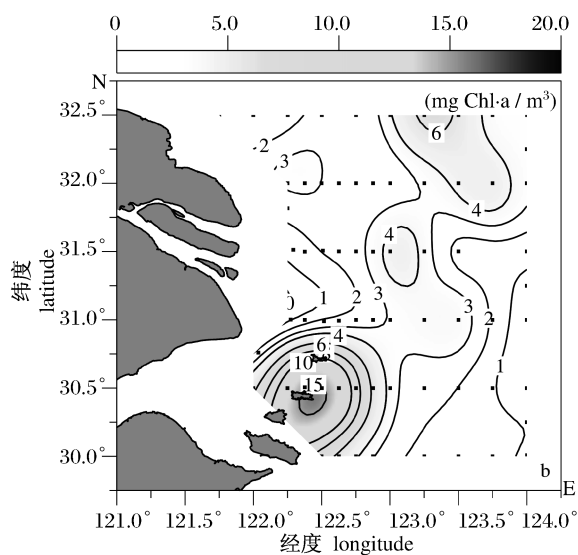


图 3b 硅藻叶绿素 a 生物量

Fig. 3b Distribution of diatoms Chlorophyll-a biomass

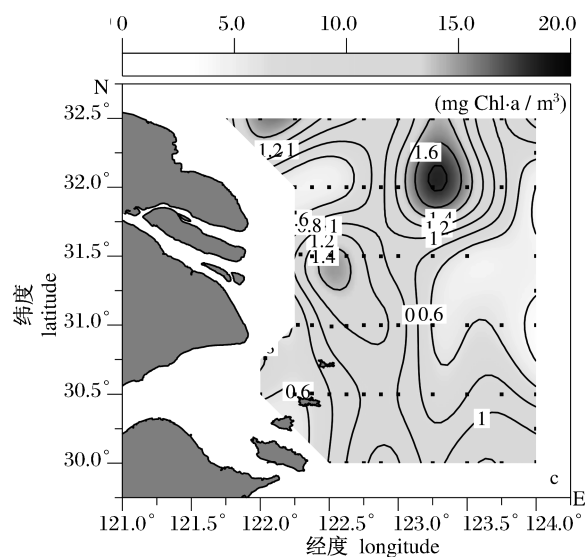


图 3c 甲藻叶绿素 a 生物量

Fig. 3c Distribution of dinoflagellates Chlorophyll-a biomass

由 NOAA 网站 (<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov>) 提供的调查同期 (7 月平均值) 的 SeaWiFS 卫星遥感资料显示,由水色数据转化的表层叶绿素 a 浓度分布趋势 (图 4a) 与总转换叶绿素 a 生物量 (图 3a) 基本一致。在江苏沿海 123.0°E 以西海域,转换生物量较遥感资料偏低;而衢山岛附近高转换生物量海域由于云层覆盖、水体浊度影响等原因,遥感资料无图像。由图 4a 对应的数据可绘制得到遥感资料的等值线图 (图 4b, 西侧边界以观测站点的范围界定,衢山岛等海域原始数据缺失)。结果显示,转换生物量较遥感资料的值稍偏低,除上述的江苏外海和衢山岛附近海域外,转换生物量平面分布趋势与遥感资料对应良好,转换生物量大于 4 mg Chl. a/m³ 的高值区基本与遥感资料大于 5 mg Chl. a/m³ 的高值区一致。

3 分析

3.1 转换生物量与环境因子的关系

浮游植物生长的限制因子通常有光照、水温、盐度和营养盐等。光照条件取决于季节、纬度和海水的浑浊程度,决定了浮游植物的空间分布;水温是决定浮游植物生物量周期性变化的最主要因素;盐度的分布则决定了不同种类浮游植物因适盐性而导致的空间分布;而在大多数海域里,营养盐的时空分布与浮游植物生物量的关系最为

表 1 细胞丰度和转换生物量优势种参数
Tab.1 Parameters of cell abundance and conversion biomass of the dominant species

类别 item	藻类 species	丰度 百分比 (%)	丰度 优势度 (Y)	转换生 物量百 分比(%)	转换生 物量优 势度(Y_c)	出现 频率 (%)	细胞 单体体积 (μm^3)	等效 球径 (μm)	单体 叶绿素 a 含量(pg)
	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	70.36	0.693	10.53	0.104	98.51	3 329.00	9.26	7.28
硅藻	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	14.39	0.095	0.16	0.001	65.67	195.00	3.60	0.54
	琼氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus jonesianus</i>	3.78	0.037	51.93	0.504	97.01	460 562.13	47.91	669.41
	辐射圆筛藻 <i>Coscinodiscus radiatus</i> Ehrenberg	1.12	0.010	15.40	0.138	89.55	458 676.79	47.84	666.90
	小计	89.65	-	78.02	-	-	-	-	-
甲藻	纺锤角藻 <i>Ceratium fusus</i>	4.53	0.043	6.81	0.065	95.52	41 294.95	21.44	73.32
	锥多甲藻 <i>Peridinium conicum</i>	1.60	0.015	7.54	0.070	92.54	143 234.50	32.46	229.38
	分叉角甲藻 <i>Ceratium furca</i>	0.88	0.007	1.45	0.011	79.10	45 600.28	22.16	80.30
	三角角藻 <i>Ceratium tripos</i>	0.69	0.006	3.27	0.030	91.04	144 957.34	32.59	231.91
	小计	7.70	-	19.07	-	-	-	-	-
	合计	97.35	-	97.09	-	-	-	-	-

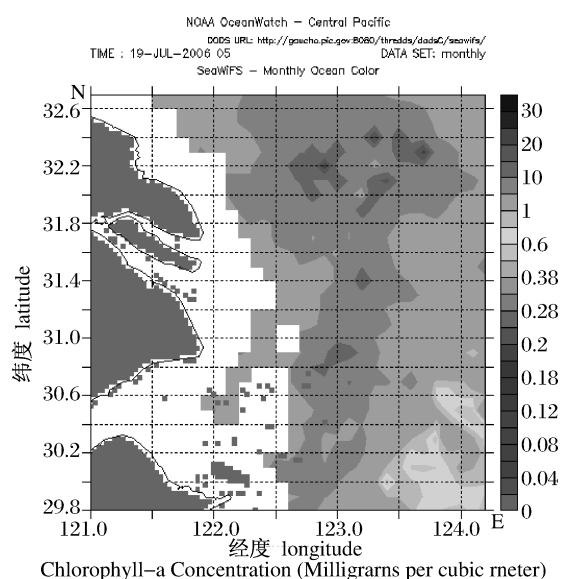


图 4a 2006 年 7 月 SeaWiFS 卫星遥感 Chl. a 分布图
Fig. 4a Image of monthly average Chl. a concentration of SeaWiFS, July 2006

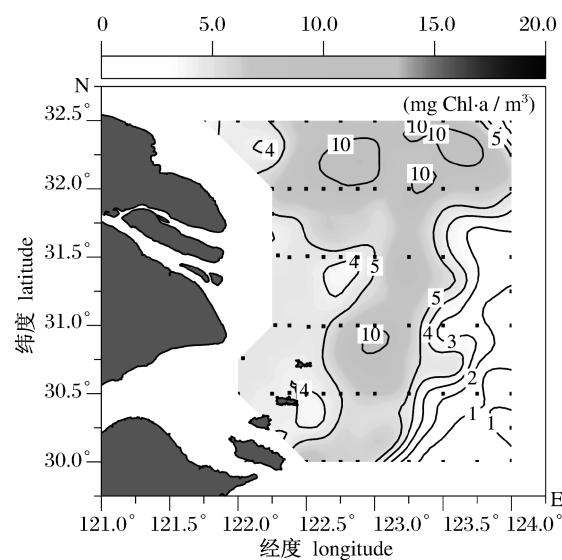


图 4b 2006 年 7 月 SeaWiFS 卫星遥感 Chl. a 等值线图
Fig. 4b Contours of monthly average Chl. a concentration of SeaWiFS, July 2006

转换生物量与悬浮物和温盐分布的关系

密切。浮游植物的生长还需要相对稳定的海洋环境,因此浮游植物生长还与水体稳定度有关。根据长江口外海区的温盐和悬浮物分布特征,其浮游植物生物量可大致划分为近河口区、冲淡水区、台湾暖流影响区和江苏外海 4 个特征分布区(图 3a)。鉴于细胞体积转换生物量更能从定量的角度说明海域的浮游植物生物量水平,因此以下主要讨论转换生物量与环境因子的关系。

转换生物量与悬浮物和温盐分布的关系
长江口门到 122.5°E 以及杭州湾口到舟山群岛海域是长江冲淡水的主要扩展区,表层(3 m 层)悬浮物浓度在 0.01 kg/m³ 以上(图 5),同时对应的是盐度小于 24(3 m 层,图 6),这一低盐低透明度海域是中肋骨条藻的丰度高值区,另一细胞丰度优势种菱形海线藻的分布主要位于 122.5°E 以东的相对高盐度、低浊度海域。近河口区呈现高温、低盐、高浊度和低生物量的特点(图 3a、图 7I 区)。

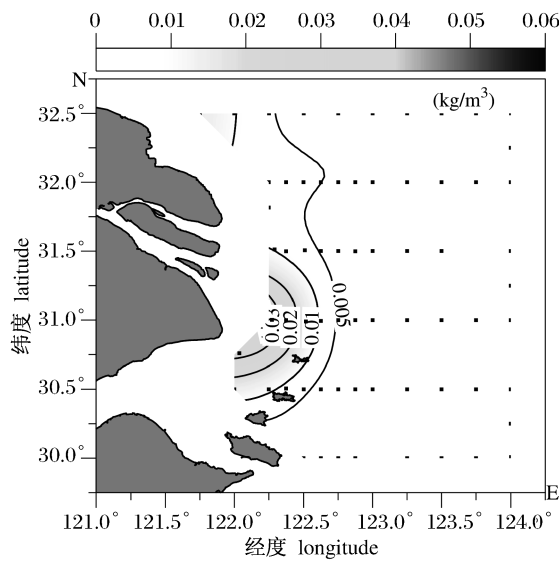


图5 表层(3 m)悬浮物浓度

Fig. 5 Distribution of SSC at the 3m layer

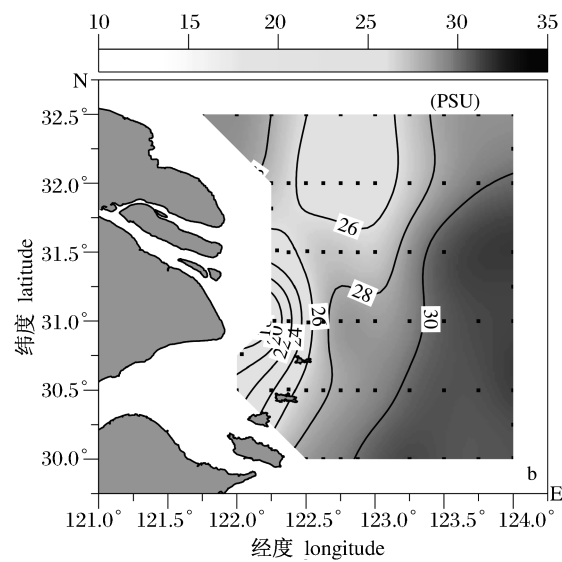


图6b 表层(3 m)盐度

Fig. 6b Distribution of salinity at the 3m layer

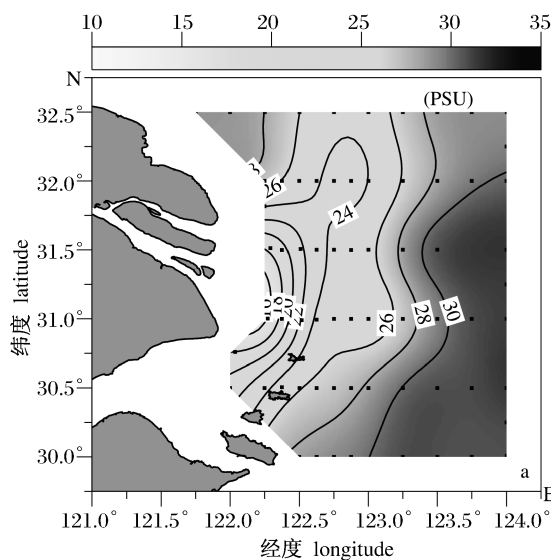


图6a 表层(1 m)盐度

Fig. 6a Distribution of salinity at the 1m layer

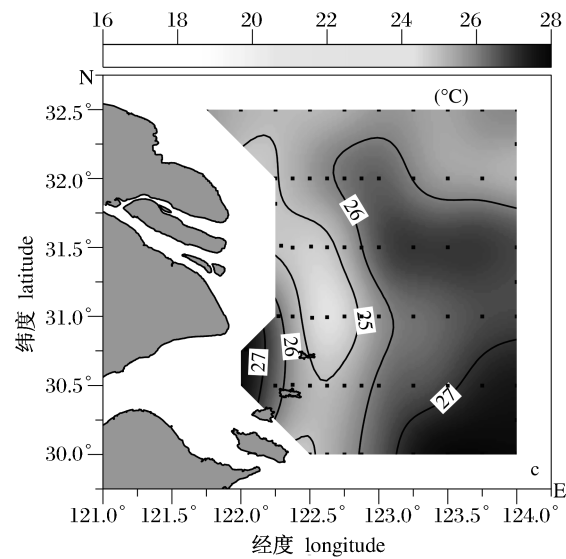


图6c 表层(3 m)温度

Fig. 6c Distribution of temperature at the 3m layer

夏季,长江冲淡水出口门后在夏季风场作用和陆架环流的诱导下,低盐水舌伸向东北,这种转向现象是夏季黄东海陆架一个突出的水文特征。本次调查所得的表层盐度分布显示了2006年7月冲淡水转向这一重要水文特征尤为明显(1 m层,图6a)。朱建荣等^[24]认为径流量偏小使自水下河谷入侵的台湾暖流与长江径流汇合形成的羽状锋更强大,有效阻碍冲淡水向东扩展,从而有利于长江冲淡水朝东北偏北方向扩展。2006年7月长江大通站的月平均径流量仅37 300 m³/s,远

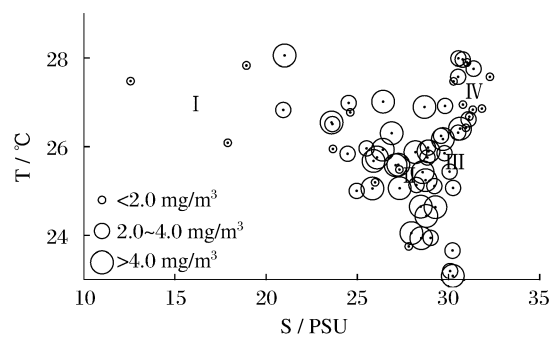


图7 3 m层 Chl. a 对应分布 S-T 图

Fig. 7 Chlorophyll-a vs. temperature-salinity diagram at the 3m layer

低于 1999 - 2006 年近 8 年的 7 月平均值 $49\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 。如图 6a 所示,表层 1 m 盐度为 24 低盐水舌扩展到了 32.0°N 以北海域。长江径流朝东北偏北方向扩展的趋势较强,对表层盐度和营养盐的分布有明显的影响。可以看到,大致在 1 m 层盐度为 26 的等盐线两侧或 3 m 层盐度为 28 的等盐线两侧的冲淡水区,细胞体积转换生物量最高(转换生物量大于 $4\ \text{mg}\ \text{Chl. a}/\text{m}^3$)。夏季陆地径流的水温较高,同时台湾暖流也具有高温高盐的特征,而 3 m 层温度分布显示长江口门和台湾暖流影响区之间存在一低温区(图 6b),较两侧的水温低 $1\sim 2\ ^\circ\text{C}$,另外江苏外海的水温也较低。以往的调查也发现,由于斜压效应、正压效应、底 Ekman 效应和倾斜的地形相互作用,夏季长江口外水下河谷西侧以及吕泗沿海均存在上升流^[25-26]。沿 31.0°N 断面分布的温盐和密度垂向剖面图也显示此处存在明显的等温线、等盐线和等密度线上翘现象。上升流把深层的冷水带到表层的同时也成为重要的营养盐补充机制。冲淡水区呈现相对低温、低盐、低浊度和高生物量的特征(图 3a、图 7 II 区)。

此外,江苏外海呈现浊度较高(大于 $0.05\ \text{kg}/\text{m}^3$),水温较低、盐度相对冲淡水扩展区较高的特点(图 3a、图 7 III 区),浮游植物的转换生物量低于冲淡水区,但高于河口区和台湾暖流影响区。台湾暖流影响区则呈现明显的高温、高盐、低浊度和低生物量的特征(图 3a、图 7 IV 区)。

由 64 个站点数据绘制的叶绿素 a 转换生物量对应 3 m 层的 S-T 图可知(图 7),转换生物量大于 $4.0\ \text{mg}\ \text{Chl. a}/\text{m}^3$ 的高值区盐度范围为 $26\sim 30$,水温范围约为 $24\sim 26.5\ ^\circ\text{C}$ 。对转换生物量大于 $4.0\ \text{mg}\ \text{Chl. a}/\text{m}^3$ 站点的统计结果表明,盐度平均值为 27.45 ,水温为 $25.66\ ^\circ\text{C}$ 。

营养盐限制分析 关于长江口外海区浮游植物生长限制因子的研究较多。杨东方等^[27]根据 1985 年 8 月至 1986 年 8 月调查资料的研究表明,在长江口及其附近海域磷并不是浮游植物生长的限制因子,仅靠氮磷比值来得到磷限制或氮限制的结论是不完善的。王保栋等^[28]根据 1998 年各个季节的调查资料分析后认为,硅不会成为黄海、东海浮游植物生长的限制因子,在南黄海南部尤其是西南部、东海近岸及长江口以东海域,一年四季均有过量无机氮存在,这部分海域中浮游

植物的生长很可能是受磷的限制,而不是受氮的限制。赵卫红等^[29]的研究表明,在长江河口冲淡水区磷是浮游植物生长的显著潜在限制因子,离岸较远的远河口氮是潜在限制因子,中间海域是磷和氮潜在限制过渡区,且 Si 和 Fe 不是潜在限制因子。长江口外海域的营养盐主要来源于长江径流的陆源负荷,因此其水平分布主要受长江径流的影响^[30]。当然,台湾暖流和苏北沿岸流对其分布也有较大的影响。蒲新明等^[31-32]研究了长江口区浮游植物春秋两季的营养限制因子,加富实验证实了冲淡水区存在磷的限制,并认为可将长江口外海区划分为近河口区、冲淡水区、台湾暖流影响区和黄海沿岸流影响区。

一般地,在氮营养盐中,浮游植物优先选择吸收 $\text{NH}_3\text{-N}$,其表层现存量分布呈现明显的区域性(图 8a):因低盐、高浊度(低光照)区的硝化作用强烈^[33],近河口区 $\text{NH}_3\text{-N}$ 最低,冲淡水区较低,台湾暖流影响区较高,江苏外海最高。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量在台湾暖流影响区较小(图 8b),局部海域小于 $1.0\ \text{mmol}/\text{m}^3$,显示长江口海域的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及其新生产力主要来源于长江径流的陆源输入,但由于 $\text{NO}_3\text{-N} < 5.0\ \text{mmol}/\text{m}^3$ 的海域 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度普遍大于 $6.5\ \text{mmol}/\text{m}^3$,因此调查海域不会有氮营养盐的限制。P 的浓度在近河口区最高,冲淡水区向海一侧最低(图 8c),小于 $0.1\ \text{mmol}/\text{m}^3$,呈现明显的磷限制,磷营养盐短缺限制了高生物量区向东扩展。对比营养盐分布可以发现,细胞体积转换生物量的水平分布与细胞丰度水平分布相比,与营养盐的现存量具有更好的对应,即 $\text{NH}_3\text{-N}$ (河口区除外)和 P 现存量的低水平区对应高转换生物量区。TIN/P 的结果显示(图 8d),冲淡水区相对生物量高值区磷的消耗很大,氮磷比高达 500,存在明显的磷限制。Si 与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度呈现类似的分布规律(图 8e),即陆源输入、西高东低的特征,台湾暖流影响区部分海域低于 $1.0\ \text{mmol}/\text{m}^3$,成为硅藻类的潜在生长限制因子,此处硅藻类的转换生物量低于 $2\ \text{mg}\ \text{Chl. a}/\text{m}^3$ (图 3b),而甲藻类的转换生物量达到 $0.4\sim 1.1\ \text{mg}\ \text{Chl. a}/\text{m}^3$ 左右的水平(图 3c)。

2003 年 6 月三峡工程蓄水后,长江口的营养盐分布发生了较多变化。Si:N 比从 2002 年的 2.7 降低至 2006 年的 1.3, TN:TP 则从 22.1 上升至 80.3。2003 年后,浮游植物生长 P 营养盐的潜在限制区范围扩大,主要出现在盐度小于 30 的海

域,且在 2005 年和 2006 年开始在盐度大于 30 的海域出现潜在的 Si 限制^[34]。从长江口外海区甲藻赤潮多发的趋势来看, Si 营养盐的含量减少可能导致硅藻比重的降低。ZHOU 等^[35]调查显示,长江口外海区浮游植物种群中,硅藻的比例从 1984 年的 85% 下降到了 2000 年 60%, WANG^[36]研究认为,甲藻类的东海(具齿)原甲藻可以忍受低营养盐环境并种群增长,而硅藻类的中肋骨条藻细胞增长需要较丰富的营养盐。可见在营养盐相对低的海域叶绿素 a 的浓度主要由甲藻类浮游植物贡献。

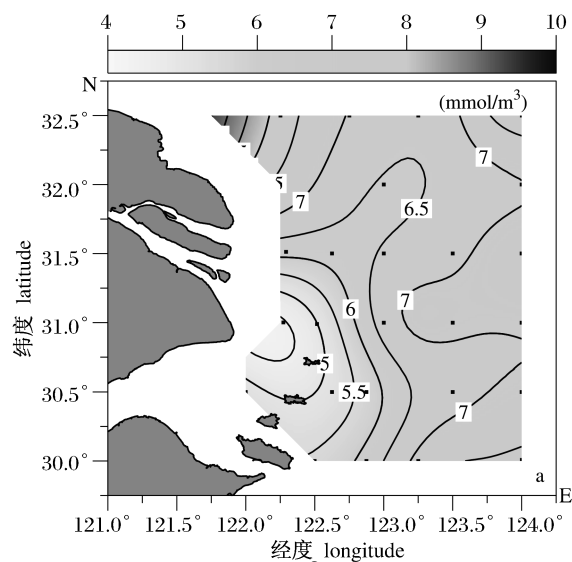


图 8a 表层 NH_3 浓度分布

Fig. 8a Distribution of NH_3 at the surface

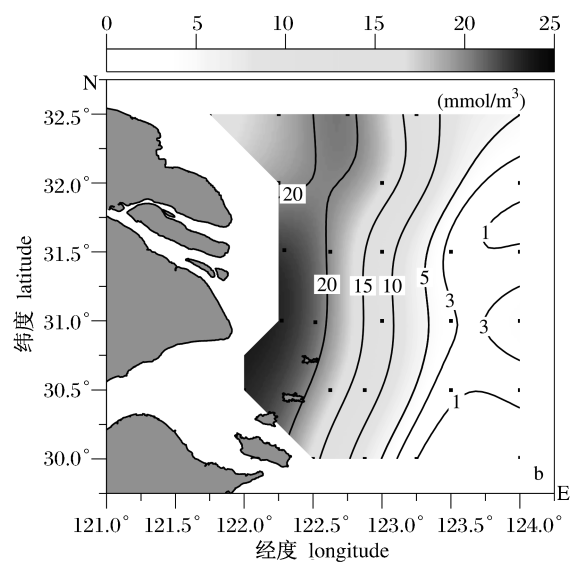


图 8b 表层 NO_3 浓度分布

Fig. 8b Distribution of NO_3 at the surface

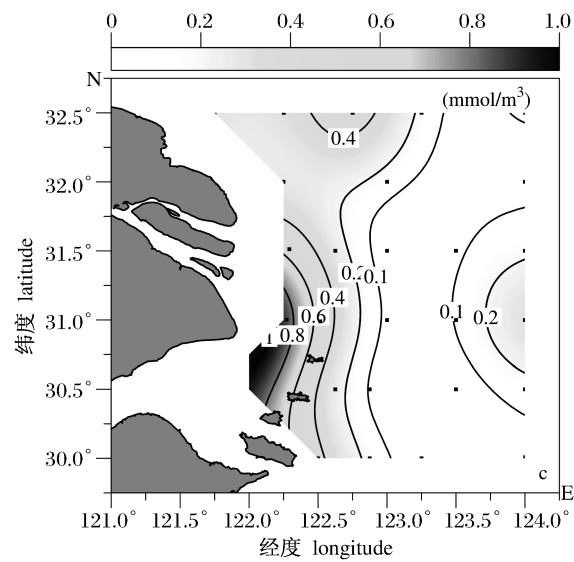


图 8c 表层 P 浓度分布

Fig. 8c Distribution of P at the surface

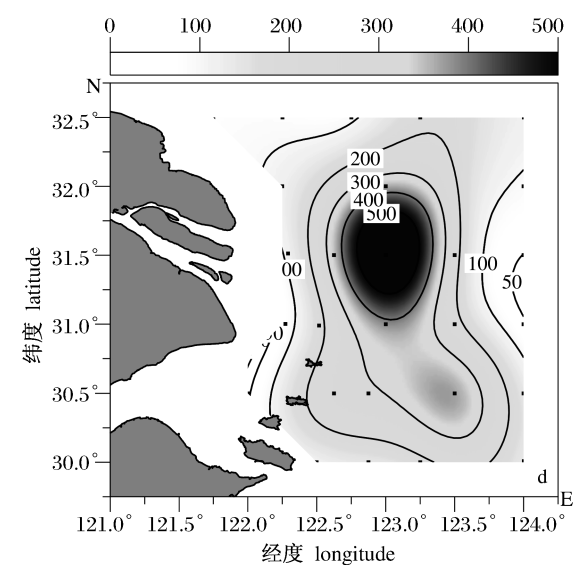


图 8d 表层 TIN/P 分布

Fig. 8d Distribution of TIN/P at the surface

水体稳定性与生物量的关系 由式(2)计算所得的 PEAP 在调查海域内平均值为 135.4 J/m^3 , 范围 $37.4 \sim 252.5 \text{ J/m}^3$ (图 9), 表明夏季长江口外海域具有较高的水体稳定性, 尤其在冲淡水扩展区和台湾暖流区水体层化强烈 ($\text{PEAP} > 150.0 \text{ J/m}^3$), 近河口区和江苏外海水深一般 $< 20 \text{ m}$, 水体混合较好, 层化较弱 ($\text{PEAP} < 100.0 \text{ J/m}^3$)。

为分析水体稳定性与浮游植物生物量的关系, 以沿 31.0°N 断面的水体稳定性和浮游植物生物量为例来探讨。沿 31.0°N 断面的温盐、密

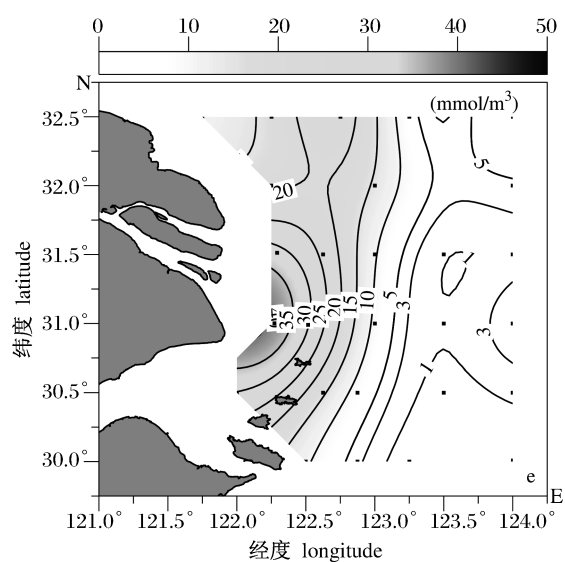


图 8e 表层 Si 浓度分布

Fig. 8e Distribution of Si at the surface

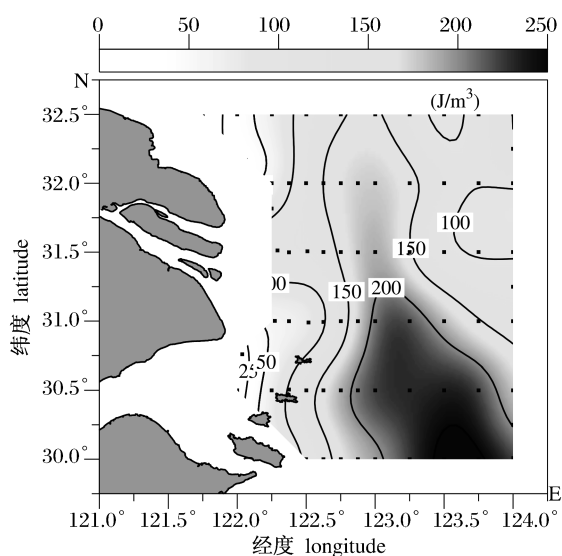


图 9 势能异常系数平面分布

图 9 Distribution of PEAP

度、悬浮物浓度的垂向分布表明(图 10a, b, c, d), 122.5°E 以西的近河口区垂向混合较好, 呈现明显的低盐、高温、低密度、高浊度的特征, 约 15 m 深度处存在温盐、密度和浊度的锋面, 等温线、等盐线和等密度线倾斜分布。近河口区营养盐虽然丰富, 但浊度高、层化较弱, 因此此处的浮游植物生物量较低。122.75°E (49 号站点) 与 123.5°E (53 号站点) 之间的冲淡水扩展区水体层化最为强烈, 且浊度相对低, 来自长江径流营养盐补充相对丰富, 因此, 此处也是相对的高生物量区。123.5°E 以东海域层化减弱, 且此海域受营养盐限制, 浮游植物生物量相对较低(图 11a)。对沿

31.0°N 的 11 个站点的 *Chla*. 浓度和 PEAP 进行相关分析(SPSS 16.0 中进行), 结果显示两者具有一定的线性相关性($r=0.3023$, 图 11b)。

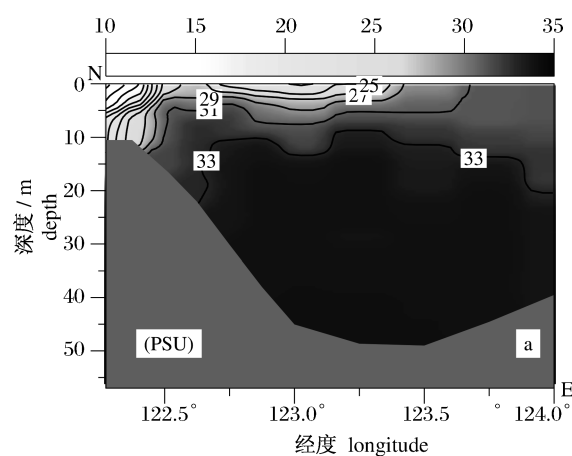


图 10a 31.0°N 断面盐度分布

Fig. 10a Vertical profile of salinity along 31.0°N

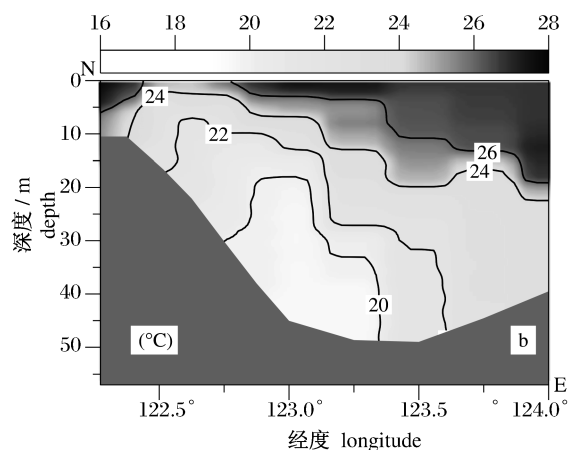


图 10b 31.0°N 断面温度分布

Fig. 10b Vertical profile of temperature along 31.0°N

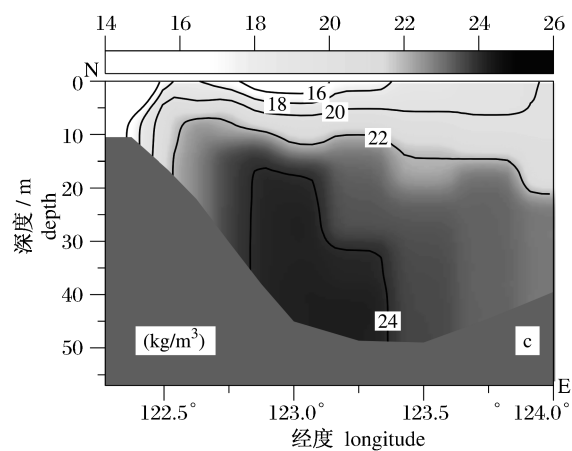


图 10c 31.0°N 断面密度分布

Fig. 10c Vertical profile of density along 31.0°N

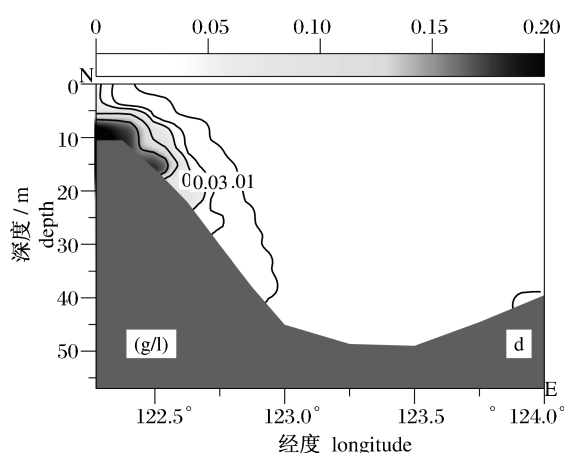


图 10d 31.0°N 断面悬浮物分布

Fig. 10d Vertical profile of SSC along 31.0°N

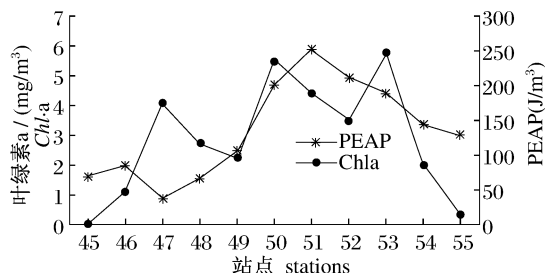


图 11a Chl. a 浓度与 PEAP 沿 31.0°N 各站点分布

Fig. 11a Distribution of Chla and PEAP of stations along 31.0°N

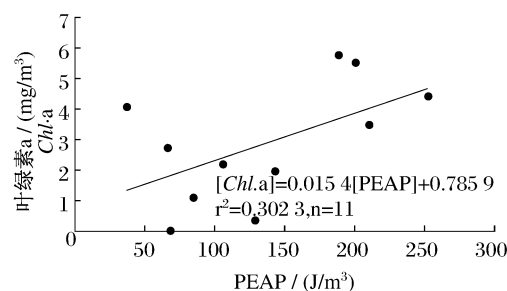


图 11b 沿 31.0°N 各站点 Chl. a 浓度与 PEAP 相关分析

Fig. 11b Relationship between Chl. a and PEAP along 31.0°N

3.2 浮游植物生物量(叶绿素 a)与以往研究结果的对比

本研究与文献中长江口附近海域夏季的叶绿素 a 浓度资料对比结果显示(表 2), 本研究所用细胞体积转换生物量法所得的浮游植物生物量与多采用荧光法的文献相比, 均值和叶绿素 a 浓度范围较为接近, 基本合理。当然, 由于采样、样品处理(种类鉴定和计数)条件限制, 本文仅对表层 3 m 处进行了水样采集, 未能进行分层采样, 无法对长江口外海区的浮游植物分布特征给出全面的分析, 且难以避免对小型、出现频率低的浮游植物存在漏检的情况。本研究中所得 8 种浮游植物优势种占已检出浮游植物总丰度的比例为 97.35%, 转换生物量占总量的比例为 97.09% (表 1)。

表 2 长江口附近海域夏季叶绿素 a 浓度资料对比

Tab. 2 Data comparison of Chlorophyll-a concentration off the Changjiang Estuary in summer

编号 no.	区域 area	调查时间 time	叶绿素 a (mg/m ³) 均值(范围)	方法 way	文献 reference
1	长江口外海	2006-07	4.41 (0.02 ~ 34.08)	转换生物量 conversion biomass	本研究 this paper
2	南黄海	2006-07 ~ 08	1.42 (0.07 ~ 12.17)	荧光法 fluorimetry	[37]
3	长江口、济州岛临近海域	1989-06 ~ 07	(0.2 ~ 18.7)	荧光法 fluorimetry	[38]
4	长江口及其外海	2005-09	1.39 (0.21 ~ 3.01)	荧光法 fluorimetry	[39]
5	长江口临近海域	2002-08	3.941 (0.103 ~ 24.205)	荧光法 fluorimetry	[40]
6	长江口外海域	2004-08 ~ 09	1.70 (0.48 ~ 4.89)	荧光法 fluorimetry	[41]

3.3 浮游植物生物量与种群及粒径的关系

本次调查所得 8 个丰度或转换生物量优势种中, 除菱形海线藻和中肋骨条藻外, 其它转换生物量优势种的等效球径均大于 20.00 μm (表 1), 甲

藻类的等效球径普遍较大。浮游植物的细胞粒径对生长速率、光合作用速率、呼吸作用、细胞中的物质含量、细胞的运动能力以及浮游植物在生态系统中的地位有诸多影响, 而影响浮游植物粒度的

因素除环境因素外,还有浮游植物本身的生命周期及化学污染物等诸多因素^[42]。浮游植物细胞体积(粒径)的测量精度直接决定了其转换生物量的大小。每一种浮游植物细胞的几何构造、体积大小、生理特征和物质含量都是有差异,浮游植物细胞体积转化法具有把生物量测定精确到种的优点,这种优点需要建立在对每一种浮游植物,特别是优势种类的大量体积(粒径)和生物化学测定的基础之上。用相同的公式来估算不同浮游植物种类的细胞体积转化生物量将或多或少存在高估或低估生物量的情况。对不同种群或不同粒径范围的浮游植物采用不同的细胞体积转换生物量计算公式有助于提高转换生物量的计算精度。

4 讨论和结论

(1) 调查显示,2006年7月长江口外海区浮游植物细胞丰度优势种为硅藻类的菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)和中肋骨条藻(*keletonema costatum*);叶绿素 a 转换生物量优势种为硅藻类的琼氏圆筛藻(*Coscinodiscus jonesianus*)、辐射圆筛藻(*Coscinodiscus radiatus Ehrenberg*)和菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*),甲藻类的锥多甲藻(*Peridinium conicum*)、纺锤角藻(*Ceratium fusus*)、三角角藻(*Ceratium tripos*)和分叉角甲藻(*Ceratium furca*)。

(2) 长江口外海区夏季的浮游植物转换生物量在冲淡水区最高(相对低温、低盐、低浊度),江苏外海居中(浊度较高,水温较低、盐度相对较高),而近河口区(高温、低盐、高浊度)和台湾暖流区(高温、高盐、低浊度)最低。转换生物量大于 $4.0 \text{ mg Chl. a/m}^3$ 的高值区位于冲淡水区(3 m 层)盐度为 28.0 的等值线两侧,且处于 NH₃-N 和 P 的低值区。

(3) 悬浮物浓度、温盐、水体稳定性和营养盐是影响长江口外海域浮游植物分布的主要环境因子。在本次调查期间长江口外海不存在氮营养盐限制,冲淡水区存在明显的 P 营养盐限制,台湾暖流区存在潜在的 Si 营养盐限制。

(4) 用浮游植物细胞体积转换生物量与浮游植物细胞丰度计数来表示浮游植物现存量有很大差别,且优势种种类及其优势度均不同。浮游植物细胞体积估算浮游植物细胞生物量是研究浮游

植物现存量的一个可行的方法,用来表示浮游植物现存量是相对合理的。由于细胞个体体积及其所含叶绿素 a、碳、氮元素含量的差异,细胞体积转换生物法还存在高估或低估生物量的问题,需要有更多相关的生物化学研究成果作为支撑。

(5) 浮游植物细胞体积转换生物量不仅能较客观地反映浮游植物的生物量,为研究海洋生态动力学提供基础资料,同时可以在物种水平上对海洋生态系统中浮游植物的物质构成进行研究,为进一步了解生态系统的物质循环和能量流动奠定基础,为海洋环境的保护和海洋生物资源的可持续利用提供科学依据。

感谢中国海洋大学孙军博士提供细胞体积转化法的 EXCEL 宏程序;感谢华东师范大学何青教授、王元叶同学协助现场取样调查;感谢上海海洋大学王丽卿教授在浮游植物种类鉴定时给予的帮助;感谢第一海洋地质调查大队勘 407 测量船所有船员的辛勤劳动,特致谢忱。

参考文献:

- [1] 陈昱,施曼丽,映冈,等. 长江三峡生态与环境地图集[A]. 北京:科学出版社,1989:157.
- [2] ZHNAG J, ZHNAG Z F, LIU S M, *et al.* Human impacts on the large world rivers: Would the Changjiang(Yangtze River) be an illustration? [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13: 1099-1105.
- [3] 朱建荣,丁平兴,胡敦欣. 2000年8月长江口外海区冲淡水和羽状锋的观测[J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(3):249-255.
- [4] 朱建荣. 长江口外海区叶绿素 a 浓度分布及其动力成因分析[J]. *中国科学 D 辑(地球科学)*, 2004, 34(8):757-762.
- [5] 孙军,刘东艳,钟华,等. 浮游植物粒级研究方法的比较[J]. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(6): 917-924.
- [6] 孙军,刘东艳,钱树本. 浮游植物生物量研究?. 浮游植物生物量细胞体积转化法[J]. *海洋学报*, 1999, 21(2):75-85.
- [7] SUN J, LIU D Y. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton [J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25(11): 1331-1346.
- [8] MULLIN M M, SLOZN P R, EPPLEY R W. Relationship between carbon content, cell volume,

- and area in phytoplankton [J]. *Limnol Oceanogr*, 1966, 11(2):307-311.
- [9] STRATHMAN R R. Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume [J]. *Limnol Oceanogr*, 1967, 12(3):411-418.
- [10] EPPLEY R W, REID F M H, STRICKLAND J D H. Estimates of phytoplankton crop size, growth rate and primary production [C] // Strickland J D H, (Ed) *The ecology of the plankton off La Jolla, California, in the period April Through September 1967*, Bull Scripps Inst Oceanogr, 1970, 17:33-42.
- [11] MOAL J V, MARTIN-JEZEQUAL R P, HARRIS J F, *et al.* Interspecific and intra-specific variability of the chemical composition of marine phytoplankton [J]. *Oceanol Acta*, 1997, 10:339-346.
- [12] VERITY P G. Relationships between cell volume and carbon and nitrogen of marine photosynthetic nanoplankton [J]. *Limnol Oceanogr*, 1993, 37(6):1434-1446.
- [13] DAVID J S, MONTAGNES J A, BERGES P J, *et al.* Estimating carbon, nitrogen, protein, and chlorophyll a from volume in marine phytoplankton [J]. *Limnol Oceanogr*, 1995, 39(5):1044-1060, 1994.
- [14] 沈国英, 施并章. 海洋生态学 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1990: 90-91.
- [15] SHI J Z, LU L F. A short note on the dispersion, mixing, stratification and circulation within the plume of the partially-mixed Changjiang River Estuary, China [J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2010.
- [16] MAAR M, TIMMERMAN K, PETERSEN J K, *et al.* A model study of the regulation of blue mussels by nutrient loadings and water column stability in a shallow estuary, the Limfjorden [J]. *Journal of Sea Research*, 2010.
- [17] MARRET F, SCOURSE J. Control of modern dinoflagellate cyst distribution in the Irish and Celtic seas by seasonal stratification dynamics [J]. *Marine Micropaleontology*, 2002, 47:101-116.
- [18] SIMPSON J H, BOWERS D. Models of stratification and frontal movement in the shelf seas [J]. *Deep-Sea Res*, 1981, 28:727-738.
- [19] 柳丽华, 左涛. 2004 年秋季长江口海域浮游植物的群落结构和多样性 [J]. *海洋水产研究*, 2007, 28(3):112-119.
- [20] 栾青杉, 孙军. 2004 年秋季长江口及其邻近水域浮游植物群集 [J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(3):364-371.
- [21] 赵冉, 白洁, 孙军, 等. 2006 年夏季长江口及其邻近水域浮游植物群集 [J]. *海洋湖沼通报*, 2009(2):88-96.
- [22] 厦门水产学院主编. 海洋浮游生物学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1981:16-34.
- [23] 孙军. 海洋浮游植物细胞体积和表面积模型及其转换生物量 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [24] 朱建荣, 丁平兴, 胡敦欣. 2000 年 8 月长江口外海区冲淡水羽状锋的观测 [J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(3):249-255.
- [25] 朱建荣. 夏季长江口外水下河谷西侧上升流产生的动力机制 [J]. *科学通报*, 2003, 48(23):2488-2492.
- [26] 朱建荣, 戚定满, 吴辉. 吕泗上升流观测和动力机制模拟分析 [J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2004(2):87-91.
- [27] 杨东方, 王凡, 高振会等. 长江口理化因子影响初级生产力的探索 II. 磷不是长江口浮游植物生长的限制因子春季营养限制情况 [J]. *海洋科学进展*, 2006, 24(1):97-107.
- [28] 王保栋, 战闰, 藏家业. 黄海、东海浮游植物生长的营养盐限制性因素初探 [J]. *海洋学报*, 2003, 25(supp.2):190-195.
- [29] 赵卫红, 李金涛, 王江涛. 夏季长江口海域浮游植物营养限制的现场研究 [J]. *海洋环境科学*, 2004, 23(4):1-5.
- [30] 吴玉霖, 傅月娜, 张永山等. 长江口海域浮游植物分布及其与径流的关系 [J]. *海洋与湖沼*, 2004, 35(3):246-251.
- [31] 蒲新明, 吴玉霖, 张永山. 长江口区浮游植物营养盐限制因子的研究. 秋季的营养限制情况 [J]. *海洋学报*, 2000, 22(4):60-66.
- [32] 蒲新明, 吴玉霖, 张永山. 长江口区浮游植物营养盐限制因子的研究. 春季营养限制情况 [J]. *海洋学报*, 2001, 23(3):58-65.
- [33] ZHENG L Y, CHEN C S, ZHANG F Y. Development of water quality model in the Satilla River Estuary, Georgia [J]. *Ecological Modelling*, 2004, 178:457-482.
- [34] CHAO C, YU Z M, SHEN Z L, *et al.* Nutrient characteristics in the Yangtze River Estuary and the adjacent East China Sea before and after impoundment of the Three Gorges Dam [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407:4687-4695.
- [35] ZHOU M J, SHEN Z L, YU R C. Responses of a coastal phytoplankton community to increased

- nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 1483 - 1489.
- [36] WANG Z L, LI R X, ZHU M Y, *et al.* Study on population growth processes and interspecific competition of *prorocentrum donghaiense* and *skeletonema costatum* in semi-continuous dilution experiments [J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(4) : 495 - 503.
- [37] 傅明珠, 王宗灵, 孙萍, 等. 2006 年夏季南黄海浮游植物叶绿素 a 分布特征及其环境调控机制 [J]. *生态学报*, 2009, 29(10) : 5366 - 5375.
- [38] 柴心玉, 钱树本, 张庆. 长江口及济州岛邻近海域叶绿素 a 分布及其与水团、跃层的相关性 [J]. *青岛海洋大学学报*, 1991, 21(2) : 69 - 82.
- [39] 宋书群, 孙军, 俞志明. 长江口及其邻近水域叶绿素 a 垂直格局及成因初析 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(2) : 369 - 379.
- [40] 周伟华, 袁翔城, 霍文毅, 等. 长江口邻域叶绿素 a 和初级生产力的分布 [J]. *海洋学报*, 2004, 26(3) : 143 - 150.
- [41] 宋书群, 孙军, 沈志良, 等. 三峡库区蓄水后夏季长江口及其邻近水域粒级叶绿素 a [J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(Sup.) : 114 - 112.
- [42] 杨茹君, 王修林, 辛宇, 等. 海洋浮游植物粒度生理的效应及其影响因素 [J]. *海洋科学*, 2005, 29(6) : 53 - 59.

Distribution of phytoplankton biomass and its relationships with the environmental factors off the Changjiang (Yangtze River) Estuary

LIN Jun^{1,2}, ZHU Jian-rong^{1*}, ZHANG Jing¹, WU Hui¹, LUO Wen-jun²

(1. State Key Lab of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The distribution characteristics of dominant phytoplankton species and their cell abundance and cell volume conversion biomass off the Changjiang Estuary were analyzed based on a comprehensive survey conducted at 67 stations during July, 2006. The cell abundance of Diatom was dominant, which mostly consists of *Thalassionema nitzschioides* and *Skeletonema costatum*. The cell abundance ranged from 1.42×10^6 to 448.25×10^6 cell/m³ and the average value was 90.47×10^6 cell/m³ for all of the stations. Phytoplankton conversion biomass of Chlorophyll-a was calculated by cell volume measurement. The average Chlorophyll-a biomass was 4.41 mg *Chl. a*/m³, with a range from 0.02 to 34.08 mg *Chl. a*/m³. Based on conversion biomass, dominant diatoms were *Coscinodiscus jonesianus*, *Coscinodiscus radiatus Ehrenberg* and *Thalassionema nitzschioides*, and dominant dinoflagellates were *Peridinium conicum*, *Ceratium fusus*, *Ceratium tripos* and *Ceratium furca*. The trend and magnitude of the conversion biomass distribution were similar to those of the Chlorophyll-a distribution of SeaWiFS monthly ocean color data. This area could be divided into 4 parts according to phytoplankton conversion biomass; the dilute plume area is the highest biomass area; the estuary area and Taiwan Warm Current area are the lowest biomass areas; and the area off Jiangsu Coast current area is the middle biomass area. The area of conversion biomass more than 4.0 mg *Chl. a*/m³ corresponded well to the salinity contour 28.0 adjacent to the area of Changjiang river plume and areas with low NH₃-N and P.

Key words: phytoplankton; biomass; cell volume conversion; environmental factors; Changjiang Estuary

Corresponding author: ZHU Jian-rong. E-mail: jrzh@sklec.ecnu.edu.cn