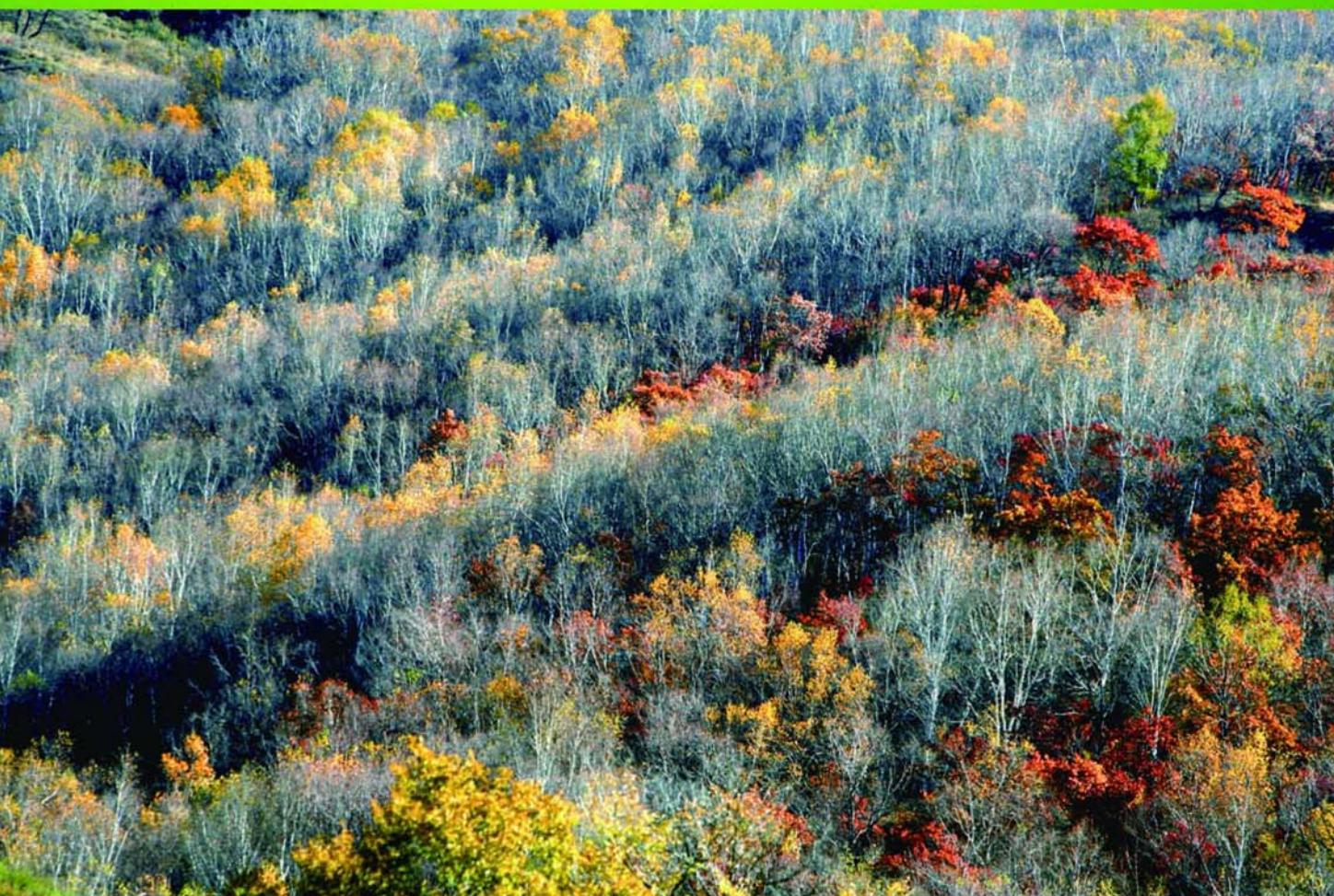


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第16期 Vol.31 No.16 2011

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报 (SHENTAI XUEBAO)

第31卷 第16期 2011年8月 (半月刊)

目 次

人工和天然湿地芦苇根际土壤细菌群落结构多样性的比较	汪仲琼,王为东,祝贵兵,等 (4489)
不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟	郎 莹,张光灿,张征坤,等 (4499)
不同颜色遮阳网遮光对丘陵茶园夏秋茶和春茶产量及主要生化成分的影响	秦志敏,付晓青,肖润林,等 (4509)
辐射迫对烟草叶激素水平、光合特性、荧光特性的影响	吴 坤,吴中红,邹付菊,等 (4517)
条浒苔和缘管浒苔对辐射迫的生理响应比较	蒋和平,郑青松,朱 明,等 (4525)
盐胁迫对拟南芥和盐芥莲座叶芥子油苷含量的影响	庞秋颖,陈思学,于 涛,等 (4534)
长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响	高菊生,曹卫东,李冬初,等 (4542)
基于水量平衡下灌区农田系统中氮素迁移及平衡的分析	杜 军,杨培岭,李云开,等 (4549)
苏北海滨湿地互花米草种子特征及实生苗生长	徐伟伟,王国祥,刘金娥,等 (4560)
基于AnnAGNPS模型的三峡库区秭归县非点源污染输出评价	田耀武,黄志霖,肖文发 (4568)
镉污染对不同生境拟水狼蛛氧化酶和金属硫蛋白应激的影响	张征田,庞振凌,夏 敏,等 (4579)
印度洋南赤道流区水体叶绿素a的分布及粒级结构	周亚东,王春生,王小谷,等 (4586)
长江口滩涂围垦后水鸟群落结构的变化——以南汇东滩为例	张 斌,袁 晓,裴恩乐,等 (4599)
应用鱼类完整性指数(FAII)评价长江口沿岸碎波带健康状况	毛成贵,钟俊生,蒋日进,等 (4609)
基于渔业调查的南极半岛北部水域南极磷虾种群年龄结构分析	朱国平,吴 强,冯春雷,等 (4620)
水稻模型ORYZA2000在湖南双季稻区的验证与适应性评价	莫志鸿,冯利平,邹海平,等 (4628)
旱地农田不同耕作系统的能量/碳平衡	王小彬,王 燕,代 快,等 (4638)
宁夏黄灌区稻田冬春休闲期硝态氮淋失量	王永生,杨世琦 (4653)
太湖沉积物有机碳与氮的来源	倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等 (4661)
日偏食对乌鲁木齐空气可培养细菌群落的影响	马 晶,孙 建,张 涛,等 (4671)
灰飞虱与褐飞虱种内和种间密度效应比较	吕 进,曹婷婷,王丽萍,等 (4680)
圈养马来熊行为节律和时间分配的季节变化	兰存子,刘振生,王爱善,等 (4689)
塔里木荒漠河岸林干扰状况与林隙特征	韩 路,王海珍,陈加利,等 (4699)
珍稀植物伯乐树一年生更新幼苗的死亡原因和保育策略	乔 琦,秦新生,邢福武,等 (4709)
垃圾堆肥复合菌剂对干旱胁迫下草坪植物生理生态特性的影响	多立安,王晶晶,赵树兰 (4717)
CLM3.0-DGVM中植物叶面积指数与气候因子的时空关系	邵 璞,曾晓东 (4725)
基于生态效率的辽宁省循环经济分析	韩瑞玲,佟连军,宋亚楠 (4732)
专论与综述	
土壤食物网中的真菌/细菌比率及测定方法	曹志平,李德鹏,韩雪梅 (4741)
生态社区评价指标体系研究进展	周传斌,戴 欣,王如松,等 (4749)
问题讨论	
不同胁迫条件下化感与非化感水稻PAL多基因家族的差异表达	方长旬,王清水,余 彦,等 (4760)
研究简报	
钦州湾大型底栖动物生态学研究	王 迪,陈丕茂,马 媛 (4768)
人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征	董凯凯,王 惠,杨丽原,等 (4778)
基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析	刘晓梅,布仁仓,邓华卫,等 (4783)
晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究	隋旭红,张建军,文万荣 (4791)
小兴安岭典型苔草和灌木沼泽N ₂ O排放及影响因子	石兰英,牟长城,田新民,等 (4799)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-08



封面图说: 在长白山麓低海拔地区的晚秋季节,成片的白桦林用无数根白色的树干、树枝烘托着林冠上跳动的金黄色叶片,共生的柞木树冠用更浓重的颜色显示了它的存在,整个山梁层林尽染,秋意浓浓。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

周亚东, 王春生, 王小谷, 刘镇盛, 卢勇, 刘晓辉. 印度洋南赤道流区水体叶绿素 a 的分布及粒级结构. 生态学报, 2011, 31(16): 4586-4598.
Zhou Y D, Wang C S, Wang X G, Liu Z S, Lu Y, Liu X H. The distribution of size-fractionated chlorophyll a in the Indian Ocean South Equatorial Current. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16): 4586-4598.

印度洋南赤道流区水体叶绿素 a 的分布及粒级结构

周亚东^{1,2}, 王春生^{1,2,*}, 王小谷^{1,2}, 刘镇盛^{1,2}, 卢勇^{1,2}, 刘晓辉^{1,3}

(1. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012; 2. 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 杭州 310012;
3. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012)

摘要: 根据 2010 年 4—5 月印度洋南赤道流区的综合环境调查资料, 对印度洋南赤道流区叶绿素 a 浓度分布和浮游植物的粒级结构等进行了分析。结果表明, 调查海区水体层化明显, 表层水温较高, 营养盐浓度较低。调查海区东部测站的数据显示该区域可能受到来自印度尼西亚贯穿流和南爪哇流的影响, 有高温低盐的特点。叶绿素 a 浓度在该海区的分布具有以下特点:(1) 表层叶绿素 a 浓度在整个调查海区虽然普遍较低(平均为 $(0.122 \pm 0.052) \text{ mg/m}^3$), 但具有明显的空间区域化特征: 印度洋南赤道流区中部, 叶绿素 a 浓度较低, 站位间分布均匀; 东部叶绿素 a 浓度相对较高, 不同测站叶绿素 a 浓度差异明显。(2) 整个调查区域叶绿素 a 浓度垂直分布具有明显的单峰结构, 其最大值分布在 60—80m 水层, 位于营养盐跃层内。(3) 叶绿素 a 的粒级结构分析结果显示, pico 级份的浮游植物对叶绿素 a 的贡献占主导地位, 平均为 75%, nano 级份的贡献平均为 20%, net 级份对叶绿素 a 的贡献最小, 平均仅有 5%。对比调查和在其它海区的研究, 表明印度洋南赤道流区属于典型的低纬度寡营养海区, 低的营养盐浓度(特别是 NO_3^- 浓度)是该海区浮游植物生长的主要限制因素之一。

关键词: 叶绿素 a; 粒级结构; 印度洋南赤道流区; 寡营养

The distribution of size-fractionated chlorophyll a in the Indian Ocean South Equatorial Current

ZHOU Yadong^{1,2}, WANG Chunsheng^{1,2,*}, WANG Xiaogu^{1,2}, LIU Zhensheng^{1,2}, LU Yong^{1,2}, LIU Xiaohui^{1,3}

1 The Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China

2 Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, SOA, Hangzhou 310012, China

3 State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Hangzhou 310012, China

Abstract: An investigation of the distribution and size composition of chlorophyll a concentration ($>20 \mu\text{m}$, $2-20 \mu\text{m}$, $0.2-2 \mu\text{m}$) was carried out from April to May 2010 in the South Equatorial Current (SEC) region ($10^{\circ}59' - 14^{\circ}6'S$, $80^{\circ}00' - 113^{\circ}3'E$) of the Indian Ocean. The survey was carried out during the inter-monsoon, which is characterized by weak vertical mixing and low upwelling. The objective of this study was to investigate the spatial distribution and size fraction of chlorophyll a concentration and to relate this to environmental factors. 9 stations were surveyed and water samples were collected from 17 layers in 0—200 m water column of each station. A total of 9 profiles of size-fractionated chlorophyll a, nutrients (NO_3^- , PO_4^{3-} and SiO_3^{2-}), temperature and salinity were obtained. According to the location of the stations, the whole survey region was divided into two subregions, CIO (Central Indian Ocean) survey region and EIO (Eastern Indian Ocean) survey region. Results showed that the water column of the survey area is well stratified and the mixed layer was about 50 m throughout the region. The surface water was characterized by high temperature and low concentrations of nutrients. The eastern part of the EIO region was influenced by the intrusion of the Indonesian Throughflow and the South

基金项目: 中国大洋矿产资源研究开发协会专项基金(DYXM-115-01-3-01, DYXM-115-01-3-02); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(JG1024)

收稿日期: 2010-08-24; 修订日期: 2011-02-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxiao@ sio. org. cn

Java Current, which has high temperature and low salinity. Three characteristics of the chlorophyll a distribution were revealed: (1) Low chlorophyll a concentration of surface water was widespread in the region ($0.122 \pm 0.052 \text{ mg/m}^3$ on average), but spatial pattern was also observed. The chlorophyll a concentration in the CIO survey region was uniformly low; however, relatively higher chlorophyll a concentration and higher inter-station variation was observed in the EIO survey region. (2) A subsurface chlorophyll a maximum layer occurred between 60 and 80 m, which coincided with the nutricline. (3) The 0.2—2 μm chlorophyll a always dominated and represented 75% of the total chlorophyll a on average, while the average contribution of 2—20 μm and >20 μm chlorophyll a to total chlorophyll a concentration were 20% and 5%, respectively. It was suggested that the phytoplankton community in this area was predominated by picoplankton.

Factors affecting the distribution of phytoplankton were discussed. The low chlorophyll a concentration in surface water can be attributed to the low concentrations of nutrients in upper layers, which were less than or close to the half-saturation constants (K_s values) for nutrients uptake of phytoplankton in oligotrophic seas. Chlorophyll a concentration increased rapidly in response to the increasing nutrient concentrations in the nutricline. The dominance of picoplankton was also resulted from the low nutrients concentration because picoplankton were more competent over the netplankton and nanoplankton under oligotrophic condition. Our results indicated that hydrological structure could affect phytoplankton via exerting influence over nutrients distribution.

Based on the comparison between the present research and studies in other oceans, the SEC region was classified as one of the oligotrophic regions, in which the low level of nutrients, especially NO_3^- , played a major role in limiting the growth of phytoplankton.

Key Words: chlorophyll a; size fraction; the Indian Ocean South Equatorial Current; oligotrophic

浮游植物是海洋生态系统中最重要的生产者,其现存量一般可以用叶绿素 a 浓度来表征。同时叶绿素 a 也是估算初级生产力和评价海区潜在生产能力的重要参数之一^[1],其粒级结构也被认为是影响水体食物网和碳通量的主要生物因素^[2],因而,叶绿素 a 的分布特征是海洋生态系统主要的研究对象。大洋中低纬度的寡营养盐海区往往具有低叶绿素 a 浓度和独特的粒级结构,在生态系统的能量流动和物质循环方面具有区别于其它水体的特点,因此常被单独作为一个典型的生态区域来研究^[2-5]。有关大西洋、太平洋低纬度开阔海区该方面的研究已有大量报道^[2-3, 6-7],而对印度洋低纬度开阔海区叶绿素 a 的调查研究报道甚少。相对于太平洋和大西洋,印度洋具有如下特点:其东、西和北面被大陆阻隔;一年中经历不同的季风环流^[8];低纬度开阔海区无上升流区,受陆地影响小^[9]。研究中,印度洋低纬度开阔海区被认为是典型的热带寡营养海区,具有较低的叶绿素 a 浓度^[10]。

印度洋一年中虽然经历不同的季风环流,但其 8—22°S 间的开阔海区终年存在自东向西流动的印度洋南赤道流。该海区南边是印度洋副热带环流区,东边受到来自西太平洋的影响,北边是赤道逆流,海区年平均海表温度约 28°C。有关印度洋南赤道流区中部和东部浮游植物现存量的数据大多来自海洋水色遥感^[11-12],现场实测数据相对匮乏。本文根据中国 DY115-21 航次对印度洋南赤道流区的综合环境调查结果,分析了调查海区叶绿素 a 浓度和浮游植物粒级结构的分布特征,探讨其环境影响因子,并结合其它海区的相关研究结果进行了对比分析,为印度洋南赤道流区生态环境动力学研究、海洋水色遥感比对判读叶绿素 a 浓度提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究海区和采样方法

2010 年 4 月 25 日—2010 年 5 月 12 日,“大洋一号”科学考察船首次对印度洋南赤道流区进行了综合环境调查。在 10°59'—14°6'S, 80°00'—113°3'E 的印度洋南赤道流区设置了 9 个观测站,其中 3 个测站 (CTD1—3) 位于印度洋中部 (Central Indian Ocean, CIO 测区),6 个测站 (CTD4—9) 位于印度洋东部 (Eastern

Indian Ocean, EIO 测区)(图 1)

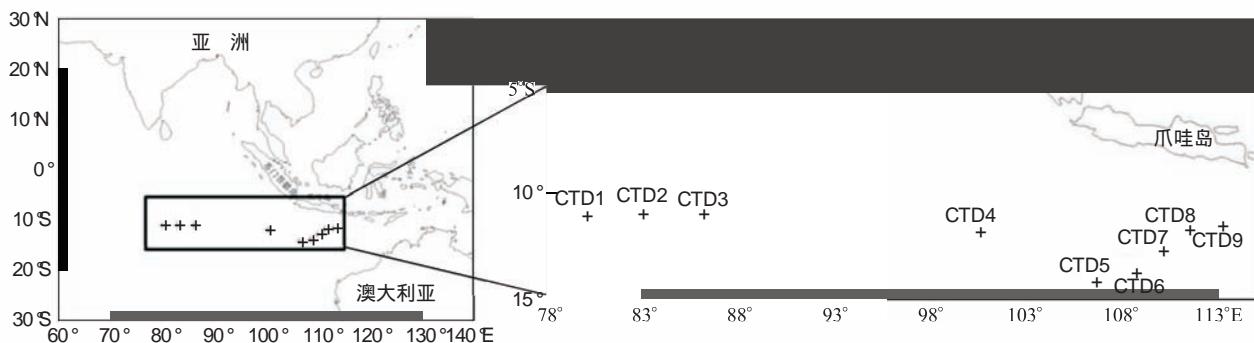


图 1 印度洋调查站位分布图(2010.4—2010.5)

Fig. 1 Investigation stations in Indian Ocean (April—May 2010)

CTD1-CTD3 测站位于测区 1, CTD4-CTD9 测站被归入测区 2

使用 Seabird 911Plus 采水器采集 0—200 m 海水样。采水层次分 17 层:2、5、10、20、30、40、50、60、75、80、90、100、110、125、150、175、200 m。每层水样采集 500 mL 供叶绿素 a 浓度和浮游植物粒级结构分析,并同步采集 5、10、30、50、75、100、125、150、175、200 m 共 10 层水样进行 pH、溶解氧和营养盐浓度的测定分析。

1.2 研究方法和数据处理

温度和盐度数据由 Seabird911plus CTD 直接测得。pH、溶解氧和营养盐浓度采样和分析参照海洋调查规范进行^[13]。

每层水样分别取 500 mL, 依次用孔径分别为 20、2、0.2 μm 的滤膜 (Millipore NY2004700、TTTP04700、GTTP04700) 分级过滤, 分析测定细胞粒径大于 20 μm 的 net 级份、细胞粒径在 2—20 μm 的 nano 级份以及细胞粒径在 0.2—2 μm 的 pico 级份光合浮游生物对总叶绿素 a 的贡献; 同时, 将测定的各级份叶绿素 a 浓度之和作为叶绿素 a 总浓度。叶绿素 a 的测定采用荧光法^[13], 其主要分析过程为: 将截留有浮游植物的滤膜用 90% (体积分数) 丙酮溶液在低温避光条件下萃取 24 h, 然后用 10-AU 型唐纳荧光计测定萃取液酸化前后荧光值, 再根据经典公式计算叶绿素 a 质量浓度^[13]。

2 结果

2.1 印度洋南赤道流区环境特征

调查海区水体有明显层化现象(图 2 以 CTD2 测站为例, 显示了调查海区叶绿素 a、温度、盐度、NO₃⁻、PO₄³⁻ 和 SiO₃²⁻ 3 种营养盐的垂直分布模式), 水温、盐度和 3 种营养盐在调查海区普遍存在分布较均匀的混合层和快速变化的跃层, 只是混合层的厚度在不同站位间略有不同。

测区整个混合层水温较高(>28 °C), EIO 测区东部甚至高于 29 °C(图 3), 混合层内温度变化不明显。温跃层上界位于 50 m 左右, EIO 测区温跃层上界略深。50 m 以下水温明显下降, 200 m 处水温约 14 °C。图 3b 显示 CTD6 和 CTD8 两个测站下方有较弱的上升流, 引起水温迅速下降。EIO 测区水温整体较 CIO 测区高。

盐度在调查海区的分布与温度的类似, 存在分布均匀的混合层和盐度升高的盐跃层。表层盐度较低(略高于 34), EIO 测区东部的 CTD7 和 CTD8 两个测站尤其明显(图 4)。盐跃层上界位置较温跃层浅, 分布在 30—40 m。CTD6 和 CTD9 两个测站是例外, 前者盐跃层起始于约 150 m 处, 后者则不存在典型的盐跃层。

伴随温度、盐度的层化, NO₃⁻、PO₄³⁻ 和 SiO₃²⁻ 3 种营养盐跃层的深度范围与温度跃层基本一致, 起始于 50 m 左右的水层(图 5)。跃层之上, 营养盐浓度普遍很低, 如表层 NO₃⁻ 浓度基本都小于 0.5 μmol/L(CTD2 除外), PO₄³⁻ 在表层浓度普遍小于 0.1 μmol/L, 而表层 SiO₃²⁻ 浓度变化相对较大(0 (CTD2)—8.83 μmol/L (CTD8)), 但也基本小于 5 μmol/L,(图 5、表 1 和表 2); 跃层之下, 浓度迅速升高 1—2 个数量级, 如 100 m 水深处各站位营养盐浓度分布: NO₃⁻ 浓度在 2.2—15.47 μmol/L; PO₄³⁻ 浓度在 0.32—1.2 μmol/L; SiO₃²⁻ 浓度在 7.27—

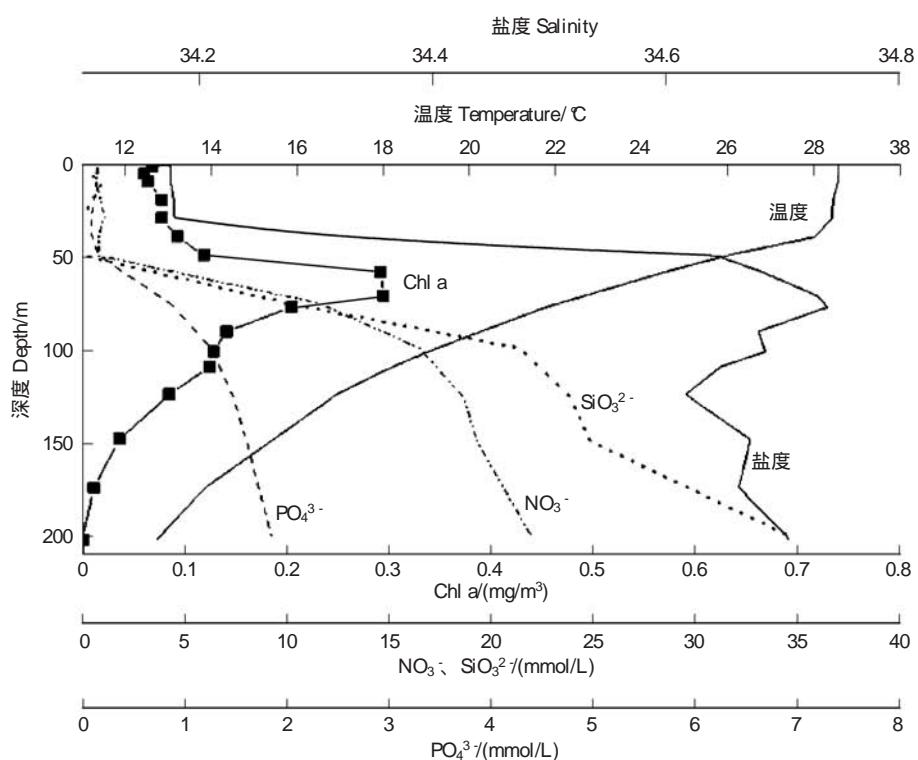


图 2 CTD2 测站温度、盐度、总叶绿素 a 和营养盐的垂直分布图

Fig. 2 Vertical distribution of temperature, salinity, total Chl a and nutrients in station CTD2

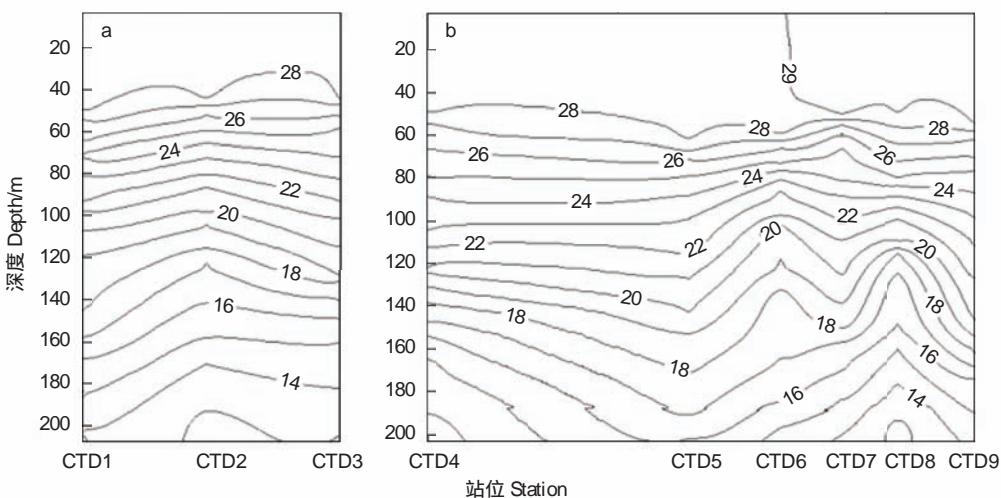


图 3 印度洋南赤道流区水温的断面垂直分布/℃

Fig. 3 Vertical distribution of temperature of the two survey regions in South Equatorial Current

(a) CIO 测区 CIO survey region; (b) EIO 测区 EIO survey region

17.01 $\mu\text{mol/L}$ 。

2.2 浮游植物现存量

2.2.1 叶绿素 a 浓度的空间分布

调查海区表层叶绿素 a 浓度普遍较低(图 6 平均 (0.122 ± 0.052) mg/m^3)，仅有 CTD4、CTD5、CTD8 和 CTD9 测站的表层浓度大于 $0.1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，其中 CTD9 测站最高($0.202 \text{ mg}/\text{m}^3$)。与 CIO 测区相比，EIO 测区表层叶绿素 a 浓度更高，站位间差异更大(表 1, 表 2)。而 EIO 测区中，东北端的 CTD8 和 CTD9 测站表层叶绿素 a

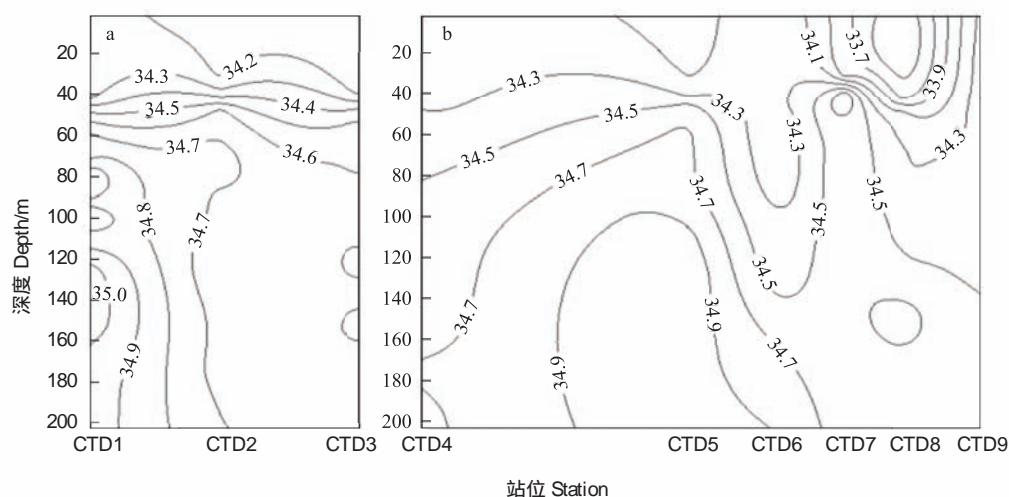


图4 印度洋南赤道流区盐度的断面垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of salinity of the two survey regions in South Equatorial Current

(a) CIO 测区 CIO survey region; (b) EIO 测区 EIO survey region

浓度明显高于南边的3个测站(图6)。

表1 春季印度洋南赤道流区CIO测区叶绿素a及有关营养盐浓度平均值的垂直分布

Table 1 Vertical distribution of Chla, DO and nutrients in spring of CIO survey region in South Equatorial Current

水深 Depth/m	总叶绿素 Chl a / (mg/m ³)	DO/μmol/L	NO ₃ ⁻ /μmol/L	PO ₄ ³⁻ /μmol/L	SiO ₃ ²⁻ /μmol/L
2	0.072±0.005	—	—	—	—
5	0.066±0.010	405.8±10.7	0.35±0.38	0.11±0.03	2.85±2.48
10	0.067±0.008	424.5±11.8	0.34±0.33	0.12±0.01	1.82±0.79
20	0.072±0.001	—	—	—	—
30	0.070±0.006	419.3±10.6	0.52±0.49	0.12±0.05	2.02±2.06
40	0.083±0.006	—	—	—	—
50	0.139±0.016	409.5±10.1	0.45±0.34	0.14±0.05	1.61±1.44
60	0.223±0.060	—	—	—	—
75	0.284±0.036	355.3±75.4	3.45±3.56	0.41±0.31	4.65±4.42
80	0.254±0.037	—	—	—	—
90	0.199±0.060	—	—	—	—
100	0.167±0.033	247.5±37.6	13.83±1.96	1.00±0.18	12.20±2.40
110	0.136±0.015	—	—	—	—
125	0.104±0.027	237.4±10.3	16.64±0.11	1.26±0.07	19.53±1.75
150	0.034±0.005	235.4±11.0	18.92±2.73	1.47±0.03	24.98±5.11
175	0.010±0.003	229.6±7.0	19.57±3.07	1.58±0.11	27.29±3.64
200	0.002±0.003	222.4±25.2	22.10±2.45	1.68±0.22	30.22±4.74

“—”表示未测定对应水层相关数据

在垂直方向,叶绿素a的分布具有层化现象且呈现明显的单峰结构(图2),其峰值位于混合层以下、营养盐跃层内。不过各测站叶绿素a峰值所在水层略有区别。图7a和图7b分别显示了CIO测区和EIO测区200 m以浅水层的垂直分布状况,表明两个测区叶绿素a的分布虽然具有相似的垂直结构,也存在一定的差异。在40 m以浅水层(CTD2测站略深,约为0—50m; CTD4测站略浅,约为0—30m),叶绿素a浓度普遍较低,且垂直方向变化不明显。EIO测区该层叶绿素a浓度范围在0.091—0.209 mg/m³(CTD5测站最低,CTD9测站最高),高于CIO测区(0.062—0.075 mg/m³)。从CTD5—CTD9测站,该水层叶绿素a浓度有逐渐升高的趋势(图7)。

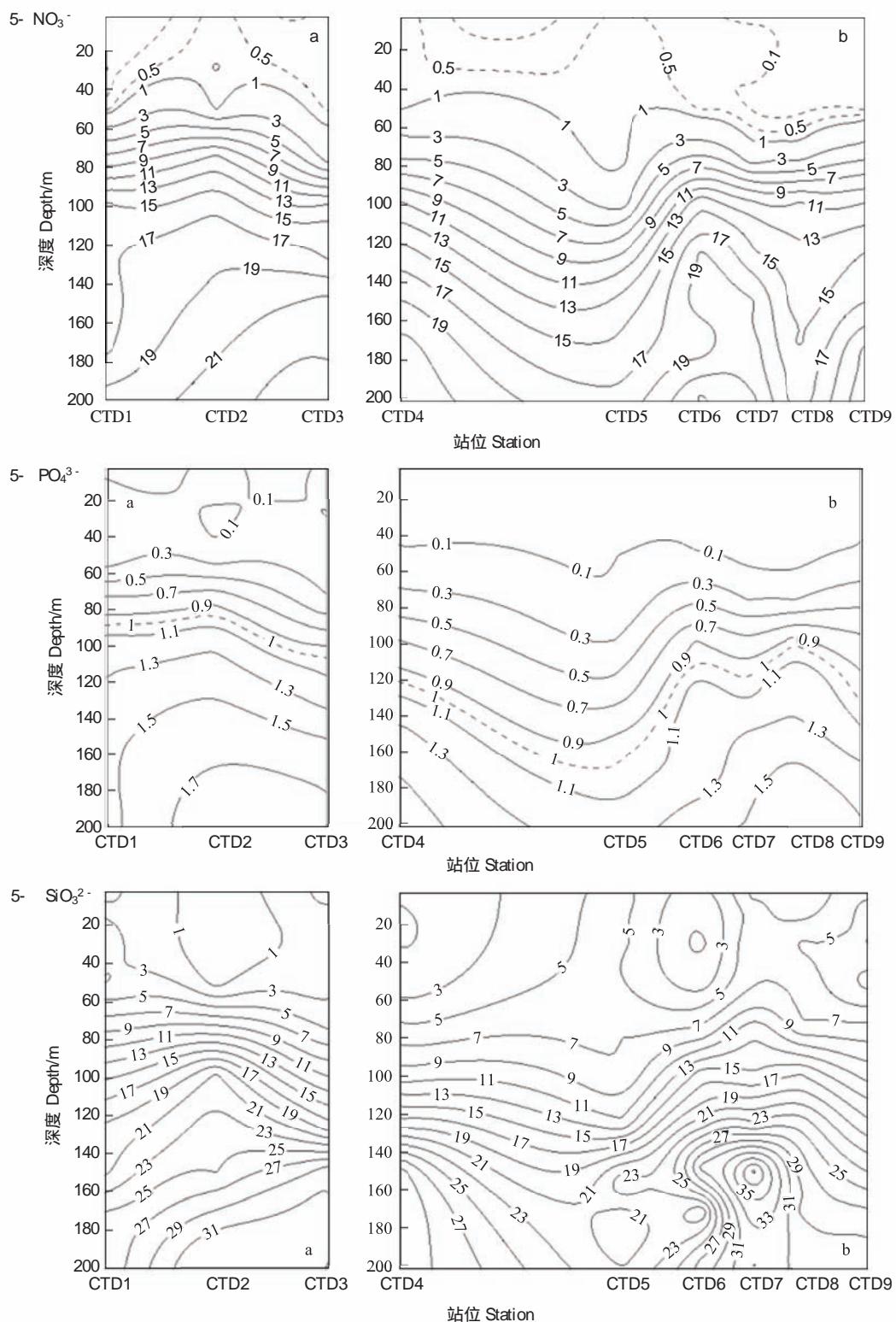


图 5 印度洋南赤道流区 NO_3^- (5-I)、 PO_4^{3-} (5-II) 和 SiO_3^{2-} (5-III) 浓度($\mu\text{mol/L}$)的断面垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of NO_3^- (5-I)、 PO_4^{3-} (5-II) and SiO_3^{2-} (5-III) ($\mu\text{mol/L}$) of the two survey regions in South Equatorial Current

(a) CIO 测区 CIO survey region; (b) EIO 测区 EIO survey region

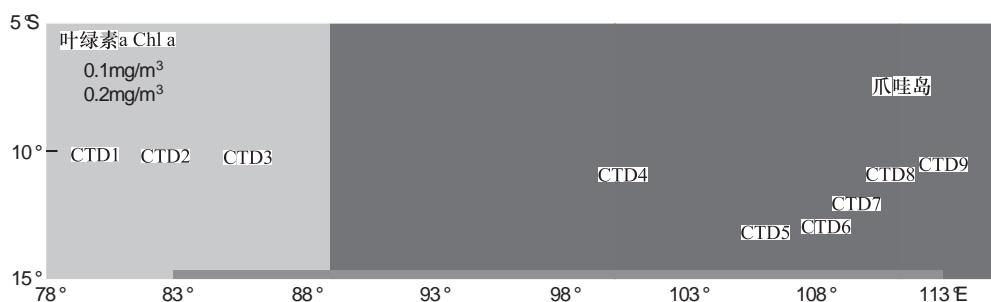


图6 印度洋南赤道流区表层叶绿素a浓度的分布

Fig. 6 Distribution of Chl a in surface layer of the South Equatorial Current

表2 春季印度洋南赤道流区 EIO 测区叶绿素 a 及有关营养盐浓度平均值的垂直分布

Table 2 Vertical distribution of Chl a, DO and nutrients in spring of EIO survey region in South Equatorial Current

水深 Depth/m	总叶绿素 Chl a / (mg/m ³)	DO/μmol/L	NO ₃ ⁻ /μmol/L	PO ₄ ³⁻ /μmol/L	SiO ₃ ²⁻ /μmol/L
2	0.138±0.049	—	—	—	—
5	0.138±0.053	410.0±24.3	0.30±0.39	0.05±0.02	5.48±2.56
10	0.133±0.054	419.9±5.6	0.39±0.40	0.05±0.03	4.23±2.85
20	0.143±0.053	—	—	—	—
30	0.143±0.055	415.6±8.6	0.38±0.42	0.05±0.02	3.97±2.55
40	0.158±0.058	—	—	—	—
50	0.237±0.079	404.9±13.1	0.37±0.44	0.09±0.04	3.97±2.31
60	0.289±0.096	—	—	—	—
75	0.285±0.086	355.5±46.4	3.29±2.03	0.33±0.13	8.00±2.38
80	0.244±0.081	—	—	—	—
90	0.189±0.072	—	—	—	—
100	0.146±0.068	301.8±44.9	10.46±4.21	0.75±0.23	13.09±3.82
110	0.110±0.038	—	—	—	—
125	0.059±0.033	275.4±31.1	14.60±3.46	1.01±0.24	19.37±4.74
150	0.024±0.011	256.0±12.8	17.31±2.60	1.22±0.16	29.33±5.90
175	0.015±0.010	258.5±23.1	18.76±3.37	1.38±0.21	28.15±5.18
200	0.012±0.012	242.9±16.8	20.44±3.02	1.48±0.17	28.60±4.19

“—”表示未测定对应水层相关数据

从该层往下叶绿素 a 浓度迅速升高，并在 60—80 m 之间出现峰值。CIO 测区叶绿素 a 浓度的峰值限于 75—80 m 的狭窄条带内（图 7a），其浓度变化范围在 0.257—0.311 mg/m³；EIO 测区叶绿素 a 浓度峰值则出现在 60—80 m 较厚的水层，变化范围在 0.297—0.422 mg/m³（图 7b），其中最大值出现在 CTD6 测站的 60 m 层。叶绿素 a 浓度的高值区（>0.2 mg/m³）所在水深范围从 CTD5 测站的 60—100 m 到 CTD9 测站的 20—80 m，表现出两个趋势：水深跨度越来越大，水层越来越浅（CTD6 测站除外）。从该层往下叶绿素 a 浓度迅速下降，125—150 m 间的叶绿素 a 浓度比峰值低了一个数量级。

不同测站叶绿素 a 浓度的 200 m 水柱积分也存在差异（图 8），变化范围为 19.9—28.3 mg/m²，CTD 8 测站最高，为 28.3 mg/m²；CIO 测区（平均 20.7 mg/m²）比 EIO 测区（平均 24.1 mg/m²）低，表明 EIO 测区浮游植物现存量相对较高。

2.2.2 浮游植物的粒级结构

对 9 个测站浮游植物各级份数据分析结果表明，整个测区 pico 级份占有绝对优势，对总叶绿素 a 浓度的平均贡献为 75%：CTD1—9，pico 级份对叶绿素 a 的贡献先缓慢上升，在 CTD5 测站达到最高（82%），之后逐步下降，在 CTD8 测站最低（64%），而在 CTD9 测站又上升至 78%。Nano 级份的贡献次之，占 15%—26%，平

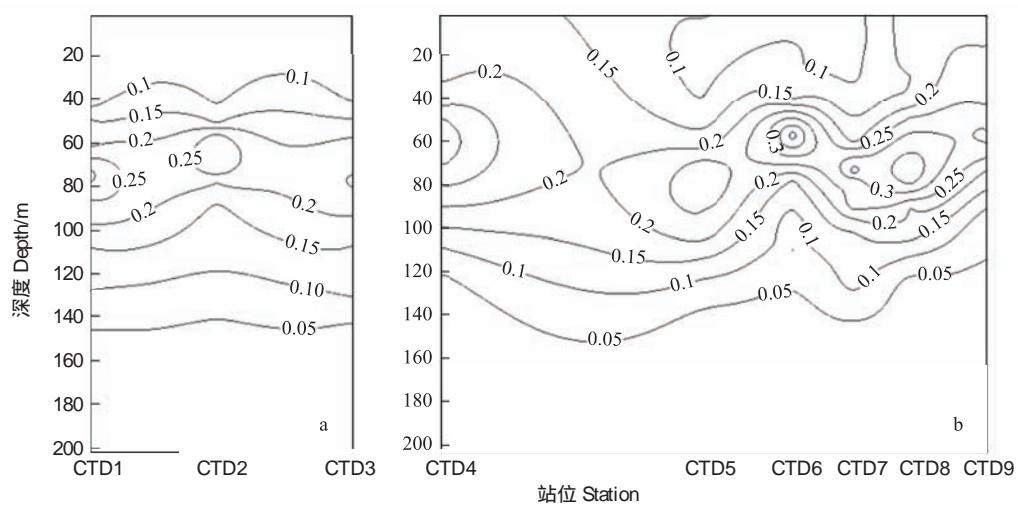
图 7 印度洋南赤道流区总叶绿素 a 浓度的断面垂直分布/(mg/m^3)

Fig. 7 Vertical distribution of Chl a of the two survey regions in South Equatorial Current

(a) CIO 测区 CIO survey region; (b) EIO 测区 EIO survey region

均为 20%。Net 级份的贡献最小,大都小于 10%,平均仅有 5% (图 8)。

浮游植物各级份与叶绿素 a 总浓度的垂直分布类似,都具有明显的单峰结构,各级份的变化趋势也基本一致(图 9)。在 0—40 m 各级份叶绿素 a 浓度基本保持稳定,40—75 m 左右存在跃层并出现峰值,之后随着水深增加,叶绿素 a 浓度开始逐渐下降,150 m 以下其浓度接近于零。Net 级份的浓度在水深 40 m 以浅非常低,接近于 0,仅在叶绿素 a 浓度峰值所在层次附近检测到。叶绿素 a 总浓度随深度的变化也主要受 pico 级份垂直分布的影响。

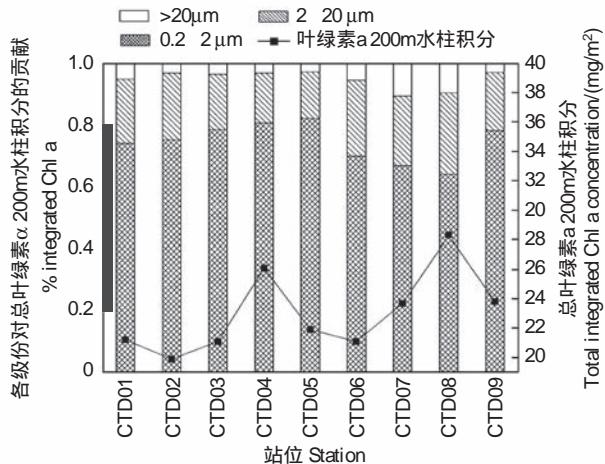
3 讨论

3.1 叶绿素 a 空间区域化特征

本次调查时间处于印度洋东北季风到西南季风的转换期。调查海区属于印度洋南赤道流区,站位设置呈东西向分布,经度跨度大(达 33°)。该海区水体环境特点:表层水温高,温度、盐度存在层化现象,相似的营养盐垂直分布格局,较低的叶绿素 a 浓度及相似的浮游植物粒级结构,这些也是低纬度寡营养盐海区的共同特点^[4]。

表层叶绿素 a 浓度的分布(图 6)显示,所调查的开阔海区表层叶绿素 a 浓度总体上较低,但镶嵌分布有较高的区域(如 CTD4 测站),说明叶绿素 a 浓度具有更小尺度的水平分布特征。Longhurst^[14]根据遥感数据发现印度洋南赤道流区虽然叶绿素 a 浓度较低,但整个海区常年广泛分布有罗斯贝波尺度大小的涡。这种涡中心叶绿素 a 浓度低,边缘高,形成一些叶绿素 a 浓度稍高的带状区域。本研究中发现叶绿素 a 浓度高低镶嵌分布格局与 Longhurst 的描述吻合。

根据站位所处的地理位置,将调查海区分为 CIO 测区和 EIO 测区(图 1)。叶绿素 a 浓度、化学及水文参数的分布特征(图 2—图 7)表明这两个测区间分布具有不同的格局。图 3—图 5 和图 7 显示,CIO 测区相关参

图 8 各站位总叶绿素 a 的 200m 水柱积分 (mg/m^2) 以及各级份浮游植物对总叶绿素 a 的贡献/%Fig. 8 Total integrated Chl a concentration (mg/m^2) and the relative contribution of picoplankton, nanoplankton and netplankton to total integrated Chl a concentration

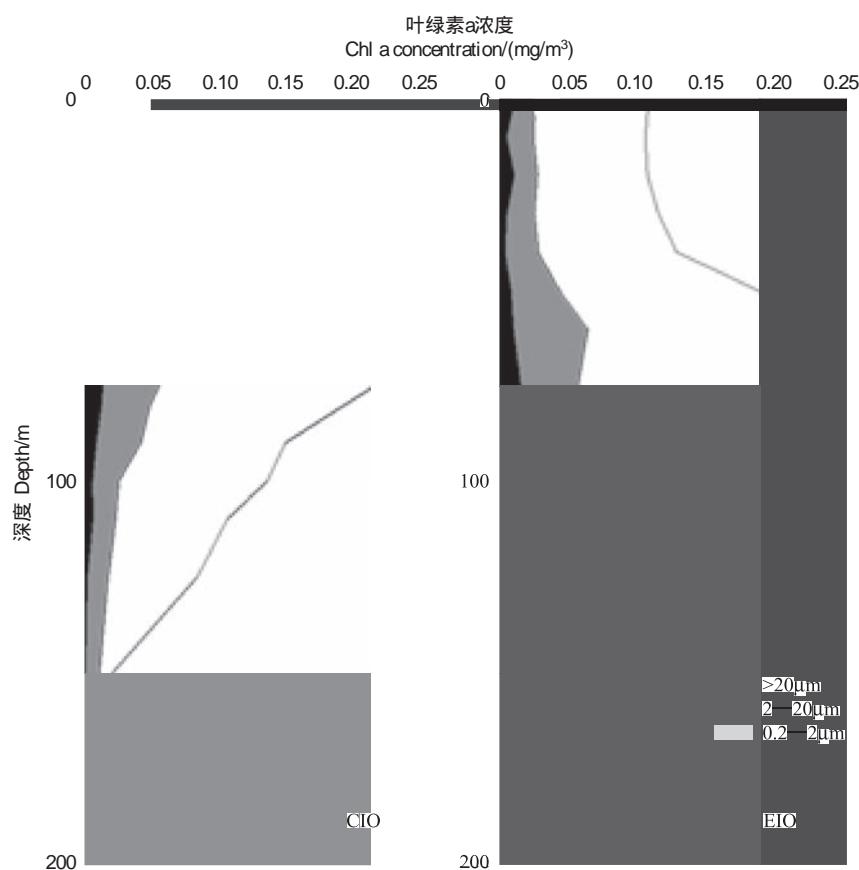


图9 CIO测区和EIO测区各级份叶绿素a平均浓度的垂直分布

Fig.9 Vertical distribution of average Chl a concentration of different size in the two survey regions

数的等值线接近水平分布,说明CIO测区叶绿素a浓度以及其它环境参数垂直分层显著,而沿纬度方向变化不明显。从图3b和图4b看出,EIO测区东部部分海区具有更高的水温和较低的表层盐度;图7b显示,从CTD5测站开始往东,0.1、0.15、0.2和0.25 mg/m³ 4条等值线所处水层逐渐上移,说明EIO测区(CTD4测站除外)叶绿素a浓度分布呈东高西低趋势,东部叶绿素a浓度较高的水层位置较西部浅。尽管EIO测区东部相邻站位间的距离较CIO测区近,但站位间有关环境参数和叶绿素a浓度的差异明显大于后者。两个测区间的这些差异可能与测区附近其它水团的活动影响有关。

CIO测区位于印度洋中部,终年存在明显的南赤道流,其北边的赤道逆流距离测区有一定的距离,受外部的影响较小,这可能是其化学、水文、生态特征较均匀的原因之一。

EIO测区(尤其是东部的测站)则处于印度洋南赤道流区东部边缘地带(图1,图10),东面受到印度尼西亚贯穿流(Indonesian Throughflow)的影响,南边有EGC(Eastern Gyral Current),北边则存在南爪哇流(SJC, South Java Current)^[15]。南爪哇流表层高温低盐,在5月到6月得到了加强^[16]。从地理位置分析,印度尼西亚贯穿流和南爪哇流对EIO测区东部可能存在较大影响。而Marco A. Marinelli等人统计分析该海区两个靠近的区块1978—1986年的遥感数据后发现,相对靠近爪哇岛的区块具有更高的叶绿素a浓度和营养盐浓度^[11],认为这很可能是穿过印度尼西亚来的西太平洋水的影响,而且推测这个影响可能向南到达10°S左右^[11, 17],这刚好位于CTD8和CTD9两个测站北部边缘。因此,南爪哇流和印度尼西亚贯穿流可能往EIO测区东部表层水平输送高温、低盐水和较为丰富的营养盐^[16],有利于浮游植物的生长和繁殖。

即使目前的数据还无法准确评估印度尼西亚贯穿流、南爪哇流等对印度洋南赤道流东部浮游植物分布的影响,但是考虑到本研究涉及海区的跨度以及EIO测区叶绿素a浓度分布的变异性,因为外界海流的影响,

EIO 测区浮游植物的分布可能具有更复杂的时空结构。

3.2 浮游植物现存量的影响因素

3.2.1 营养盐

在大洋低纬度开阔海区,营养盐浓度通常被认为是限制浮游植物生长的主要因素^[4, 18],另一方面,水层中生物的消耗也可能使得营养盐浓度维持在较低的水平^[19]。本研究中叶绿素a浓度的垂直变化能很好地反映出营养盐浓度对于浮游植物的限制作用。调查海区4—5月混合层的营养盐浓度普遍较低(表1,表2),同时伴随低的叶绿素a浓度。叶绿素a浓度快速升高的跃层都起始于营养盐跃层的上界附近,且其峰值全位于营养盐跃层内。这表明叶绿素a浓度对营养盐浓度的升高具有很好的响应(图2),间接反映该海区营养盐是限制混合层浮游植物生长、繁殖的主要因素之一,这与其它在大西洋和西太平洋的研究结果类似^[6-7]。

对浮游植物吸收营养盐的动力学研究表明,一些寡营养海区浮游植物对 NO_3^- 吸收的半饱和常数 K_N 为 $0.01\text{--}0.12 \mu\text{mol/L}$ ^[20],微型浮游植物对 PO_4^{3-} 的 K_P 值为 $0.04\text{--}0.18 \mu\text{mol/L}$ ^[21],大部分大洋海区浮游植物对 SiO_3^{2-} 的 K_{Si} 值为 $0.5\text{--}5 \mu\text{mol/L}$ ^[22-23]。若以此3项数据为参照,发现调查海区大部分站位混合层相应这3种营养盐浓度都很低,接近各自的 K 值,表明该海区低的营养盐浓度对浮游植物营养盐的吸收速度存在限制作用^[4]。

由表1和表2的营养盐数据得出的 N:P 普遍小于 Redfield 比值(16:1)。假设浮游植物按照 Redfield 比值吸收 N 和 P,推测该海区 N 源对浮游植物生长代谢的限制作用大于 P。这个推测符合 Codispoti 关于 N 是海洋浮游植物主要限制性营养元素的结论^[24],也与 Keith Moore 等人的对印度洋浮游植物现存量限制性因素的模型估计一致^[25]。当然,由于调查海区营养盐浓度本身很低,上述结论还需要进一步实验证实。

3.2.2 水体的垂直稳定度

虽然认为营养盐浓度是浮游植物生长主要的直接限制因素,但是营养盐等环境因子的变化往往最终是由水动力条件决定^[26]。水动力条件可通过水平或垂直方向对海水营养盐浓度产生影响,水平方向可能的影响在前面3.1节已进行讨论,而垂直方向的影响往往伴随上升流的发生,或者不同水团的交汇。这在浮游植物现存量较高的低纬度海区经常发生^[2-3, 27]。

在本次调查中, NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-} 3 种营养盐浓度的垂直分布存在层化现象,表明营养盐跃层上下两部分水体并没有进行充分的交换。研究报道5月往往是东南印度洋上升流最弱的时期^[11],而4—5月处于东北季风与西南季风间的间隙期,风速小,因此这期间海水垂直混合强度弱^[14],这大概是调查期间该海区水体出现层化现象主要原因之一。层化的水体阻碍较深层营养盐向上补充^[27],加上生物的消耗,导致表层营养盐维持在低浓度水平,进而限制浮游植物生长。

3.3 Pico 级份的贡献

图11显示,在本研究的观测海区,随着总叶绿素a浓度的增加,pico 和 nano 级份的浓度呈明显直线上升趋势;net 级份变化不显著。说明本研究范围内,浮游植物各级份所占比重随总叶绿素a浓度的变化不明显,pico 级份始终占据优势地位。而有研究表明,pico 级份对总叶绿素a的贡献与总叶绿素a或者营养盐浓度呈一定的负相关关系^[2-3, 6-7],这在本研究中并没有观察到。可能的原因是上述研究中相关海区营养盐和叶绿素a浓度往往具有量级的变化,随着营养盐浓度的上升,pico 级份浮游植物竞争优势下降^[27],导致其比重降低;而本研究涉及的海区都是寡营养盐海区,叶绿素a浓度变化幅度相对较小,所以 pico 级份一直占据优势。

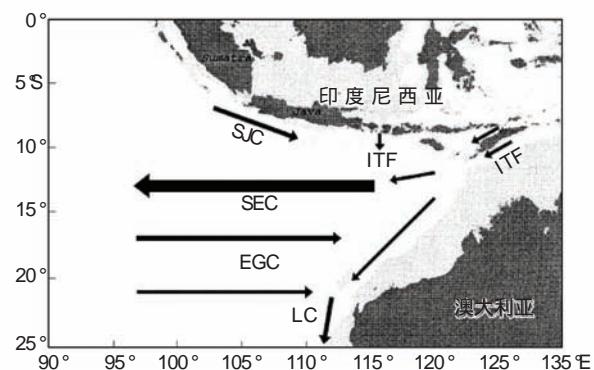


图 10 东南印度洋洋流图^[9]

Fig. 10 Currents in southeast Indian Ocean

SJC: 南爪哇流 (South Java Current); ITF: 印度尼西亚贯穿流 (Indonesian Throughflow); SEC: 南赤道流 (South Equatorial Current); EGC: Eastern Gyral Current, 为南印度洋副热带环流的东部分支; LC: Leeuwin Current, 为沿着澳大利亚西部海岸南向的暖流

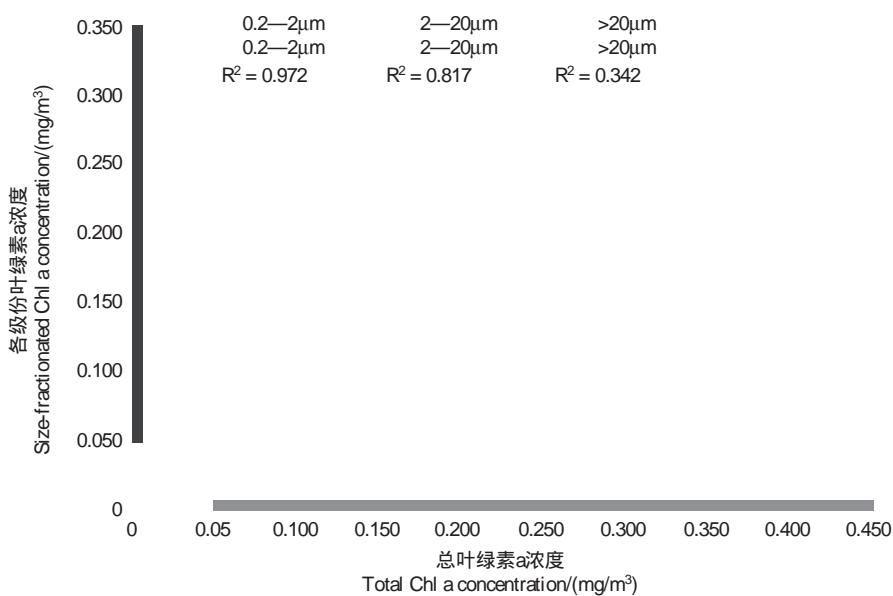


图 11 各级份叶绿素 a 浓度随总叶绿素 a 浓度的变化

Fig. 11 Relationship between Chl a concentration of different size and the total Chl a concentration

图 8 表明各测站间 pico 级份对于总叶绿素 a 的贡献有一定区别, 尤其从 CTD5 到 CTD8 测站, pico 级份所占比例逐步减少, 而营养盐和总叶绿素 a 浓度却并不存在对应的变化趋势。这需要更多样品数据来解释这个现象。

3.4 调查海区与其它热带寡营养盐海区研究结果的对比

多项研究表明, 在低纬度开阔洋区, 叶绿素 a 浓度往往很低, 少有高于 0.5 mg/m³ 的情况, 而表层叶绿素 a 浓度更低, 叶绿素 a 的最大浓度并不在表层, 一般位于混合层以下的营养盐跃层内, pico 级份对浮游植物现存量的贡献占主导地位(表 3)^[2, 6-7, 22, 27-28], 主要是因为低的营养盐浓度(上升流区除外)和微量元素的缺乏限制了浮游植物的生长^[4, 22]。由于 pico 级份相对 net 和 nano 级份的浮游植物具有较小的 K 值, 获得了更强的竞争优势, 所以其对叶绿素 a 的贡献最大^[22]。大西洋部分赤道洋区仅在夏季出现上升流时, 其表层、次表层有较高的营养盐浓度, 而冬季整个混合层的 NO₃⁻ 浓度小于 0.1 μmol/L, 相应地其叶绿素 a 浓度也维持在较低水平^[6]。Aubert Le Bouteiller 等人对西太平洋低纬度的研究也得到类似的结果^[7]。

表 3 印度洋南赤道流区与其它热带寡营养盐海区对比

Table 3 Comparison between South Equatorial Current in Indian Ocean and other tropical oligotrophic sea

海区 Region	表层叶绿素 a 浓度 Surface Chla concentration /(mg/m ³)	Pico-级份比例 Pico/%	叶绿素 a 浓度 峰值水层/m Depth of Chlorophyll a maximum layer	参考文献 Reference
南大西洋 South Atlantic Ocean	<0.2	80	50—100	[2]
赤道大西洋 Equatorial Atlantic Ocean	<0.2	>71	45—60	[6]
西太平洋热带海区 Tropical open ocean in the Western Pacific	<0.1	>60	50—100	[7]
印度洋南赤道流区 South Equatorial Current in Indian Ocean	<0.1—0.2	75	60—80	本研究

Longhurst^[14]将印度洋 10°—40°S 间的广阔洋区归入南印度洋副热带环流(Indian South Subtropical Gyre Province, ISSG Province), 该区域大部分开阔海区表层叶绿素 a 浓度小于 0.05 mg/m³, 显示出比较极端的寡营养状态。与此对比, 南赤道流区是个例外, 具有相对较高的表层叶绿素 a 浓度, Longhurst 将此归因于 Rossby-Scaled Eddies 的影响, 而上述极端寡营养海区主要集中于副热带环流中央较稳定的水体^[14]。

综上所述,与太平洋、大西洋热带寡营养盐海区相比,本研究涉及的印度洋南赤道流海区具有类似的环境和叶绿素a分布,属于典型的热带寡营养盐海区;另一方面,其又比南边副热带环流中央海区表层有更高的浮游植物现存量,反映了水动力条件对浮游植物的影响。

4 结论

印度洋南赤道流区中部和东部4—5月表层营养盐浓度很低,具有典型的热带寡营养盐海区的特征。叶绿素a浓度普遍偏低,垂直分布层化明显,具有明显的单峰结构,叶绿素a浓度峰值出现于60—80m水层。Pico粒级对叶绿素a的贡献占绝对优势。

尽管叶绿素a浓度普遍低下,但在印度洋南赤道流中部和东部还是有明显的空间差异。其中部的叶绿素a、温度和盐度水平分布较均匀,而东部受到南爪哇流和印度尼西亚贯穿流的影响,导致该区块水文参数存在相对较大的空间变异性且可能存在营养盐的水平输入,进而引起东部海区出现相对较高的叶绿素a浓度。

调查海区4—5月缺乏强的上升流,加上浮游植物代谢消耗水体中大量营养盐,表层营养盐难以得到补充,使营养盐成为浮游植物生长的主要限制因子。

致谢:香港科技大学刘红斌教授对本文写作给予帮助。

References:

- [1] Liu Z L, Chen Z Y, Zhou B F, Zhang T, Ding T. The distribution of the size-fractionated chlorophyll a in the subtropical circle area of the northwest Pacific Ocean during the autumn 2002. *Donghai Marine Science*, 2004, (4): 17-23.
- [2] Marañón E, Holligan P M, Barciela R, González N, Mouríño B, Pazó M J, Varela M. Patterns of phytoplankton size structure and productivity in contrasting open-ocean environments. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 216: 43-56.
- [3] Le Bouteiller A, Blanchot J. Size distribution and abundance of phytoplankton in the Pacific equatorial upwelling. *La mer*, 1991, 29: 175-179.
- [4] Shen G Y, Shi B Z. Primary production in marine//Shen G Y, Shi B Z, eds. *Marine Ecology*. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002: 197-207.
- [5] Herblan A, Voituriez B. Hydrological structure-analysis for estimating the primary production in the tropical Atlantic Ocean. *Journal of Marine Research*, 1979, 37(1): 87-101.
- [6] Herblan A, Le Bouteiller A, Raimbault P. Size structure of phytoplankton biomass in the equatorial Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part A-Oceanographic Research Papers*, 1985, 32(7): 819-836.
- [7] Le Bouteiller A, Blanchot J, Rodier M. Size distribution patterns of phytoplankton in the western Pacific: towards a generalization for the tropical open ocean. *Deep Sea Research Part A-Oceanographic Research Papers*, 1992, 39(5): 805-823.
- [8] Wang F Q. Ocean circulation//Feng S Z, Li F Q, Li S J, eds. *An Introduction to Marine Science*. Beijing: Higher Education Press, 1999: 144-180.
- [9] Schott F A, Dengler M, Schoenfeldt R. The shallow overturning circulation of the Indian Ocean. *Progress in Oceanography*, 2002, 53(1): 57-103.
- [10] Fernandes V, Rodrigues V, Ramaiah N, Paul J T. Relevance of bacterioplankton abundance and production in the oligotrophic equatorial Indian Ocean. *Aquatic Ecology*, 2008, 42(4): 511-519.
- [11] Marinelli M A, Lynch M J, Pearce A F. Remote sensing study of the phytoplankton spatial-temporal cycle in the south eastern Indian Ocean. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2008, 2(1): 1-21.
- [12] Talukder A B M A. Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentrations in the Indian Ocean, derived from the CZCS time series images. *Ciencias Marinas*, 2005, 31(3): 505-515.
- [13] State Technology Supervision Bureau. The specification for oceanographic survey GB/T 12763.6—2007. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [14] Longhurst A. *Ecological Geography of the Sea*. 2nd ed. London: Elsevier, 2007: 287-288.
- [15] Feng M, Wijffels S. Intraseasonal variability in the South Equatorial Current of the East Indian Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(1): 265-277.
- [16] Sprintall J, Chong J, Syamsudin F, Morawitz W, Hautala S, Bray N, Wijffels S. Dynamics of the South Java current in the Indo-Australian Basin. *Geophysical Research Letter*, 1999, 26(16): 2493-2496.
- [17] Rochford D J. Nutrient status of the oceans around Australia//Maclean J L, ed. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. CSIRO Division of Fisheries and Oceanography Report 1977—1979. Canberra: National Archives of Australia, 1979: 9-20.
- [18] Martin J H, Gordon R M, Fitzwater S E. The case for Iron. *Limnology and Oceanography*, 1991, 36(8): 1793-1802.

- [19] Cai Y M, Ning X R, Zhu G H, Shi J X. Size fractionated biomass and productivity of phytoplankton and new production in the Prydz Bay and the adjacent Indian sector of the Southern Ocean during the austral summer of 1998/1999. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(4): 135-147.
- [20] Harrison W G, Harris L R, Irwin B D. The kinetics of nitrogen utilization in the oceanic mixed layer: nitrate and ammonium interactions at nanomolar concentrations. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(1): 16-32.
- [21] Huang B Q, Hong H S, Ke L, Cao Z R. Size-fractionated phytoplankton biomass and productivity in the Zhujiang River Estuary in China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(6): 180-186.
- [22] Miller C B. Habitat determinants of primary production in the sea//Miller C B, ed. *Biological Oceanography*. Oxford: Blackwell Publishing, 2004: 46-68.
- [23] Nelson D M, Dortch Q. Silicic acid depletion and silicon limitation in the plume of the Mississippi River: evidence from studies in spring and summer. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 136: 163-178.
- [24] Codispoti L A. Phosphorus vs. nitrogen limitation of new and export production//Berger W H, Smetacek V S, Wefer G, eds. *Productivity of the Ocean: Present and Past*. Chichester: Wiley, 1989: 377-408.
- [25] Moore J K, Doney S C, Glover D M, Fung I Y. Iron cycling and nutrient-limitation patterns in surface waters of the World Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2002, 49(1): 463-507.
- [26] Fu M Z, Wang Z L, Sun P, Li Y, Li R X. Size structure and potential export of phytoplankton primary production in the southern Huanghai (Yellow) Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(6): 100-109.
- [27] Thorry-Smith M. West Indian Ocean phytoplankton-numerical investigation of phytohydrographic regions and their characteristic phytoplankton associations. *Marine Biology*, 1971, 9(2): 115-137.
- [28] Yatsuka S. Size distribution of photosynthesizing phytoplankton in the Indian Ocean. *The Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1964, 19(4): 187-189.

参考文献:

- [1] 刘子琳, 陈忠元, 周蓓锋, 张涛, 丁涛. 西北太平洋副热带环流区秋季水体叶绿素a分布及粒级结构. *东海海洋*, 2004, (4): 17-23.
- [4] 沈国英, 施并章. 海洋初级生产力//沈国英, 施并章. *海洋生态学(第二版)*. 北京: 科学出版社, 2002: 197-207.
- [8] 王凤钦. 海洋环流//冯士筰, 李凤岐, 李少菁. *海洋科学导论*. 北京: 高等教育出版社, 1999: 144-280.
- [13] 国家技术监督局. *海洋调查规范 GB/T 12763.6—2007*. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [19] 蔡昱明, 宁修仁, 朱根海, 史君贤. 南极普里兹湾浮游植物现存量与初级生产力粒级结构和新生产力研究. *海洋学报*: 中文版, 2005, 27(4): 135-147.
- [21] 黄邦钦, 洪华生, 柯林, 曹振锐. 珠江口分粒级叶绿素a和初级生产力研究. *海洋学报*, 2005, 27(6): 180-186.
- [26] 傅明珠, 王宗灵, 孙萍, 李艳, 李瑞香. 南黄海浮游植物初级生产力粒级结构与碳流途径分析. *海洋学报*, 2009, 31(6): 100-109.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31 ,No. 16 August, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

- A comparative study on the diversity of rhizospheric bacteria community structure in constructed wetland and natural wetland with reed domination WANG Zhongqiong, WANG Weidong, ZHU Guibing, et al (4489)
- Light response of photosynthesis and its simulation in leaves of *Prunus sibirica* L. under different soil water conditions LANG Ying, ZHANG Guangcan, ZHANG Zhengkun, et al (4499)
- Effects of colour shading on the yield and main biochemical components of summer-autumn tea and spring tea in a hilly tea field QIN Zhimin, FU Xiaoqing, XIAO Runlin, et al (4509)
- Effects of cadmium on the contents of phytohormones, photosynthetic performance and fluorescent characteristics in tobacco leaves WU Kun, WU Zhonghong, TAI Fujie, et al (4517)
- Comparative physiological responses of cadmium stress on *Enteromorpha clathrata* and *Enteromorpha linza* JIANG Heping, ZHENG Qingsong, ZHU Ming, et al (4525)
- Effects of salt stress on glucosinolate contents in *Arabidopsis thaliana* and *Thellungiella halophila* rosette leaves PANG Qiuying, CHEN Sixue, YU Tao, et al (4534)
- Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field GAO Jusheng, CAO Weidong, LI Dongchu, et al (4542)
- Nitrogen balance in the farmland system based on water balance in Hetao irrigation district, Inner Mongolia DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al (4549)
- Seed characteristics and seedling growth of *Spartina alterniflora* on coastal wetland of North Jiangsu XU Weiwei, WANG Guoxiang, LIU Jin'e, et al (4560)
- Assessment of non-point source pollution export from Zigui county in the Three Gorges Reservoir area using the AnnAGNPS model TIAN Yaowu, HUANG Zhilin, XIAO Wenfa (4568)
- Effects of Cadmium pollution on oxidative stress and metallothionein content in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) in different habitats ZHANG Zhengtian, PANG Zhenling, XIA Min, et al (4579)
- The distribution of size-fractionated chlorophyll a in the Indian Ocean South Equatorial Current ZHOU Yadong, WANG Chunsheng, WANG Xiaogu, et al (4586)
- Change of waterbird community structure after the intertidal mudflat reclamation in the Yangtze River Mouth: a case study of NanHui Dongtan area ZHANG Bin, YUAN Xiao, PEI Enle, et al (4599)
- Application of fish assemblage integrity index(FAII) in the environment quality assessment of surf zone of Yangtze River estuary MAO Chengze, ZHONG Junsheng, JIANG Rijin, et al (4609)
- Population age structure of Antarctic krill *Euphausia superba* off the northern Antarctic Peninsula based on fishery survey ZHU Guoping, WU Qiang, FENG Chunlei, et al (4620)
- Validation and adaptability evaluation of rice growth model ORYZA2000 in double cropping rice area of Hunan Province MO Zhihong, FENG Liping, ZOU Haiping, et al (4628)
- Coupled energy and carbon balance analysis under dryland tillage systems WANG Xiaobin, WANG Yan, DAI Kuai, et al (4638)
- The nitrate-nitrogen leaching amount in paddy winter-spring fallow period WANG Yongsheng, YANG Shiqi (4653)
- The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake NI Zhaokui, LI Yuejin, WANG Shengrui, et al (4661)
- Effect of partial solar eclipse on airborne culturable bacterial community in Urumqi MA Jing, SUN Jian, ZHANG Tao, et al (4671)
- Comparative study on density related intra- and inter-specific effects in *Laodelphax striatellus* (Fallen) and *Nilaparvata lugens* (Stål) LÜ Jin, CAO Tingting, WANG Liping, et al (4680)
- Behavior rhythm and seasonal variation of time budget of sun bear (*Helarctos malayanus*) in captivity LAN Cunzi, LIU Zhenheng, WANG Aishan, et al (4689)
- Disturbance regimes and gaps characteristics of the desert riparian forest at the middle reaches of Tarim River HAN Lu, WANG Haizhen, CHEN Jiali, et al (4699)
- Death causes and conservation strategies of the annual regenerated seedlings of rare plant, *Bretschneidera sinensis* QIAO Qi, QIN Xinsheng, XING Fuwu, et al (4709)
- Effects of municipal compost extracted complex microbial communities on physio-ecological characteristics of turfgrass under drought stress DUO Lian, WANG Jingjing, ZHAO Shulan (4717)
- Spatiotemporal relationship of leaf area index simulated by CLM3.0-DGVM and climatic factors SHAO Pu, ZENG Xiaodong (4725)
- Analysis of circular economy of Liaoning Province based on eco-efficiency HAN Ruiling, TONG Lianjun, SONG Yanan (4732)
- Review and Monograph**
- The fungal to bacterial ratio in soil food webs, and its measurement CAO Zhiping, LI Depeng, HAN Xuemei (4741)
- Indicators for evaluating sustainable communities: a review ZHOU Chuanbin, DAI Xin, WANG Rusong, et al (4749)
- Discussion**
- Differential expression of *PAL* multigene family in allelopathic rice and its counterpart exposed to stressful conditions FANG Changxun, WANG Qingshui, YU Yan, et al (4760)
- Scientific Note**
- Ecology study on the benthic animals of QinZhou Bay WANG Di, CHEN Pimao, MA Yuan (4768)
- Change characteristics of soil carbon and nitrogen contents in the Yellow River Delta soil after artificial restoration DONG Kaikai, WANG Hui, YANG Liyuan, et al (4778)
- Estimation and spatial pattern analysis of forest biomass in Fenglin Nature Reserve based on Geostatistics LIU Xiaomei, BU Rencang, DENG Huawei, et al (4783)
- Study on sap flow in forest of *Quercus liaotungensis* and *Populus davidiana* by using the TDP method SUI Xuhong, ZHANG Jianjun, WEN Wanrong (4791)
- N_2O Emission and its driving factors from typical marsh and shrub swamp in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China SHI Lanying, MU Changcheng, TIAN Xinmin, et al (4799)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

*《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次, 全国排名第 1; 影响因子 1.812, 全国排名第 14; 第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊; 中国精品科技期刊

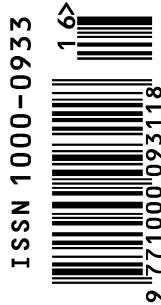
编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 16 期 (2011 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 16 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址: 北京海淀区双清路 18 号 邮政编码: 100085 电话: (010) 62941099 www. ecologica. cn shengtaixuebao@ rcees. ac. cn	Edited by Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010) 62941099 www. ecologica. cn Shengtaixuebao@ rcees. ac. cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址: 北京海淀区双清路 18 号 邮政编码: 100085	Sponsored by Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科学出版社 地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published by Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科学出版社 地址: 东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717 电话: (010) 64034563 E-mail: journal@ cspg. net	Distributed by Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010) 64034563 E-mail: journal@ cspg. net
订 购	全国各地邮局	Domestic All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044	Foreign China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号	



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元