

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

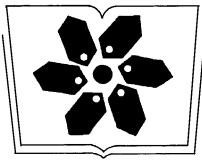
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第7期 Vol.33 No.7 **2013**

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

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 7 期

2013 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 线虫转型发育和寄主识别的化学通讯研究进展..... 张 宾,胡春祥,石 进,等 (2003)
- 生物物种资源监测原则与指标及抽样设计方法..... 徐海根,丁 晖,吴 军,等 (2013)

个体与基础生态

- 呼伦贝尔草原人为火空间分布格局..... 张正祥,张洪岩,李冬雪,等 (2023)
- 青藏高原草地地下生物量与环境因子的关系..... 杨秀静,黄 玫,王军邦,等 (2032)
- 1961—2010 年桂林气温和地温的变化特征 陈 超,周广胜 (2043)
- 黄泥河自然保护区狗冬季卧息地选择..... 朱洪强,葛志勇,刘 庚,等 (2054)
- 青藏高原草地植物叶解剖特征..... 李全发,王宝娟,安丽华,等 (2062)
- 青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应..... 徐满厚,薛 娴 (2071)
- 高温影响番茄小孢子发育的细胞学研究..... 彭 真,程 琳,何艳军,等 (2084)
- 黄土丘陵半干旱区柠条林株高生长过程新模型..... 赵 龙,王振凤,郭忠升,等 (2093)
- 柞属 7 种植物种子的发芽抑制物质研究..... 李庆梅,刘 艳,刘广全,等 (2104)
- 水分胁迫和杀真菌剂对黄顶菊生长和抗旱性的影响..... 陈冬青,皇甫超河,刘红梅,等 (2113)
- 铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较..... 沈章军,欧祖兰,田胜尼,等 (2121)
- 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化..... 李 媛,程积民,魏 琳,等 (2131)
- 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响..... 周振江,牛晓丽,李 瑞,等 (2139)
- 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响..... 李 娟,廖洪凯,龙 健,等 (2147)
- 自生固氮菌活化土壤无机磷研究..... 张 亮,杨宇虹,李 倩,等 (2157)
- 德国鳶尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性 张呈祥,陈为峰 (2165)
- 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性..... 铁 梅,宋琳琳,惠秀娟,等 (2173)
- 基于叶面积指数改进的直角双曲线模型在玉米农田生态系统中的应用..... 孙敬松,周广胜 (2182)
- 中稻田三种飞虱的捕食性天敌优势种及农药对天敌的影响..... 林 源,周夏芝,毕守东,等 (2189)

种群、群落和生态系统

- 珠江口超微型浮游植物时空分布及其与环境因子的关系..... 张 霞,黄小平,施 震,等 (2200)
- 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系..... 陈永金,刘加珍,陈亚宁,等 (2212)
- 南海西北部陆架区鱼类的种类组成与群落格局..... 王雪辉,林昭进,杜飞雁,等 (2225)
- 滇西北高原碧塔湖滨沼泽植物群落分布与演替 韩大勇,杨永兴,杨 杨 (2236)
- 石羊河下游白刺灌丛演替过程中群落结构及数量特征..... 靳虎甲,马全林,何明珠,等 (2248)

资源与产业生态

- 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响..... 郑成岩,于振文,张永丽,等 (2260)

豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响..... 张达斌,姚鹏伟,李 婧,等 (2272)

沟壑全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响..... 李 荣,侯贤清,贾志宽,等 (2282)

城乡与社会生态

北京北护城河河岸带的温湿度调节效应 吴芳芳,张 娜,陈晓燕 (2292)

西安太阳总辐射时空变化特征及对城市发展的响应..... 张宏利,张纳伟锐,刘敏茹,等 (2304)

研究简报

安徽琅琊山大型真菌区系多样性..... 柴新义,许雪峰,汪美英,等 (2314)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2320)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-04



封面图说: 金灿灿的小麦熟了——小麦是世界上最早栽培的农作物之一,是一种在世界各地广泛种植的禾本科植物,起源于中东地区。全世界大概有 43 个国家,近 35%—40% 的人口以小麦为主要粮食。小麦是禾谷类作物中抗寒能力较强的越冬作物,具有一定的耐旱和耐盐碱能力。中国的小麦分布于全国各地,主要集中于东北平原、华北平原和长江中下游一带。小麦秋季播种、冬季生长、春季开花、夏季结实。子粒含有丰富的淀粉、较多的蛋白质、少量的脂肪,还有多种矿物质元素和维生素 B,是一种营养丰富、经济价值较高的粮食。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112151923

张霞, 黄小平, 施震, 叶丰, 刘庆霞. 珠江口超微型浮游植物时空分布及其与环境因子的关系. 生态学报, 2013, 33(7): 2200-2211.

Zhang X, Huang X P, Shi Z, Ye F, Liu Q X. Spatial and temporal variation of picophytoplankton in the Pearl River Estuary. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2200-2211.

珠江口超微型浮游植物时空分布及其与 环境因子的关系

张 霞, 黄小平*, 施 震, 叶 丰, 刘庆霞

(中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室, 广东 510301)

摘要:对珠江口及近海区域进行了夏季和冬季超微型浮游植物(0.2—3 μm)调查,分析了其时空分布及其与环境因子的关系。夏季,珠江口浮游植物密度与磷酸盐成显著正相关,且 N/P 远远高于 30,表明浮游植物受到 P 限制。夏季超微型藻数量比冬季高一个数量级,其丰度与盐度成显著正相关而和营养盐(溶解性无机氮(DIN), $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_4\text{-Si}$)显著负相关,表明珠江口超微型藻受到径流的负面影响,表现出其数量在虎门附近海域低,随着咸淡水混合程度的加剧逐渐增大的分布特征;超微型浮游植物叶绿素 a 在总叶绿素 a 中的比例也表现为河口上游低,到万山群岛附近海域达到最大,推测近海高光照、低营养盐更适宜超微型藻的生长,同时也说明超微型浮游植物适应贫营养环境的生态特点。

关键词:珠江口;浮游植物;超微型藻;相关分析;多元线性回归分析

Spatial and temporal variation of picophytoplankton in the Pearl River Estuary

ZHANG Xia, HUANG Xiaoping*, SHI Zhen, YE Feng, LIU Qingxia

State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

Abstract: Picophytoplankton are distributed worldwide and are ubiquitous in all types of waters of varying trophic state. They are the major players in carbon production and form the base of complex microbial food webs. It is generally known that picophytoplankton have a competitive advantage when nutrients are limited. In recent years, picophytoplankton (0.2—2 μm) have received increasing attention in coastal and nutrient-rich waters. However, information on the dynamic of the picophytoplankton community and the response of picophytoplankton along the environmental gradient induced by river discharge are relatively scarce in the Pearl River Estuary (PRE). In this study, the abundance and distribution of picophytoplankton were studied in the PRE during two cruises in August 2010 (high river discharge) and January 2011 (low river discharge) using epifluorescence microscope technique. The associations between picophytoplankton, size-fractionated chlorophyll *a* and phytoplankton, salinity, nutrients and other environmental variables were examined. Multiple linear regression analysis was also used to determine which environmental factors were significantly correlated with the abundance of phytoplankton and picophytoplankton in the two distinct seasons. Our results showed that phytoplankton community generally was dominated by some freshwater algal species in the upper estuary while estuarine species *Skeletonema costatum* in the middle and downstream of the estuary. In the summer, phytoplankton density was significantly related with phosphate concentration and N/P ratios were much larger than 30 simultaneously. It suggested that the growth of phytoplankton was limited by P in the summer in PRE. Temporally, the averaged density of picophytoplankton was always

基金项目:国家自然科学基金项目(31000185;40776086);中国科学院南海海洋研究所青年人才领域前沿项目(SQ201109);中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCXZ-YW-Q07)

收稿日期:2011-12-15; 修订日期:2012-07-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xphuang@scsio.ac.cn

higher in the summer (2.67×10^4 cells/mL) than in the winter (1.60×10^3 cells/mL), which probably due to high turbidity and low temperature in winter. Consistent with other studies, picophytoplankton abundance was positively correlated with temperature in PRE. It maybe reflect the growth of picoplankton was strongly dependent on water temperature. Picophytoplankton numbers in our study were much lower than that in the Chesapeake Bay, the Changjiang Estuary while higher than the Jiaozhou Bay. These differences may be attributed to various light regime, nutrient structure and zooplankton predation between these estuarine ecosystems. In the present investigations, picophytoplankton density was very low near the Humen outlet and increased along the salinity gradient, to reach its maximal value at southernmost stations in two seasons. The abundance of picophytoplankton was positively related with salinity and inversely with inorganic nutrients, implying the negative influence of the riverine and coastal waters on picophytoplankton and the oligotrophic ecological niche of picophytoplankton. And hence, it presented such spatial distribution pattern. As with picophytoplankton abundance, the proportion of pico-chl. *a* of total chl. *a* increased from the upstream of the estuary to the near-shore open water (Wanshan islands), where picophytoplankton growth was probably promoted by high light intensity and low levels of nutrients. The average and maximum proportion of pico-chl. *a* in summer was 11.9% and 26.3%, respectively. Our results suggested that picophytoplankton assemblage was an important primary producer in the PRE. Multiple linear regression equations of picophytoplankton revealed that phosphate and suspended solid concentration (SSC) were the crucial factors shaping picoalgae distribution in the PRE. In our observation, picophytoplankton was negatively related to phytoplankton, suggested a potential competition between these two groups or their diverse ecological niches adapted to specific environment conditions. How light and nutrients involved in interaction of these two groups are considered as a direction requiring further research.

Key Words: Pearl River Estuary; phytoplankton and picophytoplankton; seasonal and spatial variation; lineal correlation; Multiple linear regression

超微型浮游植物 ($0.2-2 \mu\text{m}$) 是迄今发现的最小的自养光合生物^[1], 主要类群包括聚球藻 (*Synechococcus*)、原绿球藻 (*Prochlorococcus*)、超微型真核浮游生物 (pico-eukaryote)。自 20 世纪 70 年代末被发现以来, 各国研究者对其在水生态系统中的分布和作用开展了大量细致深入的工作。超微型浮游植物广泛分布于包括南极在内的各种水体中, 在物质循环和能量流动中起着十分重要的作用^[2]。相对较大的浮游植物种类, 超微型藻具有更小的营养吸收半饱和常数、更高的生产效率, 因而表现出更强的竞争力^[3]。虽然个体微小, 个体生物量不高, 但仍然可以维持相当高的生产力。尤其在贫营养的大洋中超微型浮游植物常占据浮游植物的大部分数量, 是初级生产力非常重要的贡献者^[4]。

作为微食物环的起点, 超微型浮游植物被原生动物 (如异养鞭毛虫或纤毛虫) 摄食后进入微食物环, 再通过桡足类等后生浮游动物的捕食进入经典食物网, 所以超微型浮游植物在很大程度上影响着渔业产量。因此, 超微型浮游植物在海洋生态系统中的作用倍受研究者的重视。我国自 20 世纪 90 年代早期也开始了海洋超微型浮游植物种类、数量、生产力、分布模式以及与环境因子关系的相关研究, 已报道的研究区域包括我国的东海^[5]、黄海^[6]、南海北部^[7-8]、厦门海域^[9]、台湾海峡^[10]和长江口^[11]等海域, 相对来说, 河口生态系统中超微型浮游植物的研究非常缺乏。

很多河口包括珠江口浮游植物生长的主要限制因子是磷酸盐和光的可利用^[12-13], 而盐度则对浮游植物的空间分布起着决定性的作用^[14-15]。超微型浮游植物是否与其他浮游植物一样受到这些环境因子的调控, 它们与小型 ($>20 \mu\text{m}$)、微型 ($3-20 \mu\text{m}$) 浮游植物的关系如何, 这些都是亟待解决的问题。

本研究通过调查珠江口丰水期和枯水期浮游植物种类组成、粒级结构和丰度分布, 研究超微型浮游植物丰度、空间分布格局及其环境调控机制, 探讨不同粒径大小的浮游植物之间的关系, 在不同的季节调控的环境因素是否相同, 为系统地研究河口沿岸带和近海区域微食物网结构的空间和季节变化提供科学资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域和样品采集

2010 年 8 月 13—8 月 17 日(夏季)和 2011 年 1 月 6—11 日(冬季)在珠江口海域进行了两个航次观测。共设置 3 个断面,夏季布设 21 个采样点(A1—A8, B1—B7, C1—C6),冬季 19 个(B7, C6 因天气原因未采),站位布设见图 1。A 断面位于伶仃洋中部,从虎门延伸至万山群岛;B 断面位于伶仃洋西部,受径流输入的影响显著;C 断面位于东部海域,海洋动力作用占主导地位。

1.2 样品采集和处理

用 5 L Niskon 采水器采集表层水样,用于超微型浮游植物计数的水样经 20 μm 筛绢过滤后,立即注入 2 mL 冻存管,加 40% 无颗粒甲醛固定,每个站位取 3 个平行样,放入液氮罐保存,带回实验室后转移到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存至分析(3 个月内完成)。用于浮游植物种类计数的 1 L 水加入鲁哥氏液,避光保存。

用事先高温烘烤过的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤 0.5—1 L 水样,滤膜滤液冷冻保存,滤液用于无机营养盐的测定,滤膜用于测定悬浮颗粒物浓度。分粒级叶绿素样品依次用 20 μm 、3 μm 和 0.7 μm 膜分级过滤(超微型藻: 0.2—3 μm ; 微型藻: 3—20 μm ; 小型藻 >20 μm)^[16],过滤体积为 1—2 L,滤膜冷冻避光保存。

1.3 理化因子分析

水温、盐度等用 YSI85 型水质检测仪在现场监测。悬浮物浓度依据重量法测定;营养盐浓度测定方法参照《海洋化学调查技术规程》^[17],硝酸盐 $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用 Zn-Cd 还原法、亚硝酸盐 $\text{NO}_2\text{-N}$ 用萘乙二胺分光光度法、氨盐 $\text{NH}_4\text{-N}$ 采用水杨酸分光光度法、磷酸盐用磷钼蓝法,硅酸盐用硅钼蓝法。叶绿素 a 用荧光分光光度法测定。

1.4 浮游植物的计数

浮游植物 1 L 水样静置沉淀 24 h 后,去除上层清液,使沉淀物体积为 30—50 mL。将浓缩好的样品充分摇匀,吸出 0.1 mL,注入计数框。在显微镜下,以 40 倍物镜下观察计数,换算出浮游植物密度。超微型浮游植物的计数方法按照《海洋调查规范 第 6 部分:海洋生物调查》实施(GB/T12763.6—2007)^[18]进行。取 4 mL 固定后的水样,经孔径为 0.2 μm 的黑色核孔滤膜(Whatman)过滤后制片。载玻片于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱冷冻保存直至分析^[19]。用 Olympus 51 落射荧光显微计数,在绿光(510—560nm)激发,40 倍物镜下观察,每片计数不少于 20 个视野。

1.5 数据处理

超微型浮游植物数量、浮游植物密度与环境因子的相关性分析采用 Pearson 相关性系数,而多元线性回归方程的建立选用逐步法筛选自变量,以 $P < 0.05$ 判断模型是否可用,所有数据的统计分析在 SPSS 17.0 软件中进行。

2 结果

2.1 物理环境因素

夏季珠江口的水温变化范围为 $29.5\text{—}32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均 $30.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。沿河口到近海温度逐渐降低,口门水温较

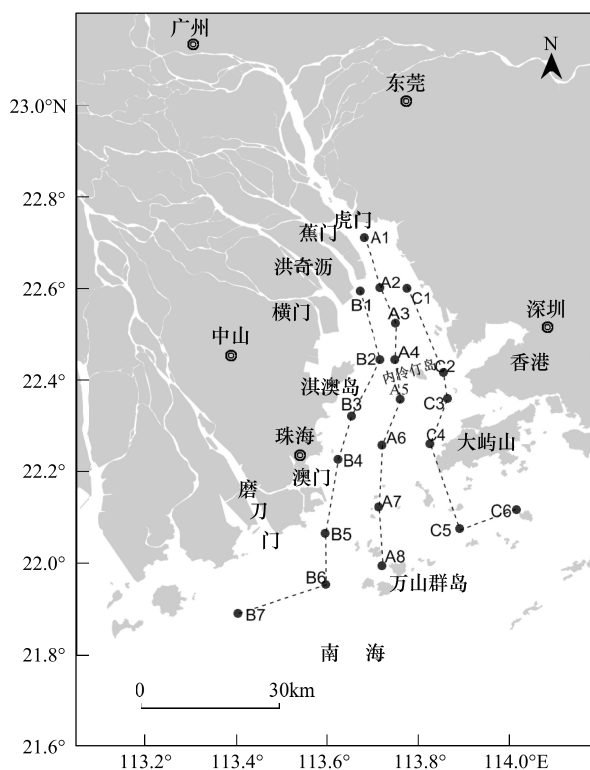


图 1 研究区域及采样站位

Fig. 1 Study area and sampling stations

近海区域高 1—2 ℃。冬季珠江口水温变化范围是 13.8—17.8 ℃,平均 15.6 ℃,河口上游水温比下游略低。

夏季,由于珠江河水通量远远大于局地潮汐作用,径流冲淡水几乎占据了整个河口表面,因此夏季盐度低于冬季。夏季盐度的平均值为 14.0,变化范围为 0.2—28.3,盐度最低值出现在虎门附近,自河口向外逐渐增加。冬季径流量较少,珠江口内盐度均值为 25.7,最低盐度值出现在 B1 站位,最高值在万山群岛至香港大屿山附近海域的 C5 站,为 33.4 (图 2)。

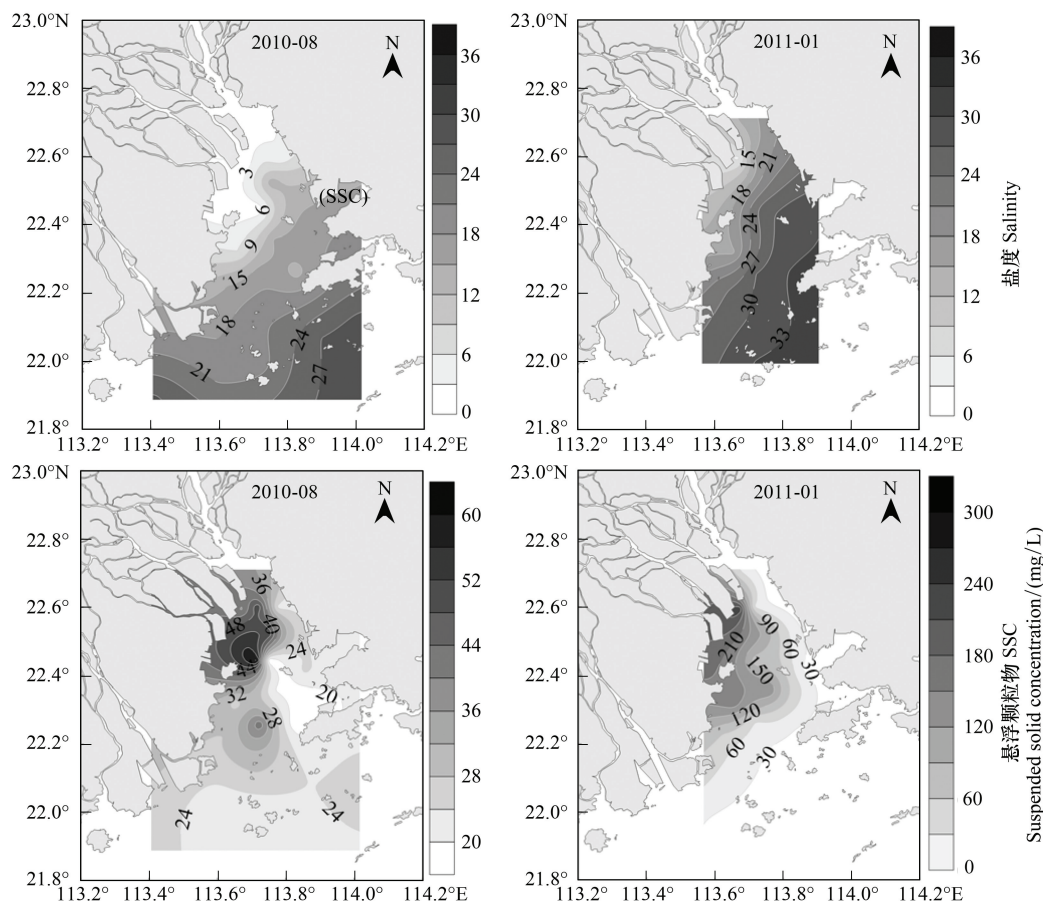


图 2 珠江口盐度和悬浮颗粒物浓度分布

Fig. 2 Horizontal distribution of salinity and suspended solid content at the surface water

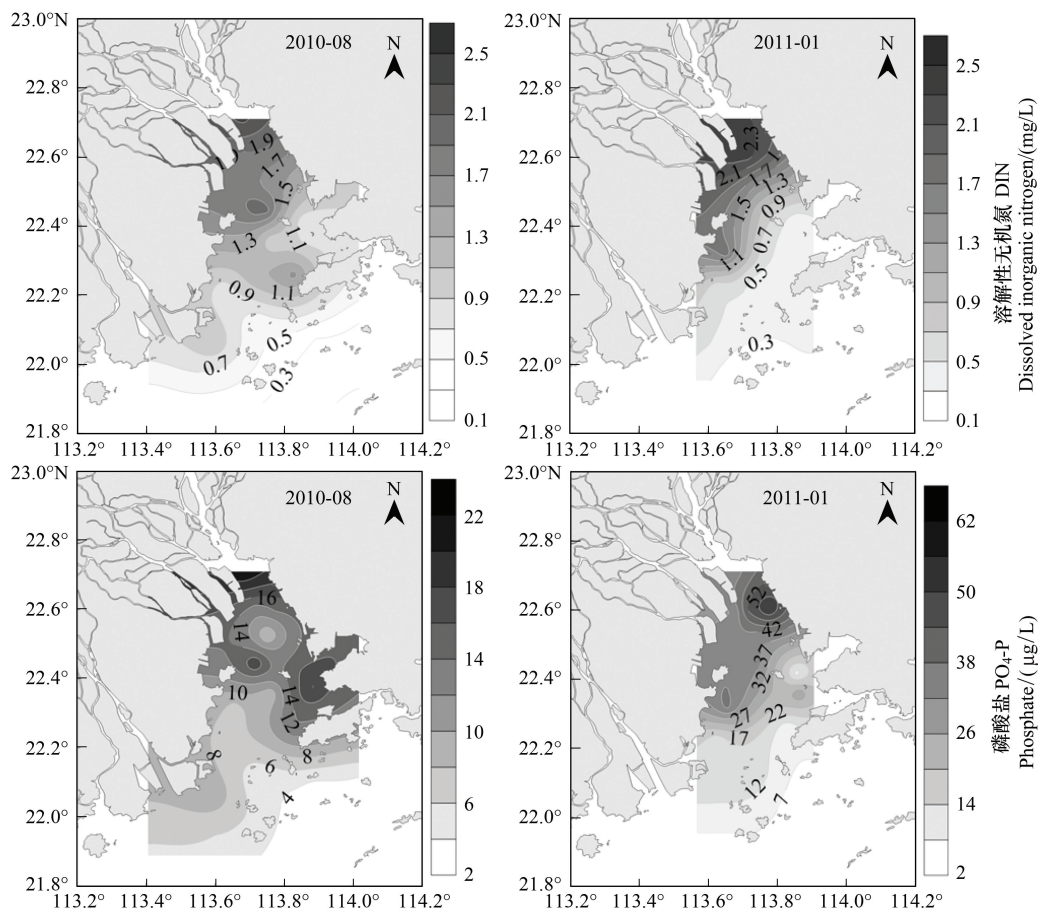
悬浮物浓度(SSC)夏季的平均值为 30.23 mg/L (范围 16.97—60.73 mg/L),最大值出现在淇澳岛东北部的 B2 站,最小值在大屿山附近海域 C4 点。冬季 SSC 数值比夏季高,均值为 81.43 mg/L (范围 18.51—288.40 mg/L),最大值在蕉门附近的 B1 站位,最小值则位于万山群岛海域的 A8 站(图 2)。

2.2 无机营养盐

夏季和冬季溶解性无机氮是亚硝酸盐、硝酸盐和氨氮之和($\text{DIN} = \text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$)、磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)和硅酸盐($\text{SiO}_4\text{-Si}$)浓度的变化趋势基本一致,最高值出现在虎门海域,沿盐度梯度逐渐减小(图 3),夏季珠江口虎门海域 A1 站位 DIN 含量最大,为 2.35 mg/L,到大屿山南部海域 C6 站位浓度降为 0.29 mg/L;冬季北部海域 A1、A2、B1、C1 点的 DIN 浓度都很高,均大于 2 mg/L,到万山群岛附近的 A8 点则降低到 0.1 mg/L(图 3)。磷酸盐夏季的最大值 22.05 $\mu\text{g/L}$ 出现在 A1 点,最小值 2.63 $\mu\text{g/L}$ 出现在 C5 站;冬季磷酸盐的变化幅度较剧烈,最高 53.23 $\mu\text{g/L}$ (A2 站),最低 3.30 $\mu\text{g/L}$ (C5 站)。硅酸盐只在冬季测定,其分布趋势与磷酸盐非常相近,变化范围为 0.66—2.49 mg/L (图 3)。

2.3 浮游植物和分粒级叶绿素 a 的时空变化

夏季和冬季 2 个航次共发现浮游植物 84 种,隶属 6 门,58 属。其中硅藻门的种类最多为 36 种(27 属),

图3 珠江口 DIN 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度分布图Fig. 3 Horizontal distribution of DIN and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration at the surface water)

其次绿藻门有 26 种(15 属),蓝藻门 11 种(8 属),甲藻门 7 种(5 属),隐藻门 4 种(3 属)。

夏季珠江口浮游植物的密度范围为 0.30×10^3 — 6.63×10^3 个/mL,平均 1.76×10^3 个/mL,最高值在 A1 站,最低值在 B7 站;夏季虎门附近海域浮游植物以蓝藻门和绿藻门中的淡水藻类,如微囊藻(*Microcystis*)、席藻(*Phormidium*)、平裂藻(*Merismopedia*)、颤藻(*Oscillatoria*)和栅藻(*Scenedesmus*)占优势,到近海海域,转为以硅藻门的广温广盐种类——中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)占绝对优势(图 4)。

冬季浮游植物密度较低,均值为 0.56×10^3 个/mL,整个珠江口内部都以一种微型隐藻——伸长斜片藻(*Plagioselmis prolunga*)为优势种,到近海海域时,中肋骨条藻所占比例有所升高(图 4)。

超微型浮游植物夏季的平均数量(2.67×10^4 个/mL)远远高于冬季(1.60×10^3 个/mL),两个季节数量空间分布特征基本一致,均表现为受径流控制的内伶仃岛以北海域数量较低,随着盐度梯度逐渐增加(图 5),到万山群岛附近升高到 8.49×10^4 个/mL(夏季)和 3.17×10^4 个/mL(冬季)。

夏季珠江口总叶绿素 a(chl. a)浓度范围 0.87—17.03 $\mu\text{g/L}$,平均浓度 7.16 $\mu\text{g/L}$,高值区主要位于香港大屿山附近海域。冬季整个珠江口叶绿素 a 浓度很低,平均仅为 0.53 $\mu\text{g/L}$ 。两个季节绝大多数站位的分级叶绿素浓度均为小型浮游植物(micro-chl. a)最高,其次为微型浮游植物(nano-chl. a),超微型浮游植物(pico-chl. a)最低,但是冬季微型浮游植物占总 chl. a 的比例(33.09%)高于夏季(27.39%),说明冬季微型隐藻在浮游植物群落中的优势地位。两个季节超微型浮游植物 chl. a 浓度以及占总浮游植物 chl. a 的比例与其数量空间分布趋势一致,即随着盐度增加逐渐升高(图 6)。

2.4 浮游植物空间分布与环境因子的关系

夏季影响浮游植物空间分布的环境因子为磷酸盐浓度,二者成正比(图 7)。以浮游植物密度为变量的多

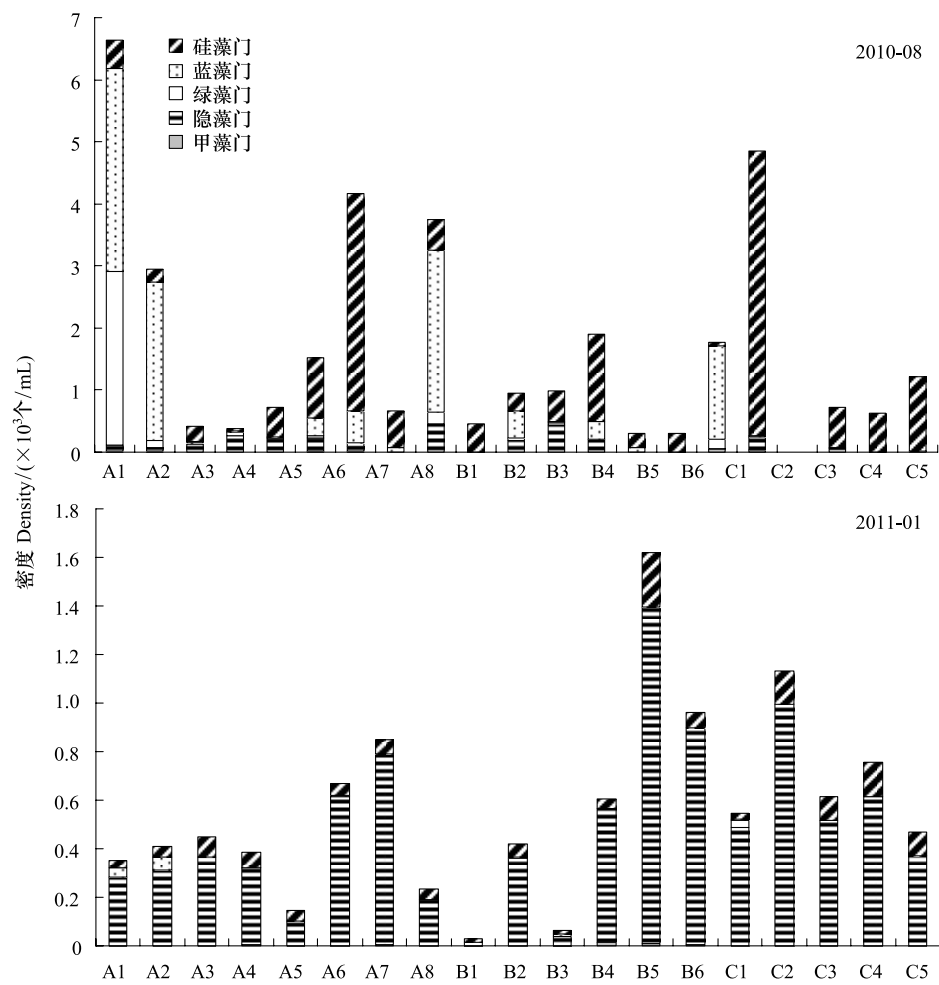


图4 珠江口3个断面浮游植物密度分布图

Fig.4 Phytoplankton density in different sites in the Pearl River Estuary

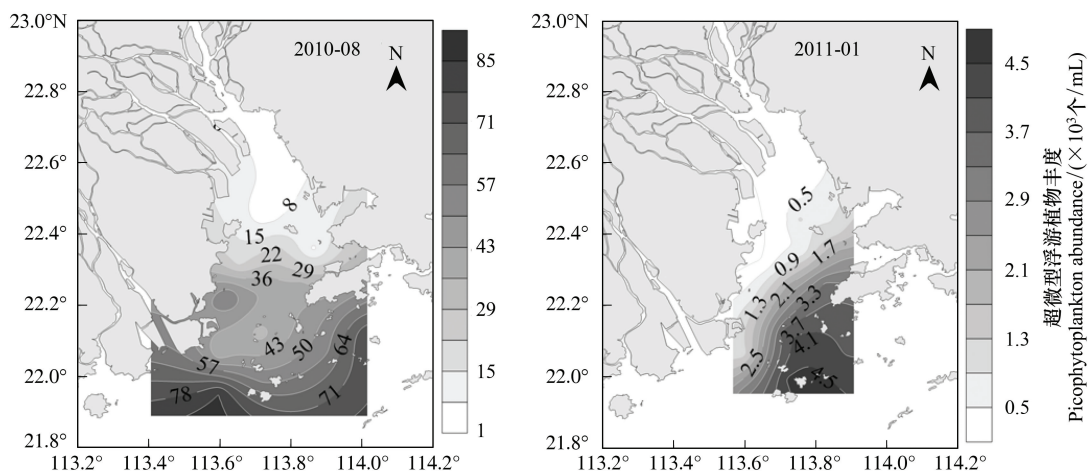


图5 珠江口超微型浮游植物丰度分布图

Fig.5 Distribution of picophytoplankton abundance in the Pearl River Estuary

元回归线性方程为:

$$\text{Phyto} = 0.185 [\text{PO}_4\text{-P}] - 0.151 \quad (r = 0.519, P < 0.05)$$

夏季超微型浮游植物的数量与无机营养盐,包括 $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 负相关,而与盐度、水深

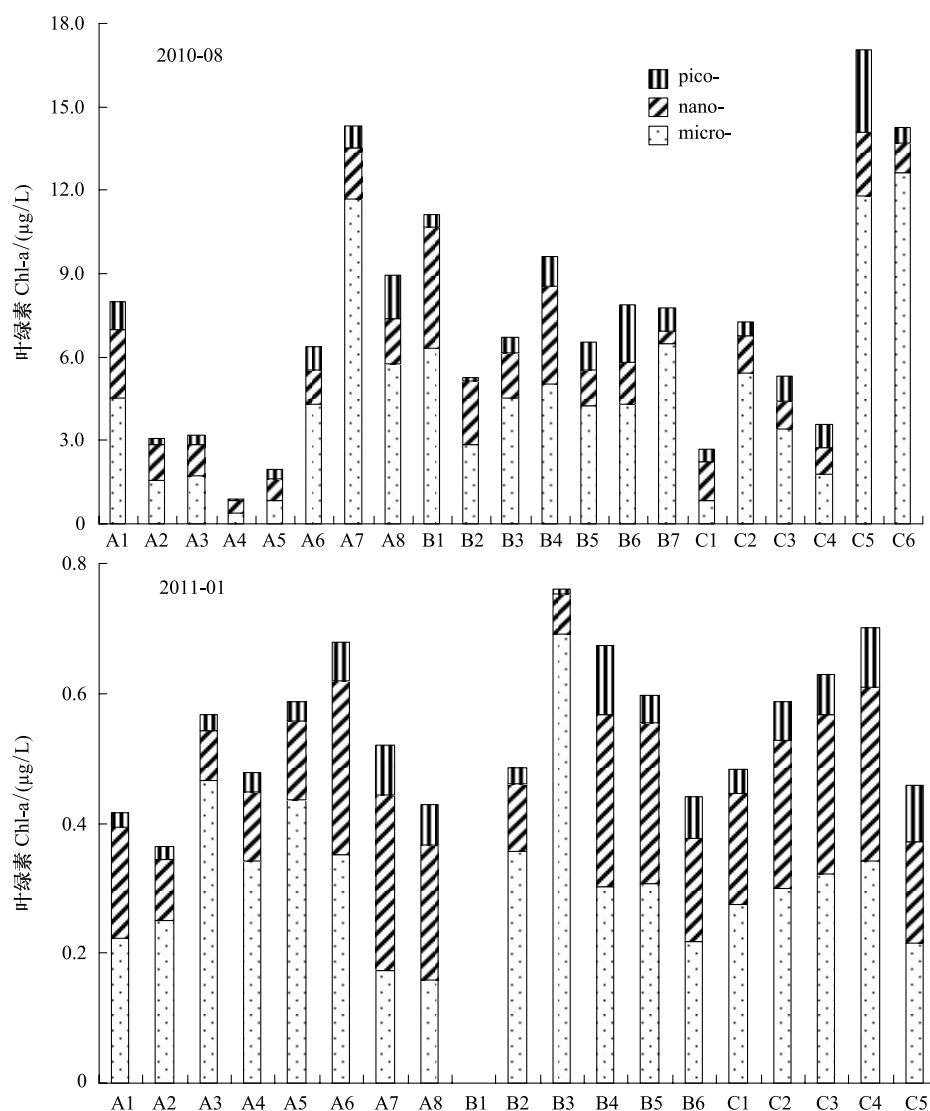


图6 珠江口分级叶绿素 a 浓度分布图

Fig. 6 Distribution of size-fractionated chlorophyll a concentration in the Pearl River Estuary

和 pico-chl. a 成正比(图 7); 以超微型浮游植物密度为变量的多元回归线性方程为:

$$\text{Pico} = -0.288 [\text{PO}_4\text{-P}] + 5.780 \quad (r=0.653, P < 0.01)$$

冬季浮游植物与营养盐、悬浮物负相关,与盐度及 nano-chl. a 正相关。以浮游植物丰度为变量的多元回归线性方程为:

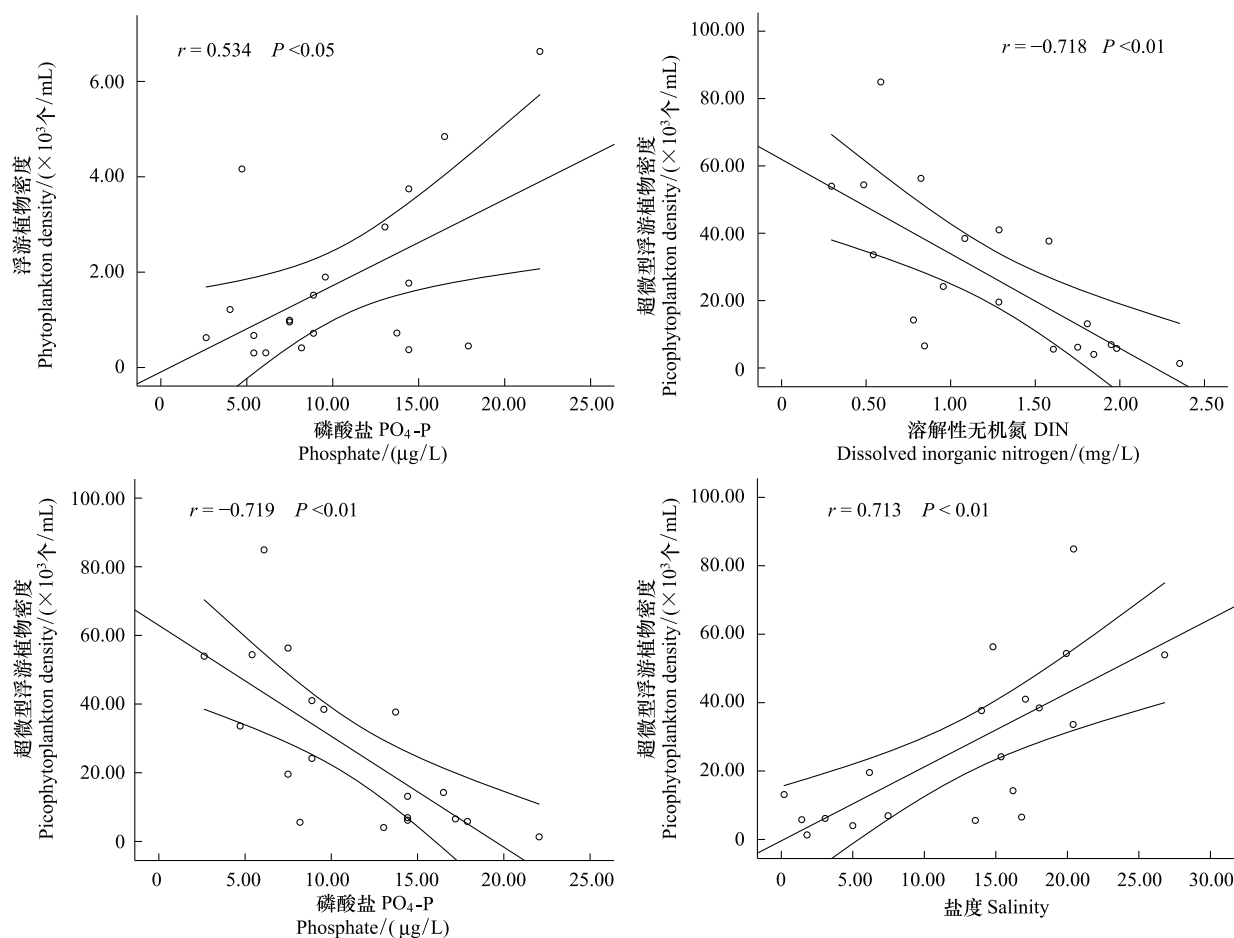
$$\text{Phyto} = -0.002[\text{SSC}] + 0.627 \quad (r=0.723, P < 0.01)$$

冬季超微型浮游植物的数量与悬浮物、无机营养盐(包括 $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{SiO}_4\text{-Si}$, $\text{PO}_4\text{-P}$) 和 micro-chl. a 负相关,而与盐度、水深、水温和 pico-chl. a 成正比(表 1); 以超微型浮游植物密度为变量的多元回归线性方程为:

$$\text{Pico} = -0.735 [\text{PO}_4\text{-P}] - 0.073 [\text{SSC}] + 45.832 \quad (r=0.949, P < 0.01)$$

3 讨论

珠江口海域夏季和冬季营养盐的空间分布特征一致,均表现为近岸高于离岸,硝酸盐、氨氮、硅酸盐和磷酸盐都与盐度显著负相关,表现出很强的保守行为,说明这些无机营养盐的多寡主要由陆源输入控制。本次的调查显示,冬季浮游植物数量与悬浮物浓度成显著负相关,说明浮游植物的生长与光照条件密切相关。在

图7 珠江口夏季浮游植物与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、DIN 和盐度的相关分析Fig. 7 Linear regression of phytoplankton and phosphate concentration, picophytoplankton abundance and DIN concentration, $\text{PO}_4\text{-P}$, salinity in August 2010 of the Pearl River Estuary

河口上游段,尽管营养盐丰富,但由于高浓度的悬沙作用,影响这一水域的透光率,形成浮游植物低水平的现象^[20]。在切萨匹克湾和特拉华河口^[20]以及长江口^[21]都有类似现象。

除海水中营养盐的浓度外,浮游植物的生长与营养盐之间的比例也有关^[22],营养盐比例的变化尤其是 N:P 比值的变化,能决定浮游植物群落的组成,它主要通过影响浮游植物的种间竞争而改变浮游植物的群落结构^[23]。当水体中 N/P (摩尔比)介于 8—30 的范围,浮游植物生长同时受到氮和磷的限制,若 N/P 大于 30,浮游植物受磷的限制,若 N/P 小于 8 则主要受氮的限制^[24]。本次调查海域 N/P 变化较大(夏季为 40.8—335.0,冬季为 27.8—246.5),因受到珠江陆源输入影响,珠江口绝大多数调查站位 N/P 大于 30,显示磷可能是该海域浮游植物生长的潜在限制因子。该结果与其他研究者的一致^[12]。另外,本次调查的结果显示,夏季浮游植物密度与磷酸盐成正相关也反映了珠江口浮游植物受到磷酸盐的限制。

夏季珠江口绝大部分站位的优势种都是中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*)。中肋骨条藻的生活水温为 0—37 °C,在盐度 13—36 的环境中均可生长,但其最适增殖温度为 24—28 °C,最适盐度为 20—30^[25]。因此它在珠江口常年都能生长,常在夏季达到最大丰度^[26]。珠江口海域的硅酸盐一直以来都很丰富,这可能是该海域浮游植物多年来硅藻占优势的一个重要原因。

已有的数据显示,长江口夏季超微型浮游植物的平均数量为 8.2×10^4 个/mL^[11];胶州湾夏季和冬季超微型浮游植物数量分别为 1.72×10^4 和 3.71×10^3 个/mL^[27];切萨匹克湾的超微型浮游植物数量高达 7.2×10^6 个/mL(冬季), 9.2×10^8 个/mL(夏季)^[28];在密西西比河口羽,4 月超微型藻丰度的最大值为 1.95×10^5 个/mL,10 月的最高值为 3.67×10^5 个/mL^[29];在欧洲的 3 个河口生态系统中,超微型藻的数量变化范围分别是 $2.8 \times$

10^3 — 4.2×10^4 个/mL (Krka 河口), 5.0×10^3 — 3.7×10^4 个/mL (Rhône 河口), 1.0×10^3 — 5.0×10^4 个/mL (Lena-Laptev 河口)^[30]。本次调查显示珠江口超微型浮游植物冬季数量明显低于夏季,夏季平均为 2.67×10^4 个/mL,冬季为 1.60×10^3 个/mL,均低于长江口、切萨匹克湾、密西西比河口羽和南海北部^[5]而高于胶州湾,与 3 个欧洲河口生态系的水平相当,数量分布的不同可能与水体光照条件、营养盐结构和浮游动物摄食压力有关^[31]。

表 1 珠江口冬季浮游植物与环境因子的相关性分析

Table 1 Pearson's correlation coefficients between picophytoplankton abundance and environmental factors in January 2011 of the PRE

	DIN	PO ₄ -P	SiO ₄ -Si	T	Sal	SSC	Depth	Micro-chl. a	Nano-chl. a	Pico-chl. a	Pico	Phyto
溶解性无机氮 Dissolved inorganic nitrogen DIN		0.85	0.98	-0.54	-0.92	0.49			-0.54	-0.72	-0.71	-0.49
磷酸盐 Phosphate PO ₄ -P	0.85		0.80	-0.53	-0.66				-0.54	-0.76	-0.74	-0.49
硅酸盐 Silicate SiO ₄ -Si	0.98	0.80		-0.69	-0.95	0.49				-0.77	-0.79	
水温 Temperature T	-0.54	-0.53	-0.69		0.63	-0.65	0.64	-0.57			0.81	
盐度 Salinity Sal	-0.92	-0.66	-0.95	0.63		-0.68			0.51	0.68	0.67	0.58
悬浮物浓度 Wuspended solid concentration SS	0.49		0.49	-0.65	-0.68		-0.51	0.86	-0.57	-0.57	-0.58	-0.59
水深 Water depth Depth				0.64		-0.51		-0.56			0.65	
小型叶绿素 a Micro-chl. a				-0.57		0.86	-0.56				-0.49	
微型叶绿素 a Nano-chl. a	-0.54	-0.54			0.51	-0.57				0.70		0.62
超微型叶绿素 a Picro-chl. a	-0.72	-0.76	-0.77		0.68	-0.57			0.70		0.68	
超微型浮游植物 Picophytoplankton Pico	-0.71	-0.74	-0.79	0.81	0.67	-0.58	0.65	-0.49		0.68		
浮游植物 Phytoplankton Phyto	-0.49	-0.49			0.58	-0.59				0.62		

黑体 $P < 0.01$

在亚热带和热带的贫营养海区,超微型浮游植物的初级生产力中可以占到总初级生产力的 70% 或更多^[32],随着营养水平的升高,超微型藻的数量虽然也有所增加,但其重要性和对浮游植物总生物量的贡献比例却随之减小^[33]。杨燕辉^[27]认为近岸海水的生物、物理和化学特征包括营养盐结构、微量元素以及水体中存在的某些胞外抑制超微型浮游植物生长的物质都可能给其带来负面影响。本次调查超微型浮游植物的平面分布特点表现出:虎门海域的营养盐浓度高,超微型浮游植物叶绿素 a (pico-chl. a) 浓度和超微型浮游植物数量很低,而在近海区域由于河水与寡营养的外海水混合以及生物吸收作用营养盐水平逐渐降低,超微型浮游植物丰度随之升高,该特点与 Mississippi River 河口羽结果一致^[29]。

在胶州湾,pico-chl. a 占总 chl. a 的 23% (年均值),春夏季大,秋冬季小^[27];在切萨匹克湾,超微型、微型和小型浮游植物 chl. a 对总 chl. a 的贡献分别是 15%、41%、44%^[34];英国的 Southampton Water 河口夏季 pico-chl. a 占总 chl. a 最高,分别为 27.7% (河口内部)和 51.4% (近海)^[35]。本次珠江口 pico-chl. a 占总 chl. a 的比例夏季均值为 11.9%,冬季为 9.3%,均低于胶州湾、切萨匹克湾和 Southampton Water 河口,但季节变化模式与几个河口一样,均为夏季高于冬季,说明水温对超微型浮游植物的重要影响;2 个季节珠江口 pico-chl. a 比例最高值均出现在夏季万山群岛附近 (夏季 B6,26.3%;冬季 C5,19.1%) 与 Southampton Water 河口结果一样,有力的证明了珠江口尤其是靠近近海域超微型浮游植物在浮游植物群落中的重要地位。

本次的 2 个航次数据都显示超微型浮游植物的数量与营养盐成负相关,该结果与 Stockner^[36]和 Qiu 等^[16]的结论相同。Qiu 等^[16]认为,珠江口超微型浮游植物的优势种聚球藻 *Synechococcus* 之所以与营养盐成负相关是因为其适应贫营养环境的生态位特点。模拟实验表明,添加氮、磷会抑制超微型浮游植物的生长^[11,37-38]。房潮等研究了超微型浮游植物在不同营养状态下的群落特征,在 $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度 <0.40 mg/L 时,超微型浮游植物丰度随着氮营养盐浓度的升高而增加,当水体 $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度大于 0.40 mg/L 后,超微型浮游植物丰度随着氮营养盐浓度的升高而减少^[39]。本研究中珠江口内受径流影响较大的口门区域浓度都大于 0.40 mg/L,对应的水体中超微型浮游植物的数量较低;在万山群岛附近的近海海域, $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ 基

本都小于 0.40 mg/L,而其数量却很高。

本研究的结果显示,超微型藻和浮游植物密度成负相关(夏季 $P > 0.05$; 冬季 $P < 0.05$),表明不同大小的浮游植物对不同营养水平水体的生理适应机理和生存策略。一般来说,由于超微型浮游植物细胞较小,细胞比表面积较大,代谢活性较高,能量转换速率较大,比粒径较大的藻类具有更高的相对光合速率和对营养盐的摄取速率,因此可以在贫营养的水体中快速生长^[40-41]。要保持 2 d^{-1} 的生长速率,超微型藻对环境 DIN 和磷酸盐的要求仅为 7 nmol/L N 和 0.4 nmol/L P ^[42]。Timmermans 等^[43]的结果证明,自然水体中的 N、P、Fe 的浓度远远高于超微型藻的生长浓度阈值,不可能成为限制因子。因此,微型和微微型藻是大洋区(贫营养水域)的主要类群,而较大的硅藻、甲藻是大陆架、沿岸带(营养盐丰富水域)的优势种^[44]。在本研究中,珠江口的虎门附近主要受径流控制,浮游植物组成以淡水种类为主,到中盐度海域,营养盐和悬浮物含量高,浮游植物(包括超微型藻)受到光照限制,生物量保持低值,而到了万山群岛海域,光照条件好转,无机营养盐尤其是磷酸盐迅速降低,较大的浮游植物种类可能受到 P 的限制,而超微型浮游植物得以迅速繁殖。

4 结论

(1)夏季珠江口浮游植物密度与磷酸盐成正相关,反映出浮游植物受到磷酸盐的限制。

(2)超微型藻的丰度和超微型叶绿素 a 浓度的平面分布均表现出为在虎门海域很低,随着盐度升高而逐渐增加,在近海区域最大的特点。

(3)超微型浮游植物表现出适应贫营养环境的生态位特点。

(4)超微型藻和浮游植物总密度成负相关,表明不同大小的浮游植物对不同营养水平水体的生理适应机理和生存策略。

References:

- [1] Johnson P W, Sieburth, J M. Chroococcoid cyanobacteria in the sea: A ubiquitous and diverse phototrophic biomass. *Limnology and Oceanography*, 1979, 24(5): 928-935.
- [2] Campbell L, Nolla H A, Vaulot D. The importance of *Prochlorococcus* to community structure in the central North Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39(4): 954-961.
- [3] Peng X, Ning X R, Sun J, Le F F. Responses of phytoplankton growth on nutrient enrichments in the northern South China Sea. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 3959-3968.
- [4] Burkill P H, Leaky R J B, Owens N J P, Mantoura, R F C. *Synechococcus* and its importance to the microbial food web in the northwestern Indian Ocean. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1993, 40(3): 773-782.
- [5] Jiao N Z, Yang Y H, Hong N, Ma Y, Harada S, Koshikawa H, Watanabe M. Dynamics in autotrophic picoplankton and heterotrophic bacteria in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 2005, 25(10): 1265-1279.
- [6] Wang M, Bai X G, Liang L T, Wang F, Jiang X J, Guo Y J, Yang F. Summer distribution of picophytoplankton in the North Yellow Sea. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 32(5): 1184-1193.
- [7] Huang B Q, Lin X Y, Liu M, Dai M H, Hong, H S, Li, W. Ecological study of picoplankton in northern South China Sea. *Chinese Oceanology and Limnology*, 2002, 20 (Special Issue): 22-32.
- [8] Pan L A, Zhang J, Chen Q, Deng B. Picoplankton community structure at a coastal front region in the northern part of the South China Sea. *Journal of Plankton Research*, 2006, 28(3): 337-343.
- [9] Chen J X, Huang B Q, Jia X W, Hong H S, Xie T G. Community structure of marine ultraphytoplankton in Xiamen waters using photosynthetic pigments. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(3): 16-21.
- [10] Huang B Q, Hong H S, Lin X J, Chen J X. Ecological study on picophytoplankton in the Taiwan Strait— I. Spatial and temporal distribution and its controlling mechanism. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003(a), 25(4): 72-82.
- [11] Fang T, Li D J, Yu L H, Gao L, Zhang L H. Effect of irradiance and phosphate on growth of nanophytoplankton and picophytoplankton. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 26(9): 2783-2790.
- [12] Yin K, Qian P Y, Chen J C, Hsieh D P, Harrison P J. Dynamics of nutrients and phytoplankton biomass in the Pearl River estuary and adjacent waters of Hong Kong during summer: preliminary evidence for phosphorus and silicon limitation. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 194: 295-305.

- [13] Zhang J, Yu Z G, Wang, J T, Ren J L, Chen H T, Xiong H, Dong L X, Xu W Y. The subtropical Zhujiang (Pearl River) Estuary: Nutrient, trace species and their relationship to photosynthesis. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1999, 49(3): 385-400.
- [14] Wong M W, Townsend D W. Phytoplankton and hydrography of the Kennebec estuary, Maine USA. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 178: 133-144.
- [15] Zhu G H, Ning X R, Cai Y M, Liu Z L, Liu C G. Studies on species composition and abundance distribution of phytoplankton in the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(2): 8-23.
- [16] Qiu D J, Huang L M, Zhang J L, Lin S J. Phytoplankton dynamics in and near the highly eutrophic Pearl River Estuary, South China Sea. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(2): 177-186.
- [17] 908 Project Office of State Oceanic Administration. Specification for marine chemical parameters. Beijing: Ocean Press, 2006: 25-33.
- [18] Standardization Administration of China. GB/ T 12763. 6—2007. Specifications for oceanographic survey— Part 6: Marine biological survey. Beijing: Standards Press of China, 2007: 30-34.
- [19] Booth B C. Estimating cell concentration and biomass of autotrophic plankton using microscopy // Kemp P F, Sherr B F, Sherr E B, Cole J J, eds. *Handbook of Methods In Aquatic Microbial Ecology*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993: 199-205.
- [20] Fisher T R, Harding L W, Stanley D W, Ward L G. Phytoplankton nutrients and turbidity in the Chesapeake, Delaware and Hudson estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1988, 27(1): 61-93.
- [21] Shen Z L. The effects of the physic-chemical environment on the primary productivity in the Yangtze River estuary. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 2000, 11(3): 445-448.
- [22] Dong Y H, Cai J D, Qian H L. Nutrient ratios and its relationship with phytoplankton in the Pearl River Estuary. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28(1): 3-10.
- [23] Qu K M, Chen B J, Yuan Y X, Xin F Y. A preliminary study on influence of N and P on population constituent of planktonic diatoms in seawater. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 445-448.
- [24] Hu M H, Yang Y P, Xu C L, Harrison J P. Phosphate limitation on phytoplankton growth in the Yangtze estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, 11(4): 439-443.
- [25] Huo W Y, Yu Z M, Zou J M, Song X X, Hao J H. Outbreak of *Skeletonema costatum* red tide and its relations to environmental factors in Jiaozhou Bay. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2001, 32(3): 311-318.
- [26] Sun B Y, Wang X L, Li Y B, Wang C Y, Wang A J, Liang S K, Zhang C S. Role of Irradiance on the Seasonality of *Skeletonema costatum* Cleve Blooms in the Coastal Area in East China Sea. *Environmental Science*, 2008, 29(7): 362-367.
- [27] Yang Y H. Dynamics of Picoplankton in the East and South China Seas and Some Preliminary in situ Experiments on Nutrient Enrichment Effects [D]. Qingdao: Institute of Oceanology Academia Sinica, 2000.
- [28] Davis L N, Phillips K A, Marshall H G. Seasonal abundance of autotrophic Picoplankton in the Pagan River, a nutrient enriched subestuary of the James River, Virginia. *Virginia Journal of Science*, 1997, 48: 211-218.
- [29] Liu H B, Dagg M, Campbell L, Urban-Rich J. Picophytoplankton and bacterioplankton in the Mississippi River Plume and its adjacent waters. *Estuaries and Coasts*, 2004, 27(1): 147-156.
- [30] Moreira-Tureq P F, Cauwet G, Martin J M. Contribution of flow cytometry to estimate picoplankton biomass in estuarine systems. *Hydrobiologia*, 2001, 462(1/3): 157-168.
- [31] Guo P Y, Shen H T. Research advance in estuarine phytoplankton ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 139-142.
- [32] Takahashi M, Bienfang P K. Size structure of phytoplankton biomass and photosynthesis in subtropical Hawaiian waters. *Marine Biology*, 1983, 76: 203-211.
- [33] Bell T, Kalff J. The contribution of picophytoplankton in marine and freshwater systems of different trophic status and depth. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46: 1243-1248.
- [34] Ray R T, Haas L W, Sieracki M E. Autotrophic picoplankton dynamics in a Chesapeake Bay sub-estuary. *Marine Ecology Progress Series*, 1989, 52: 273-285.
- [35] Iriarte A, Purdie D A. Size distribution of chlorophyll a biomass and primary production in a temperate estuary (Southampton Water): the contribution of photosynthetic picoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 115: 283-297.
- [36] Stockner J G. Autotrophic picoplankton in freshwater ecosystems: The view from the summit. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie*, 1991, 76(4): 483-492.
- [37] Chen S, Zhu M Y, Ma Y, Li R X, Li B H, Lv R H. Enclosure experiment on phosphorus eutrophication to the phytoplankton system of the Yangtze River estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22 (supplement issue): 272-280.
- [38] Schallenberg M, Burns C W. Tests of autotrophic picoplankton as early indicators of nutrient enrichment in an ultraoligotrophic lake. *Freshwater*

Biology, 2001, 46(1), 27 - 37.

- [39] Fang C, Lu Z B, Zhang L, Wang J. Responses of picophytoplankton abundance to eutrophication of the reservoirs and lakes. Proceedings of 2010 First International Conference on Cellular, Molecular Biology, Biophysics and Bioengineering (Vol 4) 2010.
- [40] Chisholm S W. Phytoplankton size// Falkowski P G, Woodhead A D, eds. Primary production and biogeochemical cycles in the sea. New York: Plenum Press, 1992: 213-237.
- [41] Thingstad T F. A theoretical approach to structuring mechanisms in the pelagic food web. Hydrobiologia, 1998, 363(1/3): 59-72.
- [42] Agawin N S, Duarte C M, Augusti S. Response of Mediterranean *Synechococcus* growth and loss rates to experimental nutrient inputs Marine Ecology Progress Series, 2000, 206: 97-106.
- [43] Timmermans K R, van der Wagt B, Veldhuis M J, Maatman A, de Baar H J. Physiological responses of three species of marine pico-phytoplankton to ammonium, phosphate, iron and light limitation. Journal of Sea Research, 2005, 53(1/2): 109-120.
- [44] Malone T C. Algal size. // Morris I, ed. The Physiological Ecology of Phytoplankton. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1980.

参考文献:

- [3] 彭欣, 宁修仁, 孙军, 乐凤凤. 南海北部浮游植物生长对营养盐的响应. 生态学报, 2006, 26(12): 3959-3968.
- [6] 汪岷, 白晓歌, 梁彦韬, 王芳, 江雪娇, 郭永坚, 杨帆. 北黄海夏季微微型浮游植物的分布. 植物生态学报, 2006, 32(5): 1184-1193.
- [9] 陈纪新, 黄邦钦, 贾锡伟, 洪华生, 谢廷贵. 利用光合色素研究厦门海域超微型浮游植物群落结构. 海洋环境科学, 2003, 22(3): 16-21.
- [10] 黄邦钦, 洪华生, 林学举, 陈纪新. 台湾海峡微微型浮游植物的生态研究 I. 时空分布及其调控机制. 海洋学报, 2003, 25(4): 72-82.
- [11] 方涛, 李道季, 余立华, 高磊, 张利华. 光照和营养盐磷对微型及微微型浮游植物生长的影响. 生态学报, 2006, 26(9): 2783-2790.
- [15] 朱根海, 宁修仁, 蔡显明, 刘子琳, 刘诚刚. 南海浮游植物种类组成和丰度分布的研究. 海洋学报, 2003, 25(2): 8-23.
- [17] 国家海洋局 908 专项办公室. 海洋化学调查技术规程. 北京: 海洋出版社, 2006: 25-33.
- [18] 国家海洋局. GB/T12763.6—2007 海洋调查规范, 第 6 部分: 海洋生物调查. 北京: 中国标准出版社, 2007: 30-34.
- [21] 沈志良. 长江口海区理化环境对初级生产力的影响. 海洋湖沼通报, 1993, 1: 42-51.
- [22] 霍文毅, 俞志明, 邹景明, 宋秀贤, 郝建华. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 311-318.
- [23] 孙百晔, 王修林, 李雁宾, 王长友, 王爱军, 梁生康, 张传松. 光照与东海近海中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 赤潮发生季节的关系. 环境科学, 2008, 29(7): 362-367.
- [24] 董燕红, 蔡建东, 钱宏林. 珠江口海域营养盐比及与浮游植物的关系. 海洋通报, 2009, 28(1): 3-10.
- [25] 曲克明, 陈碧鹃, 袁有宪, 辛福言. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究. 应用生态学报, 2000, 11(3): 445-448.
- [26] 胡明辉, 杨逸萍, 徐春林, 哈里森 J P. 长江口浮游植物生长的磷酸盐限制. 海洋学报, 1989, 11(4): 439-443.
- [27] 杨燕辉. 中国典型海域超微型生物生态学初步研究 [D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2000.
- [31] 郭沛涌, 沈焕庭. 河口浮游植物生态学研究进展. 应用生态学报, 2003, 14(1): 139-142.
- [37] 陈尚, 朱明远, 马艳, 李瑞香, 李宝华, 吕瑞华. 磷富营养化对长江口海洋浮游生态系统影响的围隔实验研究. 海洋学报, 2000, 22(增刊): 272-280.
- [39] 房潮, 陆志波, 张莲, 王娟. 微微型浮游生物丰度与平原水库(湖泊)水体富营养化因子的响应关系研究//2010 年细胞分子生物学、生物物理和生物工程学第一次会议(第四卷)

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 7 April, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on chemical communication of development and host-finding of nematodes ZHANG Bin, HU Chunxiang, SHI Jin, et al (2003)
- Principles, indicators and sampling methods for species monitoring XU Haigen, DING Hui, WU Jun, et al (2013)

Autecology & Fundamentals

- Spatial distribution pattern of human-caused fires in Hulunbeir grassland ZHANG Zhengxiang, ZHANG Hongyan, LI Dongxue, et al (2023)
- Belowground biomass in Tibetan grasslands and its environmental control factors YANG Xiuqing, HUANG Mei, WANG Junbang, et al (2032)
- Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010 CHEN Chao, ZHOU Guangsheng (2043)
- Winter bed-site selection by roe deer (*Capreolus capreolus*) in Huangnihe Nature Reserve ZHU Hongqiang, GE Zhiyong, LIU Geng, et al (2054)
- Leaf anatomical characteristics of the plants of grasslands in the Tibetan Plateau LI Quanfa, WANG Baojuan, AN Lihua, et al (2062)
- A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau XU Manhou, XUE Xian (2071)
- Cytological study on microsporogenesis of *Solanum lycopersicum* var. Micro-Tom under high temperature stress PENG Zhen, CHENG Lin, HE Yanjun, et al (2084)
- A new plant height growth process model of *Caragana* forest in semi-arid loess hilly region ZHAO Long, WANG Zhenfeng, GUO Zhongsheng, et al (2093)
- Germination inhibitory substances extracted from the seed of seven species of *Quercus* LI Qingmei, LIU Yan, LIU Guangquan, et al (2104)
- Effects of water stress and fungicide on the growth and drought resistance of *Flaveria bidentis* CHEN Dongqing, HUANGFU Chaohe, LIU Hongmei, et al (2113)
- Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat ... SHEN Zhangjun, OU Zulan, TIAN Shengni, et al (2121)
- Changes of soil chemical properties after different burning years in typical steppe of Yunwun Mountains LI Yuan, CHENG Jimin, WEI Lin, et al (2131)
- Effects of water and fertilizers on nitrate content in tomato fruits under alternate partial root-zone irrigation ZHOU Zhenjiang, NIU Xiaoli, LI Rui, et al (2139)
- Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas LI Juan, LIAO Hongkai, LONG Jian, et al (2147)
- Mobilization of inorganic phosphorus from soils by five azotobacters ZHANG Liang, YANG Yuhong, LI Qian, et al (2157)
- Physiological-ecological responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd ZHANG Chengxiang, CHEN Weifeng (2165)
- The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge TIE Mei, SONG Linlin, HUI Xiujuan, et al (2173)
- LAI-based photosynthetic light response model and its application in a rainfed maize ecosystem SUN Jingsong, ZHOU Guangsheng (2182)
- The dominant species of predatory natural enemies of three kinds of planthoppers and impact of pesticides on natural enemies in paddy field LIN Yuan, ZHOU Xiazhi, BI Shoudong, et al (2189)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial and temporal variation of picophytoplankton in the Pearl River Estuary ZHANG Xia, HUANG Xiaoping, SHI Zhen, et al (2200)

Analysis of the relationship between species diversity and hydrologic factors during an interval of intermittent water delivery at the Lower Reaches of Tarim River, China	CHEN Yongjin, LIU Jiazhen, CHEN Yaning, et al (2212)
Fish species composition and community pattern in the continental shelf of northwestern South China Sea	WANG Xuehui, LIN Zhaojin, DU Feiyan, et al (2225)
Distribution and succession of plant communities in Lake Bita coastal swamp on the plateau region, northwestern Yunnan	HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang (2236)
Analysis on community structure and quantitative characteristics of <i>Nitraria tangutorum</i> nebkhas at different succession stage in lower reaches of Shiyang River	JIN Hujia, MA Quanlin, HE Mingzhu, et al (2248)
Resource and Industrial Ecology	
Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat	ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (2260)
Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dryland conditions	ZHANG Dabin, YAO Pengwei, LI Jing, et al (2272)
Effects of planting with ridge and furrow mulching on maize growth, yield and water use efficiency in dryland farming	LI Rong, HOU Xianqing, JIA Zhikuan, et al (2282)
Urban, Rural and Social Ecology	
Effects of riparian buffers of North Mort of Beijing on air temperature and relative humidity	WU Fangfang, ZHANG Na, CHEN Xiaoyan (2292)
Characteristics of spatial and temporal variations of global solar radiation in Xi'an and relevant response in urban development	ZHANG Hongli, ZHANG Naweirui, LIU Minru, et al (2304)
Research Notes	
A analysis of macrofungal flora diversity in Langyashan Nature Reserve, Anhui Province, China	CHAI Xinyi, XU Xuefeng, WANG Meiyong, et al (2314)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶

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 33 卷 第 7 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 7 (April, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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 90.00 元