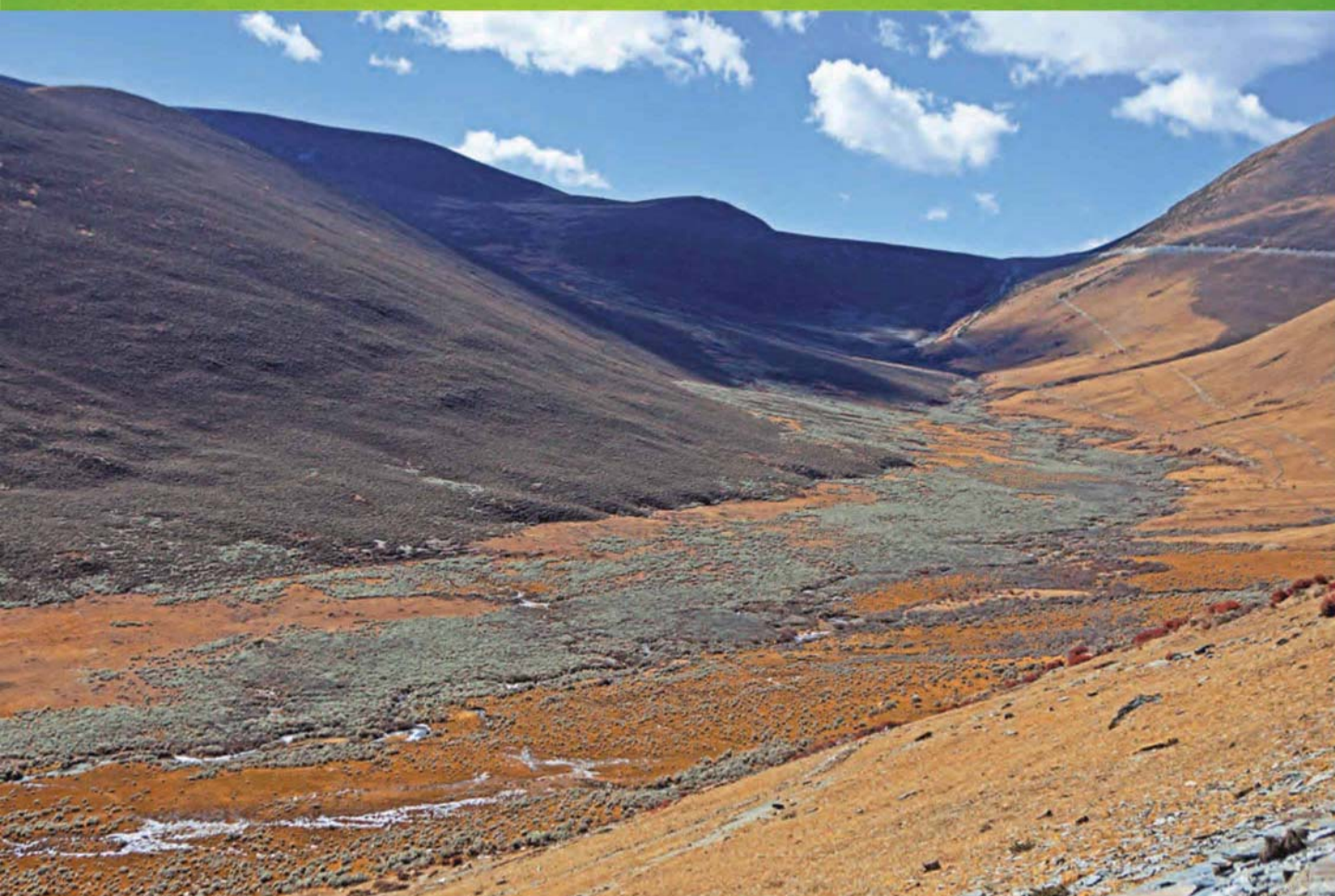


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

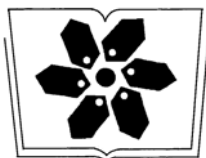
中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 18 期 Vol.33 No.18 **2013**

中国生态学会
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 18 期

2013 年 9 月 (半月刊)

目 次

中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

- 美国农业生态学发展综述 黄国勤, Patrick E. McCullough (5449)
- 水足迹研究进展 马 晶, 彭 建 (5458)
- 江西省主要作物(稻、棉、油)生态经济系统综合分析评价 孙卫民, 欧一智, 黄国勤 (5467)
- 植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理 董 蕾, 李吉跃 (5477)
- 生态化学计量学特征及其应用研究进展 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等 (5484)
- 三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征 王轶浩, 耿养会, 黄仲华 (5493)
- 城市不同地表覆盖类型对土壤呼吸的影响 付芝红, 呼延佼奇, 李 锋, 等 (5500)
- 华南地区 3 种具有不同入侵性的近缘植物对低温胁迫的敏感性 王宇涛, 李春妹, 李韶山 (5509)
- 沙丘稀有种准噶尔无叶豆花部综合特征与传粉适应性 施 翔, 刘会良, 张道远, 等 (5516)
- 水浮莲对水稻竞争效应、产量与土壤养分的影响 申时才, 徐高峰, 张付斗, 等 (5523)
- 珍稀药用植物白及光合与蒸腾生理生态及抗旱特性 吴明开, 刘 海, 沈志君, 等 (5531)
- 不同温度及二氧化碳浓度下培养的龙须菜光合生理特性对阳光紫外辐射的响应 杨雨玲, 李 伟, 陈伟洲, 等 (5538)
- 土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等 (5546)
- 免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH_3 挥发及氮肥利用率的影响 马玉华, 刘 兵, 张枝盛, 等 (5556)
- 香梨两种树形净光合速率特征及影响因素 孙桂丽, 徐 敏, 李 疆, 等 (5565)
- 沙埋对沙米幼苗生长、存活及光合蒸腾特性的影响 赵哈林, 曲 浩, 周瑞莲, 等 (5574)
- 半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响 王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等 (5580)
- 基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究 汪三树, 黄先智, 史东梅, 等 (5589)
- 不同施肥对雷竹林径流及渗漏水中氮形态流失的影响 陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等 (5599)
- 黄土丘陵区不同植被土壤氮素转化微生物生理群特征及差异 邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等 (5608)
- 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响 赵 彤, 闫 浩, 蒋跃利, 等 (5615)
- 林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响 郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等 (5623)
- 降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响 王 旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等 (5631)
- 基于土芯法的亚热带常绿阔叶林细根空间变异与取样数量估计 黄超超, 黄锦学, 熊德成, 等 (5636)
- 4 种高大树木的叶片性状及 WUE 随树高的变化 何春霞, 李吉跃, 孟 平, 等 (5644)
- 干旱荒漠区银白杨树干液流动态 张 俊, 李晓飞, 李建贵, 等 (5655)
- 模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响 刘瑞鹏, 毛子军, 李兴欢, 等 (5661)
- 金沙江干热河谷植物叶片元素含量在地表凋落物周转中的作用 闫帮国, 纪中华, 何光熊, 等 (5668)
- 温带 12 个树种新老树枝非结构性碳水化合物浓度比较 张海燕, 王传宽, 王兴昌 (5675)
- 断根结合生长素和钾肥施用对烤烟生长及糖碱比、有机钾指数的影响 吴彦辉, 薛立新, 许自成, 等 (5686)
- 光周期和高脂食物对雌性高山姬鼠能量代谢和产热的影响 高文荣, 朱万龙, 孟丽华, 等 (5696)
- 绿原酸对凡纳滨对虾抗氧化系统及抗低盐度胁迫的影响 王 芸, 李 正, 李 健, 等 (5704)

基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应	张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 等 (5714)
广西马山岩溶植被年龄序列的群落特征	温远光, 雷丽群, 朱宏光, 等 (5723)
戴云山黄山松群落与环境的关联	刘金福, 朱德煌, 兰思仁, 等 (5731)
四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系	王文君, 杨万勤, 谭 波, 等 (5737)
中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态	范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等 (5751)
塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征	李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (5760)
鄱阳湖小天鹅越冬种群数量与行为学特征	戴年华, 邵明勤, 蒋丽红, 等 (5768)
营养盐加富和鱼类添加对浮游植物群落演替和多样性的影响	陈 纯, 李思嘉, 肖利娟, 等 (5777)
西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构	刘沙沙, 贾沁贤, 刘喜方, 等 (5785)
西藏草地多项供给及调节服务相互作用的时空演变规律	潘 影, 徐增让, 余成群, 等 (5794)
太湖水体溶解性氨基酸的空间分布特征	姚 昕, 朱广伟, 高 光, 等 (5802)
基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究	王传辉, 吴 立, 王心源, 等 (5808)
近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应	李正国, 杨 鹏, 唐华俊, 等 (5818)
鄱阳湖湿地景观恢复的物种选择及其对环境因子的响应	谢冬明, 金国花, 周杨明, 等 (5828)
珠三角河网浮游植物生物量的时空特征	王 超, 李新辉, 赖子尼, 等 (5835)
南京市景观时空动态变化及其驱动力	贾宝全, 王 成, 邱尔发 (5848)
川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化	秦纪洪 王 琴 孙 辉 (5858)
城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例	周 健, 肖荣波, 庄长伟, 等 (5865)
基于机器学习模型的沙漠腹地地下水含盐量变化过程及模拟研究	范敬龙, 刘海龙, 雷加强, 等 (5874)
干旱区典型绿洲城市发展与水资源潜力协调度分析	夏富强, 唐 宏, 杨德刚, 等 (5883)
海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用——以南通市为例	魏 超, 叶属峰, 过仲阳, 等 (5893)
中街山列岛海洋保护区鱼类物种多样性	梁 君, 徐汉祥, 王伟定 (5905)
丰水期长江感潮河口段网采浮游植物的分布与长期变化	江志兵, 刘晶晶, 李宏亮, 等 (5917)
基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例	刘耕源, 杨志峰, 陈 彬, 等 (5926)
保护区及周边居民对野猪容忍性的影响因素——以黑龙江凤凰山国家级自然保护区为例	徐 飞, 蔡体久, 琚存勇, 等 (5935)
三江源牧户参与草地生态保护的意愿	李惠梅, 张安录, 王 珊, 等 (5943)
沈阳市降雨径流初期冲刷效应	李春林, 刘 淼, 胡远满, 等 (5952)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 514 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 59 * 2013-09	



封面图说: 川西高山地带土壤及植被——青藏高原东缘川西的高山地带坡面上为草地, 沟谷地带由于低平且水分较充足, 生长有很多灌丛。川西地区大约在海拔 4000m 左右为林线, 以下则分布有亚高山森林。亚高山森林是以冷、云杉属为建群种或优势种的暗针叶林为主体的森林植被。作为高海拔低温生态系统, 高山-亚高山地带土壤碳被认为是我国重要的土壤碳库。有研究表明, 易氧化有机碳含量与海拔高度呈显著正相关, 显示高海拔有利于土壤碳的固存。因而, 这里的表层土壤总有机碳含量随着海拔的升高而增加。

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/stxb201305311260

江志兵, 刘晶晶, 李宏亮, 周 锋, 陈全震, 严小军, 曾江宁. 丰水期长江感潮河口段网采浮游植物的分布与长期变化. 生态学报, 2013, 33(18): 5917-5925.

Jiang Z B, Liu J J, Li H L, Zhou F, Chen Q Z, Yan X J, Zeng J N. Distribution and long-term changes of net-phytoplankton in the tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5917-5925.

丰水期长江感潮河口段网采浮游植物的 分布与长期变化

江志兵^{1,2}, 刘晶晶², 李宏亮², 周 锋³, 陈全震², 严小军¹, 曾江宁^{2,*}

(1. 应用海洋生物技术教育部重点实验室, 宁波大学海洋学院, 宁波 315211;

2. 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;

3. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

摘要:于 2009 年 6、8 月对长江口门至江阴的河口段浮游植物进行了拖网采集, 共检出浮游植物 6 门 99 属 239 种。其中: 硅藻 123 种, 甲藻 19 种, 绿藻和蓝藻各 42 种, 裸藻 9 种, 黄藻 4 种。河口段网采浮游植物丰度以蓝藻占绝对优势, 硅藻次之, 两者合计在群落中的比例超过了 95%。优势种也主要以蓝藻 (水华鱼腥藻 *Anabaena flos-aquae*、柔软腔球藻 *Coelosphaerium kuetingiarum*、微囊藻 *Microcystis* spp.、颤藻 *Oscillatoria* spp. 和席藻 *Phorimidium* spp.) 构成, 硅藻仅有 2 种 (骨条藻 *Skeletonema* spp. 和颗粒直链藻 *Aulacoseira granulata*)。口门内盐度均 < 0.5, 群落基本以淡水类群为主, 口门附近则以半咸水类群为主, 海水类群主要位于口门外 (盐度 > 13)。随着水温 and 营养盐水平的升高, 8 月浮游植物平均丰度 (347.75×10^4 个/m³) 明显高于 6 月 (204.19×10^4 个/m³)。根据多维尺度和相似性分析, 丰水期长江河口段浮游植物群落组成与分布存在显著 ($P < 0.01$) 的时空差异。对比 20 世纪 80 年代以来的历史资料发现, 长江口门内网采浮游植物丰度显著升高, 且优势种也从硅藻 (骨条藻、直链藻和圆筛藻) 转变为蓝藻 (颤藻、鱼腥藻和微囊藻)。

关键词: 长江; 感潮河段; 浮游植物; 优势种; 长期变化

Distribution and long-term changes of net-phytoplankton in the tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season

JIANG Zhibing^{1,2}, LIU Jingjing², LI Hongliang², ZHOU Feng³, CHEN Quanzhen², YAN Xiaojun¹, ZENG Jiangning^{2,*}

1 Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology, Ministry of Education, Marine College of Ningbo University, Ningbo 315211, China

2 Key Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

3 State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

Abstract: The Changjiang (Yangtze River) ranks the 3rd longest and 5th biggest rivers by discharge volume in the world. Thus, the Changjiang Estuary, as one of the largest typical riverine-marine systems, presents freshwater-seawater mutual interactions with the complicated distributions of salinity and other physical-chemical properties (e.g., river discharge, tide, turbidity, nutrients, and sedimentation). Phytoplankton community in the estuary has been investigated extensively, due to its importance in the estuarine ecosystem. However, most studies focused on the areas outside of the estuary mouth or around the mouth so far, less refer to the inner estuary (tidal freshwater reaches). In the present study, we collected the phytoplankton samples in the tidal freshwater estuary of Changjiang using a 76 μ m plankton net in June and August 2009, in order to explore the distribution pattern of phytoplankton community and its relationship with the extremely changed

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2010CB428903); 海洋公益性行业科研专项 (201305009; 201205015); 国家自然科学基金科学基金 (41206103); 国家海洋局青年海洋科学基金 (2011106); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项 (JG1222)

收稿日期: 2013-05-31; **修订日期:** 2013-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangningz@126.com

environmental factors. Besides, we examined the long-term changes in phytoplankton community in the Changjiang Estuary combined with the historical data.

Based on the two cruises, a total of 239 species (included the varietas and forma) belong to 6 phyla and 99 genera were identified, including 123 diatom, 42 chlorophyte, 42 cyanobacteria, 19 dinoflagellate, 9 euglenophyte, and 4 xanthophyte species. Cyanobacteria absolutely dominated in the tidal freshwater zone and followed by the diatoms, taken together contributed above 95% in total abundance. The dominants mainly consisted of cyanobacterial taxa (e.g., *Oscillatoria* spp., *Microcystis* spp., *Anabaena flos-aquae*, *Coelosphaerium kuetzingiarum*, and *Phorimidium* spp.), although including two diatom species (i.e., *Skeletonema* spp. and *Aulacoseira granulata*). The freshwater species were principally located in inner estuary with the salinity below 0.5, while the marine species were mostly found outside of the river mouth with the salinity above 13. However, the brackish species dominated around the river mouth under the stress of extreme salinity variation. The simultaneous-observed inflow velocity of runoff increased from 38 900 (in June) to 44 350 m³/s (in August) at Datong resulted in dissolved inorganic nitrogen (from 113.87 μmol/L to 135.45 μmol/L) and silicate (from 93.84 μmol/L to 117.19 μmol/L) concentrations amplification, especially the dissolved inorganic phosphorus, which increased from 1.77 μmol/L to 3.28 μmol/L. Driven by the increasing temperature (from 23.18 °C to 28.15 °C) and nutrient levels, the algal density in August (347.75×10^4 cells/m³) was much higher than that in June (204.19×10^4 cells/m³), although no significant difference between them was found. According to the non-metric multidimensional scaling and analysis of similarity, phytoplankton community presented significant spatio-temporal differences in the tidal freshwater zone. The Pearson correlation showed that; in June, both the cyanobacteria and phytoplankton abundance were significantly ($P < 0.05$) and positively related to the temperature but negatively correlated with the salinity; in August, the cyanobacteria abundance was significantly ($P < 0.05$) and positively related to the temperature and nutrients but negatively correlated with the salinity, while the diatom and phytoplankton did not significantly associated with the environmental factors. Comparing with the data since 1980s, the net-phytoplankton abundance increased evidently and the dominant species changed from the diatoms (i.e., *Skeletonema*, *Melosira*, and *Coscinodiscus*) to cyanobacteria (e.g., *Oscillatoria*, *Microcystis*, and *Anabaena*) during wet season.

Key Words: Changjiang; tidal freshwater estuary; phytoplankton; dominant species; long-term changes

改革开放以来,随着长江流域人口的快速增长和经济的迅猛发展,营养盐和其它污染物入海通量急剧上升^[1],长江口上游水利工程日益增多^[2],大型海岸/海洋工程修建加速^[3]。长江河口生态系统面临着巨大的污染压力,已引起了包括水质恶化^[1]、低氧区扩大^[4]、生境破碎化^[3]、生物多样性降低^[5]和渔业资源量下降^[1]等在内的诸多环境问题。浮游植物是河口生态系统中最主要的初级生产者,其群落结构和生物量的改变将直接影响次级生产者,进而通过食物网影响河口生态系统的结构、功能、服务和产出^[6]。此外,浮游植物对环境的变化非常敏感,可很好地指示河口环境的变化^[7-9]。因此,近30年来,长江口浮游植物的研究备受关注^[10-15]。然而,这些研究基本上局限于长江口门以东海域,涉及长江口门内的调查较少^[16-19],且从长江口门至其上游的潮流界的研究更是未见报道。

河口感潮区作为一种特殊生境,既有河流的特征,又深受潮流的影响。在过去相当长一段时间内,感潮区一直被认为属于河流段,故基本被海洋研究者所忽视^[20]。但自20世纪90年代以来,国际上对其认识逐渐加深,报道日益增多,并形成了共识。如国际河口和海岸协会将感潮区定义为是河流和河口的结合体,属河口海岸学研究的重要范畴^[21]。受径流、潮流和地形等影响,感潮河流体系复杂多变,且其高度变化的物理、化学和生物学过程对生源要素的输运也至关重要,尤以浮游植物的作用最为突出^[20]。因此,近年来感潮河流段浮游植物生态学的研究引起了国际学界的广泛关注^[20-24]。鉴于此,本文根据2009年6、8月从长江口门至江阴(丰水期潮流界)进行了2个航次的调查,分析了河口段浮游植物的种类组成、丰度分布、生态类群、群落结构和物种多样性,同时结合环境理化参数,探讨该区浮游植物群落的分布特征及其影响因素,并参考1980s以来的同期网采资料,以期对长江口门内侧的浮游植物生态现状及其长期变化有一个全面的认识,为长江河口生态系统的进一步研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 调查区域与站位布设

于2009年6月12日至13日和8月19日至20日,搭载北斗号调查船对长江口门内河口段进行了两个航次调查。站位布

设见图 1。根据河口地理位置,将研究区域分为河口上游(G1—G3)、中部(G4—G7)和下游(G8—G10)。G1—G7 位于口门内, G8 位于口门处, G9 与 G10 位于口门外。

1.2 样品采集及分析

在每站用网目为 76 μm 浮游生物网从底至表作垂直拖网采集浮游植物样品。用 Hydro-bios 流量计记录滤水量。6 月采集了全部站位的浮游植物样品,但 8 月航次因水流太急无法下网仅采集了 G1、G5、G7、G9 和 G10 等 5 个站的浮游植物样品。样品用 4% 中性甲醛固定,经浓缩后用 Leica DM2500 显微镜观察、鉴定和计数。用 CTD 测定其温度和盐度。同时用 10 L 采水器采集表层(2 m)水样,用于溶解无机氮($\text{DIN}; \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$)、活性磷酸盐(DIP)、硅酸盐(DSi)和悬浮物浓度等的测定。所有分析测试均按《海洋监测规范》(GB 17378.4—2007)进行。

1.3 数据分析

优势度(Y)计算公式为 $Y = n_i \times f_i / N \times 100\%$, 式中, N 为样品

的总丰度; n_i 为样品中第 i 种的丰度; f_i 为该种浮游植物在样品中的出现频率。若某物种的 $Y \geq 2\%$, 则认定为优势种。对硅藻、蓝藻和浮游植物丰度进行 $\log(x+1)$ 转换后,再用 SPSS 13.0 软件分析其与环境因子的相关性。丰度比较用 SPSS 13.0 软件进行 t 检验。用 PRIMER 软件对物种丰度进行四次方根转换和标准化处理后,建立 Bray-Curtis 相似性聚类矩阵,采用非度量多维尺度(nMDS)分析浮游植物群落的空间分布。浮游植物群落区域及月份间比较采用双因素相似性分析(ANOSIM)。

2 结果与分析

2.1 物种组成

两个航次调查海域共鉴定出浮游植物 6 门 99 属 239 种(含变种和变型及未定名种),包括硅藻 123 种,甲藻 19 种,绿藻和蓝藻各 42 种,裸藻 9 种,黄藻 4 种。其中,6 月共检出浮游植物 6 门 75 属 177 种,8 月共检出浮游植物 6 门 72 属 142 种。6、8 月浮游植物种类和数量组成见表 1,其种类组成也以硅藻占绝对优势。

表 1 6、8 月不同门类浮游植物的种类数和丰度

Table 1 Phytoplankton taxonomical species number and abundance in June and August

门类 Phyla	种类数 Species richness		丰度 Abundance/($\times 10^4$ 个/ m^3)	
	6 月 June	8 月 August	6 月 June	8 月 August
硅藻 Bacillariophyta	87	78	71.80 $\pm$ 150.00	121.23 $\pm$ 219.15
甲藻 Dinophyta	14	11	0.18 $\pm$ 0.09	0.84 $\pm$ 5.22
蓝藻 Cyanophyta	33	28	124.18 $\pm$ 130.94	219.83 $\pm$ 226.52
绿藻 Chlorophyta	37	16	7.87 $\pm$ 5.58	5.16 $\pm$ 4.33
裸藻 Euglenophyta	2	7	0.01 $\pm$ 0.00	0.16 $\pm$ 0.15
黄藻 Xanthophyta	4	2	0.14 $\pm$ 0.22	0.53 $\pm$ 0.75
合计 Total	177	142	204.19 $\pm$ 154.84	347.75 $\pm$ 212.28

2.2 丰度

表 1 表明,8 月浮游植物平均丰度(347.75×10^4 个/ m^3)明显高于 6 月(204.19×10^4 个/ m^3),但两者无显著差异($P > 0.05$),6、8 月浮游植物群落以蓝藻占绝对优势(分别占总丰度的 60.8%和 63.2%),硅藻次之(分别占总丰度的 35.2%和 34.9%),可见丰水期长江河口段浮游植物群落由蓝藻和硅藻主导。图 2 表明,浮游植物群落河口上游和中部(G1—G7)以蓝藻为主,河口下游(G8—G10)则以硅藻为主。

2.3 优势种

调查区域丰水期优势种(属)组成基本以蓝藻为主(表 2,图 3)。除硅藻门的颗粒直链藻 *Aulacoseira granulata* 和骨条藻 *Skeletonema* spp.外,其余优势种均为蓝藻,包括水华鱼腥藻 *Anabaena flos-aquae*、柔软腔球藻 *Coelosphaerium kuetzingiarum*、微囊藻 *Microcystis* spp.、颤藻 *Oscillatoria* spp.和席藻 *Phormidium* spp.。6 月,河口上游和中部的优势属有颤藻、鱼腥藻、席藻、微囊藻、隐球藻 *Aphanocapsa* 和辐球藻 *Radiococcus* 等淡水种,河口下游的优势属有骨条藻、圆筛藻 *Coscinodiscus* 和束毛藻 *Trichodesmium* 等半咸水种或海水种;8 月,河口上游和中部的优势属有颤藻、微囊藻、席藻、腔球藻、螺旋藻 *Spirulina*、直链藻 *Melosira* (含颗粒直链藻及其变种和变型)等淡水种或半咸水种,河口下游的优势属有直链藻、骨条藻、圆筛藻和束毛藻等半咸水种或海水种。

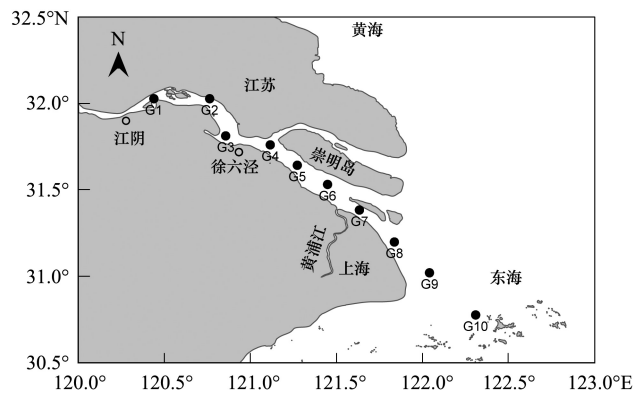


图 1 长江感潮河口段调查站位

Fig. 1 Sampling stations in the tidal freshwater estuary of Changjiang

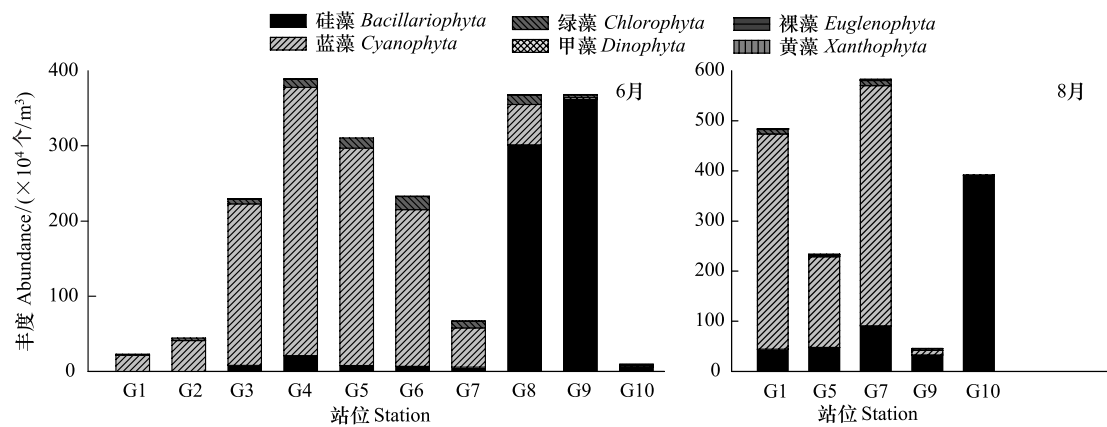


图 2 6、8 月各站不同门类浮游植物丰度的分布

Fig.2 Phytoplankton taxonomical abundance at different stations in June and August

表 2 6、8 月浮游植物优势种的平均丰度、优势度 (Y%) 和出现频率 (f)

Table 2 Average abundance, dominance (Y) and occurred frequency (f) of phytoplankton dominant species in June and August

优势种 Dominant species	6 月 June			8 月 August		
	丰度 Density /($\times 10^4$ 个/ m^3)	Y/%	f/%	丰度 Density /($\times 10^4$ 个/ m^3)	Y/%	f/%
颗粒直链藻 <i>Aulacoseira granulata</i>	—	—	—	24.71	5.69	80
骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	64.41	18.93	60	70.69	8.13	40
水华鱼腥藻 <i>Anabaena flos-aquae</i>	8.91	3.49	80	—	—	—
柔软腔球藻 <i>Coelosphaerium kuetzingiarum</i>	—	—	—	12.72	8.90	60
微囊藻 <i>Microcystis</i> spp.	—	—	—	53.24	9.19	60
铜色颤藻岛生变种 <i>Oscillatoria chalybea</i> var. <i>insularis</i>	—	—	—	13.12	2.26	60
假双点颤藻 <i>Oscillatoria pseudogeminata</i>	62.98	27.76	90	—	—	—
弱细颤藻亚洲变种 <i>Oscillatoria tenuis</i> var. <i>asiatica</i>	—	—	—	18.06	3.12	60
颤藻 <i>Oscillatoria</i> spp.	17.44	6.83	80	20.70	3.57	60
席藻 <i>Phorimidium</i> spp.	—	—	—	23.47	4.05	60

—: Y<2

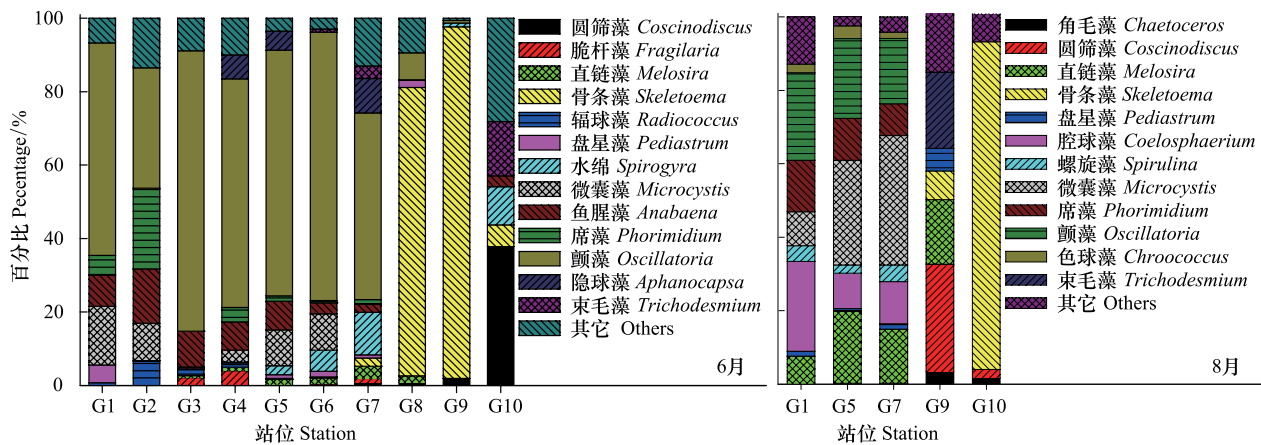


图 3 6、8 月各站浮游植物优势属的比例 (直链藻属含颗粒直链藻及其变种与变型)

Fig. 3 Dominance of phytoplankton genera at different stations in June and August (genus *Melosira* consists of *Aulacoseira granulata* and its varieties and forma)

2.4 生态类群

按其适盐性差异,调查区浮游植物大致可分为三类:(1)淡水类群,是该区域的优势类群,主要以蓝藻(如颤藻、微囊藻、鱼腥藻和席藻)和绿藻(如盘星藻 *Pediastrum*、栅藻 *Scenedesmus* 和新月藻 *Closterium*)为主,此外还有少量硅藻、甲藻、裸藻和黄藻,基本位于河口上游和中部;(2)半咸水类群,是该区的次要优势类群,代表种有骨条藻、颗粒直链藻和梅尼小环藻 *Cyclotella meneghiniana* 等,主要位于口门附近海域;(3)海水类群,包括近岸低盐类群、外海高盐类群和海洋广布类群,代表种分别有梭角藻 *Ceratium fusus*、铁氏束毛藻 *Trichodesmium thiebautii* 和蛇目圆筛藻 *Coscinodiscus argus* 等,主要位于河口下游,且在口门外的丰度较高。

2.5 群落分布差异

nMDS 表明:6 月河口下游与上游浮游植物组成差异较大,而河口中部则处于两者的过渡;8 月河口上游和中部群落组成与河口下游差异较大(图 4)。进一步通过 ANOSIM 表明,调查区域浮游植物群落空间差异显著($\text{Global } R=0.82, P=0.005$),且 6、8 月群落组成也呈($\text{Global } R=0.74, P=0.001$)显著差异(表 3)。

2.6 环境因子

随着太阳辐射增强和径流量增大,8 月表层温度、悬浮物、营养盐浓度及 N/P 明显高于 6 月,而盐度则刚好相反(表 4)。越靠近下游,盐度越高、DIP 和 Si/N 越低;DIN 则表现为河口中部高于其上、下游河口段;温度、DSi 和 N/P 在各月均有不同表现。

2.7 相关性分析

表 5 表明,硅藻、蓝藻及浮游植物丰度与温度、盐度和营养盐浓度相关性较大,而与悬浮物和营养盐比例相关性不大。其中:6 月蓝藻和浮游植物丰度与温度和营养盐浓度呈显著正相关,而与盐度呈显著负相关;8 月蓝藻丰度与温度和营养盐浓度呈显著正相关,而与盐度呈显著负相关,硅藻和浮游植物丰度与各环境因子相关性不大。

3 讨论

3.1 长江河口段浮游植物群落与环境因子的关系

长江河口段水体主要由长江径流(盐度 <0.5)、河口水(盐度 <5)和冲淡水(盐度 <31)控制。此外,基于东海环流体系,夏季该水域还受沿岸流和台湾暖流等影响。因此,丰水期长江河口段浮游植物种类组成复杂(共 6 门 99 属 239 种),既有淡水种(如水华鱼腥藻、颤藻和微囊藻)和半咸水种(如骨条藻和颗粒直链藻),又有近岸低盐种(如梭角藻)、外海暖水种(如铁氏束毛藻)和海洋广布种(如蛇目圆筛藻)。浮游植物类群组成与以往的调查类似,但种类数明显高于文献报道^[18-21]。这可能与本次调查范围上溯到了徐六泾上游江段有关。由于本次调查的盐度较低,6、8 月平均盐度分别仅有 4.22 和 3.46,故该水域浮游植物组成基本以淡水类群和半咸水类群为主(表 2 和图 3 中优势种/属均属于这两个类群),尤其是口门内侧,盐度均低于 0.5,海水类群的细胞丰度和种类数均较低。

表 3 河口上游(G1—G3)、中部(G4—G7)和下游(G8—G10)的浮游植物群落组成的相似性分析

Table 3 Analysis of similarity of phytoplankton community composition among upper (G1—G3), middle (G4—G7) and lower (G8—G10) estuary

河口部分 Estuarine sections	R	P
上游 Upper vs. 中部 Middle	0.82	0.01
上游 Upper vs. 下游 Lower	0.97	0.03
中部 Middle vs. 下游 Lower	0.80	0.01

河口浮游植物群落通常含有大量的附着微藻和底栖微藻,且主要由硅藻构成,此外还有少量绿藻、裸藻和蓝藻,如 Elbe、Schelde^[22] 和 Severn 河口^[25]。闵华明和马家海^[26] 也发现长江口滩涂分布着大量的底栖硅藻,主要为舟形藻和菱形藻,且既有淡水种,又有海水种。丰水期长江径流量较大,如本次 6、8 月调查期间大通站同步观测到的流量分别为 38 900 和 44 350 m³/s,流速较急,而在潮流的共同作用下,大量底栖微藻种类随底泥被搅起,同时许多附植微藻也随之脱落^[6]。由于长江口拥有大面积的滩涂、盐沼(蘆草 *Scirpus*、米草 *Spartina* 和芦苇 *Phragmites* 等维管束植物较多)和潮沟等湿地生境^[1],故浮游植物群落中含有丰富的底栖或附生微藻(尤其是硅藻),从而导致 6、8 月浮游植物群落中硅藻的种类比例最高(分别为 87 和 78 种),约占总种类数的一半(表 1)。

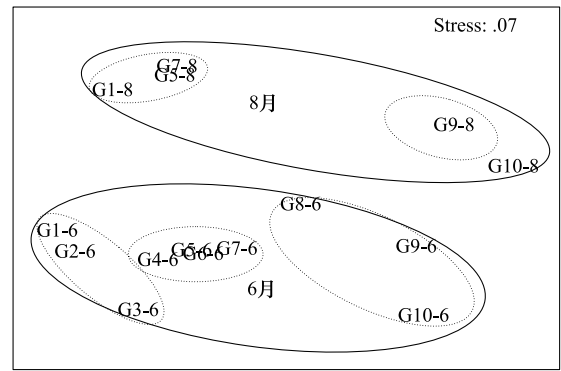


图 4 6、8 月浮游植物群落的多维尺度分析

Fig. 4 Non-metric multidimensional scaling of phytoplankton community in June and August

表 4 6、8 月河口上游、中部和下游的表层环境因子

Table 4 Surface environmental parameters in upper, middle and lower estuary in June and August

参数 Parameters	6 月 June				8 月 August			
	上游 Upper	中部 Middle	下游 Lower	全区 Total	上游 Upper	中部 Middle	下游 Lower	全区 Total
温度 Temp/°C	24.03	23.12	22.42	23.18±0.84	28.34	28.51	27.49	28.15±0.80
盐度 Salinity	0.15	0.17	13.70	4.22±8.75	0.16	0.19	11.12	3.46±7.09
悬浮物 SS/(mg/L)	65.7	59.1	249.1	118.1±97.9	280.4	128.2	119.5	162.20±94.9
溶解无机氮 DIN/(μmol/L)	123.17	126.08	88.29	113.87±29.29	136.13	144.87	122.22	135.45±28.30
活性磷酸盐 DIP/(μmol/L)	1.92	1.91	1.43	1.77±0.29	4.38	3.94	1.31	3.28±2.68
活性硅酸盐 DSi/(μmol/L)	109.22	102.20	67.31	93.84±22.41	127.51	128.18	92.20	117.19±23.39
氮磷比 N/P	64.3	66.0	58.9	63.40±9.6	45.4	48.5	295.13	121.60±221.3
硅氮比 Si/N	0.89	0.81	0.82	0.84±0.09	0.94	0.89	0.78	0.87±0.08

Temp; temperature; SS; suspended solids; DIN; dissolved inorganic nitrogen; DIP; dissolved inorganic phosphorus; DSi; dissolved silicate

表 5 6、8 月硅藻、蓝藻及浮游植物丰度与环境因子的相关系数(r)Table 5 Correlation coefficient (r) between the diatom, cyanobacteria, and phytoplankton abundance and environmental factors in June and August

时间 Time	参数 Parameters	温度 Temp.	盐度 Salinity	悬浮物 SS	溶解无机 氮 DIN	活性磷酸 盐 DIP	活性硅酸 盐 DSi	氮磷比 N/P	硅氮比 Si/N
6 月 June	浮游植物 Phytoplankton	0.81 **	-0.85 **	0.33 ^{NS}	0.82 **	0.63 *	0.86 **	-0.59 ^{NS}	0.16 ^{NS}
	硅藻 Diatom	-0.05 ^{NS}	0.26 ^{NS}	-0.43 ^{NS}	0.18 ^{NS}	-0.12 ^{NS}	-0.24 ^{NS}	0.60 ^{NS}	-0.80 **
	蓝藻 Cyanobacteria	0.75 *	-0.84 **	0.15 ^{NS}	0.72 *	0.74 *	0.83 **	-0.58 ^{NS}	0.26 ^{NS}
8 月 August	浮游植物 Phytoplankton	0.25 ^{NS}	-0.38 ^{NS}	0.49 ^{NS}	0.27 ^{NS}	0.43 ^{NS}	0.37 ^{NS}	-0.93 *	0.57 ^{NS}
	硅藻 Diatom	-0.66 ^{NS}	0.59 ^{NS}	-0.01 ^{NS}	-0.64 ^{NS}	-0.21 ^{NS}	-0.60 ^{NS}	-0.44 ^{NS}	-0.41 ^{NS}
	蓝藻 Cyanobacteria	0.98 **	-0.99 ***	0.27 ^{NS}	0.96 **	0.60 ^{NS}	0.99 ***	-0.35 ^{NS}	0.90 *

NS $P>0.05$; * $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$

浮游植物丰度与温度、盐度和营养盐密切相关,特别是群落中占绝对优势的蓝藻与上述环境因子显著相关(表 5)。因此,随着径流量增大和太阳辐射增强,8 月营养盐水平和温度明显高于 6 月(表 4),导致了 8 月浮游植物丰度也明显高于 6 月(表 1)。而长江淡水输入的增加(6、8 月均径流量分别为 38 900 和 44 350 m³/s),引起了调查水域盐度的明显降低(6、8 月盐度分别为 4.22 和 3.46),并使径流控制海域(盐度<0.5)向外扩展,从而引起咸淡水界面附近的丰度低值区从 G7 站向外移至 G9 站(图 2)。

口门内盐度均小于 0.5,尽管在河口中部(G4—G7)有随潮流而来的海水种(如三角角藻 *Ceratium tripos* 和圆筛藻等),但出现频率和丰度均非常低,而在河口上游(G1—G3)未检测到海水种,故河口上游和中部浮游植物群落以淡水类群(颤藻、鱼腥藻、微囊藻和席藻)占绝对优势;在口门附近,位于淡水和海水的过渡带,盐度变化剧烈,受盐度胁迫,淡水和海水类群生长均受抑制,故群落则基本以半咸水类群(颗粒直链藻和骨条藻)为主;在河口下游,特别是 G9 和 G10 站,6、8 月盐度均高于 13,群落也以海水类群(近岸低盐类群、外海高盐类群和海洋广布类群)和半咸水类群为主。因此,长江河口上游、中部和下游的浮游植物群落组成差异显著(图 3,图 4,表 3)。王金辉^[27]根据盐度适应性,也将长江口浮游植物归为上述 5 个类群。可见,浮游植物群落分布和组成与径流(高营养盐和低盐度)和海水(低营养盐和高盐度)的混合过程密切相关(表 5),即表现为盐度和营养盐分布的区域差异(表 4)。这与其它河口的有关报道相符^[20-24]。

长江感潮河口段浮游植物群落组成与长江干流和冲淡水区相差较大。陈校辉等^[27]于 2004 年丰水期对长江江苏段浮游植物的调查表明,群落中硅藻(主要为直链藻、脆杆藻 *Fragilaria* 和针杆藻 *Synedra*)占绝对优势,蓝藻(主要为颤藻)次之,且在常熟至海门河段,颤藻在群落中的比例升至 18.38%,仅次于直链藻的 41.91%。长江口及其邻近陆架区同期调查(作者未发表资料)表明,网采浮游植物群落中硅藻(主要为骨条藻、伪菱形藻 *Pseudo-nitzschia* 和角毛藻 *Chaetoceros* 等)占绝对优势(>60%),甲藻(主要为角藻和夜光藻 *Noctiluca scintillans*)和蓝藻(主要为束毛藻)次之。这与以往对长江口及其邻近海域的研究结果基本一致^[10-15,28]。而在长江感潮河口段,本次调查浮游植物群落以淡水蓝藻占绝对优势(>60%),硅藻次之(>30%)。可见,长江河口区地形深刻影响浮游植物的生态类型、优势种和群落结构。

3.2 长江河口段浮游植物的长期变化

由于调查资料的缺乏,未有长江河口段长时间序列的监测资料,但对比历史数据仍可知(表 5),自上世纪 80 年代以来,该

区网采浮游植物数量总体呈上升趋势,且群落也由硅藻(主要为骨条藻、直链藻和圆筛藻)向蓝藻(主要为颤藻、微囊藻、腔球藻、鱼腥藻和席藻)演替,表现为硅藻优势种种类数减少、优势度持续下降,而蓝藻逐渐成为优势种,且优势度急剧升高。王金辉^[28]于1999年8月调查中也发现,在盐度<1的长江河口水体中微囊藻占据了较大优势。这种改变可能与近年来长江中、下游流域富营养化加剧及其蓝藻水华的持续爆发有关^[29]。夏季,大量径流汇入长江的同时,也带来了丰富的蓝藻,在上游江段淡水向下游河口不断输送的背景下,长江河口段蓝藻丰度也随之升高。国外也有文献报道,河口区淡水或半咸水类群的浮游植物可由上游江段或感潮河流输入,并在适宜环境条件下生长良好^[22],甚至旺发^[30]。杨浩等^[31]对三峡库区重庆段长江干流的调查也发现,近年来蓝藻在夏季浮游植物群落中优势度显著增加,在流速较缓的类湖泊型水体中其比例甚至可达63.8%。陈校辉等^[27]对长江常熟至海门河段的调查也表明,淡水蓝藻比例也较高。

长江河口段浮游植物群落的这种演变趋势与长江口外类似。如Zhou等^[8]和Jiang等^[9]研究也表明,近50年来长江口外浮游植物群落中的硅藻比例下降、甲藻比例上升,且大规模藻华优势种也呈现出从硅藻到硅藻(如骨条藻)与甲藻(如东海原甲藻*Prorocentrum donghaiense*和米氏凯伦藻*Karenia mikimoto*)并存的演变趋势。营养盐浓度上升和结构(N/P与Si/N)改变有关。而本次调查中也发现,蓝藻丰度与营养盐浓度呈显著($P<0.05$)正相关(表5)。可见,长江河口段浮游植物群落的改变可能与富营养化加剧相关。特别是2003年6月三峡大坝蓄水后,尽管丰水期径流量有所下降^[2],硅酸盐通量和入海泥沙量也急剧下降^[2],但氮磷营养盐入海通量却持续升高^[9],导致长江河口段水体富营养化进一步加剧,在流速下降^[31]和水体透明度升高的共同影响下,浮游植物丰度增加、硅藻比例下降、蓝藻比例上升^[32-33]。此外,蓝藻的适宜生长温度一般较硅藻高^[34-35],在全球气候变暖的背景下,长江河口段水温的升高(如长江口门附近表层水温自1986年至2000年间已升高了约2℃^[36])也使得蓝藻较硅藻在群落中更有竞争力^[34-35]。因此,长江河口段浮游植物群落的改变可能与人类活动(如水库蓄水和富营养化加剧)和气候变化有关。目前,研究者^[33-35]也普遍认为富营养化加剧和气候变化是全球蓝藻水华持续爆发的主要驱动因子。

表6 丰水期长江河口段网采浮游植物丰度和优势种/属的变化

Table 6 Changes in net-phytoplankton abundance and dominant species/genera in tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season

时间 Time	丰度 Density /($\times 10^4$ 个/ m^3)	优势种 Dominant(属 Genera/%)	文献 Reference
1984-08	95.8	直链藻(62.0—98.0), 圆筛藻(0—15.8), 骨条藻(0—2.6)	[16]
1990-08—09	34.54	骨条藻(64.4), 直链藻(25.1), 琼氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus jonesianus</i> (5.3), 单角盘星藻 <i>Pediastrum simplex</i> (3.8)	[17]
1996-09a	75.18	颗粒直链藻(62.06), 骨条藻(26.71), 圆筛藻(3.87), 颤藻(3.28)	[18]
1996-09b	3798.38	骨条藻(98.49), 颗粒直链藻(0.85), 圆筛藻(0.40), 颤藻(0.01)	
1998-08	2265.80	骨条藻, 颗粒直链藻, 星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	[19]
1999-08	11.17		
2000-07	36.82		
2002-08	260.96		
2003-08	117.33		
2009-06	204.19	颤藻(43.5), 骨条藻(31.5), 鱼腥藻(4.6), 微囊藻(3.6)	本文 This study
2009-08	347.75	骨条藻(20.3), 微囊藻(18.2), 颤藻(15.5), 腔球藻(11.9), 直链藻(10.2), 席藻(8.4)	本文 This study

a:落憩 Low tide;b:涨憩 Flood slack

致谢:感谢北斗号全体船员在样品采集时的大力协助。

References:

[1] Yu Z M, Shen Z L. Eutrophication in the Changjiang River Estuary and Adjacent Waters. Beijing: Science Press, 2011: 1-549.

[2] Yang S L, Milliman J D, Li P, Xu K. 50000 dams later: erosion of the Yangtze River and its delta. Global and Planetary Change, 2011, 75(1/2): 14-20.

[3] Ye S F, Ding D W, Wang W H. Large-scale estuarine engineering and estuarine habitat fragmentation of water body in the Yangtze River Estuary. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(2): 268-272.

[4] Li D J, Zhang J, Huang D J, Wu Y, Liang J. Oxygen depletion off the Changjiang (Yangtze River) Estuary. Science in China: Ser. D, 2002, 45(12): 1137-1146.

[5] Wang J H, Huang X Q, Liu A C, Zhang Y F. Tendency of the biodiversity variation nearby Changjiang Estuary. Marine Science Bulletin, 2004, 23(1): 32-39.

- [6] Cloern J E, Dufford R. Phytoplankton community ecology: principles applied in San Francisco Bay. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 285: 11-28.
- [7] Guo P Y, Shen H T. Research advance in estuarine phytoplankton ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 139-142.
- [8] Zhou M J, Shen Z L, Yu R C. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(12): 1483-1489.
- [9] Jiang T, Yu Z M, Song X X, Cao X H, Yuan Y Q. Long-term ecological interactions between nutrient and phytoplankton community in the Changjiang estuary. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(4): 887-898.
- [10] Guo Y J, Yang Z Y. Quantitative variation and ecological analysis of phytoplankton in the estuarine area of the Changjiang River. *Studia Marina Sinica*, 1992, 33: 167-189.
- [11] Gu X G, Yuan Q, Yang J W, Hua D. An ecological study on phytoplankton in frontal region of Changjiang Estuarine area. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1995, 2(1): 1-15.
- [12] Luan Q S, Sun J, Shen Z L, Song S Q, Wang M. Phytoplankton assemblage of Yangtze River Estuary and the adjacent East China Sea in summer. *Journal of Ocean University of China*, 2006, 5(2): 123-131.
- [13] Wang Y L, Yuan Q, Shen X Q. Distribution status and change tendency of phytoplankton during summer in Changjiang Estuary and adjacent waters. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(2): 169-172.
- [14] He Q, Sun J. The Netz-phytoplankton community in Changjiang (Yangtze) River Estuary and adjacent waters. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3928-3938.
- [15] Wang J, Chen R S, Zuo T. Characteristics of phytoplankton community structure in the adjacent waters of Yangtze River Estuary after Sluice of the Three Gorges Dam. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2(2): 80-87.
- [16] Office of Integrated Investigation on Coastal and Tidal Flat Resources of Shanghai, 1988. Integrated Investigation Reports on the Coastal and Tidal Flat Resources of Shanghai. Shanghai: Shanghai Science and Technology, 1988: 125-129.
- [17] Shen H, Xu R, Wang G L. Studies on phytoplankton in Waters adjacent to islands of Shanghai. *Marine Science Bulletin*, 1995, 14(4): 26-37.
- [18] Xu Z L, Bai X M, Yuan Q, Jiang Z, Gu X G. An ecological study on phytoplankton in the Changjiang estuary. *Journal of Fishery Science of China*, 1999, 6(5): 52-54.
- [19] Tang L, Zhang J P, Xu Z L, Chen Y Q. Study on annual variation of phytoplankton community and environment factors in the Yangtze Estuary. *Environmental Monitoring in China*, 2007, 23(2): 97-101.
- [20] van Damme S, Struyf E, Maris T, Cox T, Meire P. Characteristic aspects of the tidal freshwater zone that affect aquatic primary production // Barendregt A, Whigham D F, Baldwin A H, eds. *Tidal Freshwater Wetlands*. Leiden: Backhuys Publishers, 2009: 123-136.
- [21] Schuchardt B, Haesloop U, Schirmer M. The tidal freshwater reach of the Weser estuary: riverine or estuarine? *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 1993, 27(2/4): 215-226.
- [22] Muylaert K, Sabbe K. Spring phytoplankton assemblages in and around the maximum turbidity zone of the estuaries of the Elbe (Germany), the Schelde (Belgium/The Netherlands) and the Gironde (France). *Journal of Marine System*, 1999, 22(1): 13-149.
- [23] Marshall H G. Phytoplankton of the York River. *Journal of Coastal Research*, 2009, 57: 59-65.
- [24] Domingues R B, Anselmo T P, Barbosa A B, Sommer U, Galvão H M. Light as a driver of phytoplankton growth and production in the freshwater tidal zone of a turbid estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 91(4): 526-535.
- [25] Underwood G J C. Microphytobenthos and phytoplankton in the Severn estuary, UK: present situation and possible consequences of a tidal energy barrage. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 61(1/3): 83-91.
- [26] Min H M, Ma J H. Benthic diatoms from the tidal flat of Shanghai, China, during 2005 summer. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2007, 15(5): 390-398.
- [27] Chen X H, Chen X J, Tang J Q, Yan W H, Zhao Q, Wang M H. A report on the community character of phytoplankton in Jiangsu Section of the Yangtze River. *Journal of Aquaculture*, 2006, 27(4): 11-16.
- [28] Wang J H. Phytoplankton communities in three distinct ecotypes of the Changjiang Estuary. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(3): 422-428.
- [29] Cheng X Y, Li S J. An analysis on the evolvement processes of lake eutrophication and their characteristics of the typical lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(13): 1603-1613.
- [30] Carstensen J, Henriksen P, Heiskanen A S. Summer algal blooms in shallow estuaries: definition, mechanisms, and link to eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52(1): 370-384.
- [31] Yang H, Zeng B, Sun X Y, Wu Z X. Effect of impoundment on community structure of the phytoplankton in the main stream of the Three Gorges Reservoir of Changqing. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, 36(4): 715-723.
- [32] Burkholder J M, Larsen L M, Glasgow H B, Mason K M, Gama P, Parsons J E. Influence of sediment and phosphorus loading on phytoplankton communities in an urban piedmont reservoir. *Lake and Reservoir Management*, 1998, 14(1): 110-121.
- [33] Paerl H W, Otten T G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology*, 2013, 65(4): 995-1010.

- [34] Johnk K D, Huisman J, Sharples J, Sommeijer B, Visser P M, Stroom J M. Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria. *Global Change Biology*, 2008, 14(3): 495-512.
- [35] O'Neil J M, Davis T W, Burford M A, Gobler C J. The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae*, 2012, 14: 313-334.
- [36] Zhou X Y, Hu D B, Wang C Z, Hu X J, Yao S K. Seasonal and interannual SST variations in the Changjiang Estuary. *Periodical of Ocean University of China*, 2005, 35(3): 357-362.

参考文献:

- [1] 俞志明, 沈志良. 长江口水域富营养化. 北京: 科学出版社, 2011: 1-549.
- [3] 叶属峰, 丁德文, 王文华. 长江河口大型工程与水体生境破碎化. *生态学报*, 2005, 25(2): 268-272.
- [5] 王金辉, 黄秀清, 刘阿成, 张有份. 长江口及邻近水域的生物多样性变化趋势分析. *海洋通报*, 2004, 23(1): 32-39.
- [7] 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.
- [10] 郭玉洁, 杨则禹. 长江口浮游植物的数量变动及生态分析. *海洋科学集刊*, 1992, 33: 167-189.
- [11] 顾新根, 袁骐, 杨蕉文, 华棣. 长江口羽状锋海区浮游植物的生态研究. *中国水产科学*, 1995, 2(1): 1-15.
- [13] 王云龙, 袁骐, 沈新强. 长江口及邻近海域夏季浮游植物分布现状与变化趋势. *海洋环境科学*, 2008, 27(2): 169-172.
- [14] 何青, 孙军. 长江口及其邻近水域网采浮游植物群落. *生态学报*, 2009, 29(7): 3928-3938.
- [15] 王俊, 陈瑞盛, 左涛. 三峡工程截流后长江口邻近海域的网采浮游植物群落结构特征. *水生态学杂志*, 2009, 2(2): 80-87.
- [16] 上海市海岸带和滩涂资源综合调查组. 上海市海岸带和滩涂资源综合调查报告. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 125-129.
- [17] 沈竑, 徐韧, 王桂兰. 上海市海岛周围水域浮游植物的调查研究. *海洋通报*, 1995, 14(4): 26-37.
- [18] 徐兆礼, 白雪梅, 袁骐, 蒋玫, 顾新根. 长江口浮游植物生态研究. *中国水产科学*, 1999, 6(5): 52-54.
- [19] 汤琳, 张锦平, 徐兆礼, 陈亚瞿. 长江口邻近水域浮游植物群落动态变化及其环境因子的研究. *中国环境监测*, 2007, 23(2): 97-101.
- [26] 闵华明, 马家海. 上海市滩涂夏季底栖硅藻初步研究. *热带亚热带植物学报*, 2007, 15(5): 390-398.
- [27] 陈校辉, 陈学进, 唐建清, 严维辉, 赵钦, 王明华. 长江江苏段浮游植物群落结构特征调查报告. *水产养殖*, 2006, 27(4): 11-16.
- [28] 王金辉. 长江口3个不同生态系的浮游植物群落. *青岛海洋大学学报*, 2002, 32(3): 422-428.
- [31] 杨浩, 曾波, 孙晓燕, 吴忠兴. 蓄水对三峡库区重庆段长江干流浮游植物群落结构的影响. *水生生物学报*, 2012, 36(4): 715-723.
- [36] 周晓英, 胡德宝, 王赐震, 胡学军, 姚圣康. 长江口海域表层水温的季节、年际变化. *中国海洋大学学报*, 2005, 35(3): 357-362.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.18 Sep. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Development of agroecology in USA	HUANG Guoqin, McCullough Patrick E. (5449)
Research progress on water footprint	MA Jing, PENG Jian (5458)
Analysis and evaluation of the eco-economic systems of the main crops (rice, cotton and rapeseed) in Jiangxi Province, China	SUN Weimin, OU Yizhi, HUANG Guoqin (5467)
Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality	DONG Lei, LI Jiyue (5477)
Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications	ZENG Dongping, JIANG Liling, ZENG Congsheng, et al (5484)
Composition and fractal features of purple soil aggregates during the vegetation restoration processes in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Yihao, GENG Yanghui, HUANG Zhonghua (5493)
Impacts of different surface covers on soil respiration in urban areas	FU Zhihong, HUYAN Jiaoqi, LI Feng, et al (5500)
Chilling sensitivities of three closely related plants with different invasiveness in South China	WANG Yutao, LI Chunmei, LI Shaoshan (5509)
The flower syndrome and pollination adaptation of desert rare species <i>Eremosparton songoricum</i> (litv.) Vass.(Fabaceae)	SHI Xiang, LIU Huiliang, ZHANG Daoyuan, et al (5516)
Competitive effect of <i>Pistia stratiotes</i> to rice and its impacts on rice yield and soil nutrients	SHEN Shicai, XU Gaofeng, ZHANG Fudou, et al (5523)
Photosynthetic physiological ecology characteristics of rare medicinal plants <i>Bletilla striata</i>	WU Mingkai, LIU Hai, SHEN Zhijun, et al (5531)
Photosynthetic responses to Solar UV radiation of <i>Gracilaria lemaneiformis</i> cultured under different temperatures and CO ₂ concentrations	YANG Yuling, LI Wei, CHEN Weizhou, et al (5538)
The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field	QIN Xiaobo, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al (5546)
Effects of nitrogen management on NH ₃ volatilization and nitrogen use efficiency under no-tillage paddy fields	MA Yuhua, LIU Bing, ZHANG Zhisheng, et al (5556)
Study on characteristics of net photosynthetic rate of two kinds of tree shape and Impact Factors in Korla fragrant pear	SUN Guili, XU Min, LI Jiang, et al (5565)
Effects of sand burial on growth, survival, photosynthetic and transpiration properties of <i>Agriophyllum squarrosum</i> seedlings	ZHAO Halin, QU Hao, ZHOU Ruilian, et al (5574)
Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China	WANG Hongli, SONG Shangyou, ZHANG Xucheng, et al (5580)
Study on soil aggregates stability of mulberry ridge in Rocky Desertification based on Le Bissonnais method	WANG Sanshu, HUANG Xianzhi, SHI Dongmei, et al (5589)
Effects of fertilization on nitrogen loss with different forms via runoff and seepage under <i>Phyllostachy praecox</i> stands	CHEN Peipei, WU Jiasen, ZHENG Xiaolong, et al (5599)
Characteristics of physiological groups of soil nitrogen-transforming microbes in different vegetation types in the Loess Gully region, China	XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (5608)
Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yueli, et al (5615)
Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in <i>Phyllostachys praecox</i> stand	GUO Ziwu, YU Wenxian, CHEN Shuanglin, et al (5623)
Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Yuchun, YAN Ruirui, et al (5631)
Spatial heterogeneity of fine roots in a subtropical evergreen broad-leaved forest and their sampling strategy based on soil coring method	HUANG Chaochao, HUANG Jinxue, XIONG Decheng, et al (5636)
Changes of leaf traits and WUE with crown height of four tall tree species	HE Chunxia, LI Jiyue, MENG Ping, et al (5644)
Sap flow dynamics of <i>Populus alba</i> L.× <i>P.talassica</i> plantation in arid desert area	ZHANG Jun, LI Xiaofei, LI Jiangui, et al (5655)
Effects of simulated temperature increase and vary little quality on litter decomposition	LIU Ruipeng, MAO Zijun, LI Xinghuan, et al (5661)
The effects of leaf stoichiometric characters on litter turnover in an arid-hot valley of Jinsha River, China	YAN Bangguo, JI Zhonghua, HE Guangxiong, et al (5668)
Comparison of concentrations of non-structural carbohydrates between new twigs and old branches for 12 temperate species	ZHANG Haiyan, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (5675)
Combined effects of root cutting, auxin application, and potassium fertilizer on growth, sugar:nicotine ratio, and organic potassium index of flue-cured tobacco	WU Yanhui, XUE Lixin, XU Zicheng, et al (5686)
Effects of photoperiod and high fat diet on energy intake and thermogenesis in female <i>Apodemus chevrieri</i>	GAO Wenrong, ZHU Wanlong, MENG Lihua, et al (5696)
Effects of dietary chlorogenic acid supplementation on antioxidant system and anti-low salinity of <i>Litopenaeus vannamei</i>	WANG Yun, LI Zheng, LI Jian, et al (5704)

- Responses of desert plant diversity, community and interspecific association to soil salinity gradient ZHANG Xueni, LÜ Guanghui, YANG Xiaodong, et al (5714)
- Community characteristics in a chronosequence of karst vegetation in Mashan county, Guangxi WEN Yuanguang, LEI Liquan, ZHU Hongguang, et al (5723)
- Association between environment and community of *Pinus taiwanensis* in Daiyun Mountain LIU Jinfu, ZHU Dehuang, LAN Siren, et al (5731)
- The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin WANG Wenjun, YANG Wanqin, TAN Bo, et al (5737)
- Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession FAN Yuexin, YANG Yusheng, YANG Zhijie, et al (5751)
- The stoichiometric characteristics of C, N, P for artificial plants and soil in the hinterland of Taklimakan Desert LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (5760)
- A preliminary investigation on the population and behavior of the Tundra Swan (*Cygnus columbianus*) in Poyang Lake DAI Nianhua, SHAO Mingqin, JIANG Lihong, et al (5768)
- Effects of nutrient enrichment and fish stocking on succession and diversity of phytoplankton community CHEN Chun, LI Sijia, XIAO Lijuan, HAN Boping (5777)
- The depositional environment and organic sediment component of Dagze Co, a saline lake in Tibet, China LIU Shasha, JIA Qinxian, LIU Xifang, et al (5785)
- Spatiotemporal variation of interacting relationships among multiple provisioning and regulating services of Tibet grassland ecosystem PAN Ying, XU Zengrang, YU Chengqun, et al (5794)
- Spatial distribution of dissolved amino acids in Lake Taihu, China YAO Xin, ZHU Guangwei, GAO Guang, et al (5802)
- RS- and GIS-based study on ecological function regionalization in the Chaohu Lake Basin, Anhui Province, China WANG Chuanhui, WU Li, WANG Xinyuan, et al (5808)
- Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years LI Zhengguo, YANG Peng, TANG Huajun, et al (5818)
- Species selection for landscape rehabilitation and their response to environmental factors in Poyang Lake wetlands XIE Dongming, JIN Guohua, ZHOU Yangming, et al (5828)
- Temporal and spatial pattern of the phytoplankton biomass in the Pearl River Delta WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (5835)
- Spatio-temporal dynamics of land use/land cover and its driving forces in Nanjing from 1995 to 2008 JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa (5848)
- Changes of organic carbon and its labile fractions in topsoil with altitude in subalpine-alpine area of southwestern China QIN Jihong, WANG Qin, SUN Hui (5858)
- The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou ZHOU Jian, XIAO Rongbo, ZHUANG Changwei, et al (5865)
- Groundwater salt content change and its simulation based on machine learning model in hinterlands of Taklimakan Desert FAN Jinglong, LIU Hailong, LEI Jiaqiang, et al (5874)
- Analysis of coordination degree between urban development and water resources potentials in arid oasis city XIA Fuqiang, TANG Hong, YANG Degang, et al (5883)
- Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: a case in Nantong WEI Chao, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (5893)
- Fish species diversity in Zhongjieshan Islands Marine Protected Area (MPA) LIANG Jun, XU Hanxiang, WANG Weiding (5905)
- Distribution and long-term changes of net-phytoplankton in the tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season JIANG Zhibing, LIU Jingjing, LI Hongliang, et al (5917)
- Study of urban metabolic structure based on ecological network: a case study of Dalian LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin, et al (5926)
- Factors influencing of residents' tolerance towards wild boar in and near nature reserve: Taking the Heilongjiang Fenghuangshan Nature Reserve as the example XU Fei, CAI Tiju, JU Cunyong, et al (5935)
- Herdsmen's willingness to participate in ecological protection in Sanjiangyuan Region, China LI Huimei, ZHANG Anlu, WANG Shan, et al (5943)
- Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (5952)

《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,探索生态学奥秘,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 18 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 18 (September, 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

国内外公开发行人

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元