长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析

栾青杉 孙 军* 宋书群 沈志良 俞志明

(中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室 山东青岛 266071)

摘 要 于2004年8月28日至9月6日在长江口水域进行了水文、化学和生物的综合嵌套式外业调查,应用CANOCO4.0软件对获得的浮游植物物种数据和环境因子数据进行了典范对应分析(CCA),并作出了物种、样点分布与环境因子关系的二维排序图。结果表明,长江水入海所带来的泥沙及其形成的营养盐梯度差异是影响这一区域物种分布格局最重要的因素。根据环境因子与排序轴的相关系数,影响这一海区浮游植物分布的主要环境因子依次为透明度、硝酸盐和硅酸盐。主要浮游植物优势种中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)和细长翼鼻状藻(*Proboscia alata* f. *gracillima*)的分布和硝酸盐以及盐度、浊度密切相关,中肋骨条藻适合在低盐度高浊度高硝酸盐浓度的河口水域生存,而细长翼鼻状藻则分布于高盐度高透明度低硝酸盐浓度的开阔海。排序揭示了浮游植物物种对于生态环境的需求以及它们在不同资源维上的生态分化现象。

关键词 浮游植物 中肋骨条藻 细长翼鼻状藻 环境因子 典范对应分析 长江口

CANONICAL CORRESPONDENCE ANALYSIS OF SUMMER PHYTOPLANKTON COMMUNITY AND ITS ENVIRONMENT IN THE YANGTZE RIVER ESTUARY, CHINA

LUAN Qing-Shan, SUN Jun*, SONG Shu-Qun, SHEN Zhi-Liang, and YU Zhi-Ming

Key Laboratory of Marine Ecology & Environmental Science, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China

Abstract Aims The Yangtze River Estuary (YRE) faces eutrophication caused by discharge of industrial and agricultural sewage. This leads to frequent harmful algae blooms involving the rapid proliferation of specific toxic species. The aims of our study are to: 1) apply scientific methods and field experiments to clarify the distributional relationship between phytoplankton species and the environment, and 2) provide data on species and environment informative for further research on estuary ecosystem protection.

Methods An interdisciplinary survey of hydrological, chemical and biological resources was conducted in the YRE on August 28 – September 6, 2004. Phytoplankton cell counts and species identification were performed with an inverted microscope at $\times 100 - \times 400$ magnification after sedimentation for 24 h in 25 ml Utermöhl chambers. Temperature, salinity, pH and dissolved oxygen were measured by a pre-calibrated YSI 6000. Other abiotic environmental data were obtained based on protocols of marine investigations. Canonical correspondence analysis (CCA) was applied to explore the relationship between phytoplankton species and environmental parameters using CANOCO4.0.

Important findings Turbidity and nutrient gradient along the Yangtze River runoff were the most important factors influencing the distribution of phytoplankton species. Transparency, nitrate and silicate were major factors affecting the phytoplankton community structure. The dominant phytoplankton species *Proboscia alata* f. *gracillima* preferred low nitrate concentration and clear offshore areas, while *Skeletonema costatum* preferred high nitrate and more turbid waters. CCA can be a useful tool to understand the spatial distribution of phytoplankton species in marine ecosystems.

Key words phytoplankton, *Skeletonema costatum*, *Proboscia alata* f. *gracillima*, environmental factors, canonical correspondence analysis, Yangtze River Estuary

浮游植物是海洋中的初级生产者和食物链的基础环节,在全球气候变化、海洋渔业资源和海洋生态

收稿日期:2005-12-29 接受日期:2006-06-19

基金项目:国家自然科学基金重点项目(90211021) 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-232)和国家自然科学基金项目(40676089)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: phytoplankton@163.com

系统的平衡中有着不可或缺的作用。浮游植物的分布与海洋环境之间有着十分密切的关系,浮游植物物种分布的变化对环境的变化具有指示作用,同时环境条件的改变也直接或间接地影响到浮游植物的群落结构(Round, 1981)。海洋浮游植物关键物种在海水中的分布及其随之爆发的水华对海区生态系统有重要的影响,例如长江口附近具齿原甲藻(*Pro-
rocentrum dentatum*)每年春季定期的赤潮爆发(陆斗定等, 2003; 朱根海等, 2003; 孙军等, 2003; 宁修仁等, 2004)。

典范对应分析是一种非线性多元直接梯度分析方法,它把对应分析与多元回归结合起来,每一步计算结果都与环境因子进行回归,而详细地研究物种与环境的关
系(ter Braak, 1986; ter Braak & Prentice, 1988)。不同于以前的直接梯度分析,CCA 可以结合多个环境因子一起分析,包含的信息量大,结果直观明显,从而更好地反映群落与环境的关系(张金屯, 1992; 潘代远等, 1995)。

近年来,国内学者已经开始将典范对应分析应用于植物生态学领域,取得了很好的效果。但是这些研究多集中在陆生植物上(郭水良和曹同, 2000; 郝占庆等, 2003),对于海洋浮游植物的研究还甚少。本文的主要目的就是在对长江口浮游植物群落和环境参数进行调查和测定的基础上,运用典范对应分析来探讨浮游植物分布与环境因子之间的关系,从而对长江口海区的生物多样性保护及渔业生产提供理论指导。

1 研究方法

1.1 航次调查

调查区域设在长江口及东海(30.5°~32.5°N, 121.0°~123.5°E),在河口以内、沿海及外海共设置调查站位 40 个(图 1)。调查时间为 2004 年 8 月 28 日~9 月 6 日。采样按国家海洋局(1975)方式进行,每站位取 500 ml 标准层(0、10、20、50 m、底层(离海底 2 m))水样于聚丙烯瓶中,立即用中性福尔马林(2% 最终浓度)固定。实验室内样品分析按 Utermöhl 方法分析:取 25 ml 浮游植物亚样品于 Hydro-bios 的 Utermöhl 计数框,用 AO 倒置显微镜,在 ×200 和 ×400 倍下进行物种鉴定与计数。细胞数量的统计和误差处理参照孙军等(2002)文献。水深、透明度、水色现场根据国家海洋局(1975)文献进行测定。温度、盐度、pH 值、溶解氧等环境参数用标定好的 YSI 6000 水质分析仪进行现场测定。营养盐

(硝酸盐、硅酸盐、磷酸盐)样品取样和分析,参考国家海洋局(1975)文献进行测定。

1.2 数据分析

CCA 要求两个数据矩阵,一个是物种数据矩阵,一个是环境数据矩阵。物种数据要经过筛选,本文用于排序的物种要满足下面两个条件:该物种在各站位出现的频度 ≥3,该物种在至少一个站位的相对丰度 ≥1%。物种矩阵经过 $\log(x+1)$ 转换后按康奈尔数据文件格式录入成 .spe 文件;环境矩阵除了 pH 值以外都要进行 $\log(x+1)$ 转换,然后录入成 .env 文件。应用国际标准通用软件 CANOCO4.0 进行运算,将生成的数据文件 .sol 应用 CANODRAW3.1 作图,排序结果用物种-环境因子关系的双序图表示(ter Braak & Šmilauer, 1998; Ng & Sin, 2003)。

图 1 长江口浮游植物调查站位图
Fig.1 The phytoplankton sample stations in Yangtze River Estuary

2 实验结果

2.1 采样站位与环境的关系

长江口海区浮游植物在地理分布上呈现一定的区域性,这种分布与各种复杂的理化因子和水团的关系十分密切。长江口浮游植物采样站位与环境因子的二维排序图见图 2,用于排序的 24 个站位可分为 4 个组。第一组为 10、16、38、39、40 号站,它们位于长江河口水区,主要受淡水和泥沙的影响,38、39 两个站位在排序图上的位置比较特殊,这是因为它们受潮汐的影响较大,各种环境因子很不稳定。第二组为站位 5、6、9、17、21、22、24,从图上可以看出它们与硝酸盐、硅酸盐和水色有很大的相关性,这些站位位于长江冲淡水区域,受到长江淡水、外海高盐水以及大陆沿岸流等各种水系的影响,因此水体的各

种理化因子较为复杂。第三组的 18、25、28、29、30、31、32 号站非常靠近 CCA 第二排序轴,与海水中的磷酸盐含量有很大的负相关性,台湾暖流和黑潮的余脉对这些站位的物种分布有一定的影响,它们带来的暖水种浮游植物也使得这一区域的物种多样性升高。第四组包括站点 2、7、8、19、20,它们位于长江口外海区,主要受到黄海和东海混合水的影响,其中 2、8 号站与水深、pH 值和盐度 3 个环境因子有很大的正相关性,而 7、19、20 这 3 个站点,与磷酸盐、溶解氧和透明度的关系较为密切。

图2 长江口海区浮游植物站位与环境关系的 CCA 二维排序图 (数字表示图 1 中的采样站位)

Fig.2 CCA biplot of sample stations and environmental variables in Yangtze River Estuary (Numbers refer to sample stations in Fig. 1)
TRA :透明度 Transparency DEP :水深 Water depth SAL :盐度 Salinity DO :溶解氧 Dissolved oxygen PHO :磷酸盐 Phosphate TEM :温度 Temperature SIL :硅酸盐 Silicate NIT :硝酸盐 Nitrate WC :水色 Water color

2.2 排序效果分析

为比较清楚地反映主要浮游植物分布与环境因子的关系,对物种数据按出现频度和相对丰度进行了筛选,用于 CCA 排序的浮游植物种名录见表 1。排序图中,前两个排序轴的特征值分别为 0.684 和 0.214,环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数分别为 0.977 2 和 0.843 4。两个物种排序轴近似垂直,相关系数为 -0.011 2,两个环境排序轴的相关系数为 0,说明排序轴与环境因子间线性结合的程度较好地反映了物种与环境之间的关系,排序的结果是可靠的(ter Braak, 1986)。

表 1 长江口主要浮游植物名录
Table 1 List of main phytoplankton species in Yangtze River Estuary

中文名	拉丁学名
1 叉状角藻	<i>Ceratium furca</i>
2 梭角藻	<i>Ceratium fusus</i>
3 洛氏角毛藻	<i>Chaetoceros lorenzianus</i>
4 角毛藻 sp.1	<i>Chaetoceros</i> sp.1
5 偏心圆筛藻	<i>Coscinodiscus excentricus</i>
6 琼氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus jonesianus</i>
7 辐射圆筛藻	<i>Coscinodiscus radiatus</i>
8 圆筛藻 sp.1	<i>Coscinodiscus</i> sp.1
9 布氏双尾藻	<i>Ditylum brightwellii</i>
10 膝沟藻 sp.1	<i>Gonyaulax</i> sp.1
11 菱软几内亚藻	<i>Guinardia flaccida</i>
12 斯氏几内亚藻	<i>Guinardia striata</i>
13 裸甲藻 sp.1	<i>Gymnodinium</i> sp.1
14 螺旋形环藻	<i>Gyrodinium spirale</i>
15 环纹劳德藻	<i>Lauderia annulata</i>
16 颗粒直链藻	<i>Melosira granulata</i>
17 舟形藻 sp.1	<i>Navicula</i> sp.1
18 伪菱形藻 sp.1	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.1
19 伪菱形藻 sp.2	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.2
20 夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i>
21 具槽帕拉藻	<i>Paralia sulcata</i>
22 单角盘星藻	<i>Pediastrum simplex</i>
23 近缘斜纹藻	<i>Pleurosigma affine</i>
24 细长翼鼻状藻	<i>Proboscia alata</i> f. <i>gracillima</i>
25 闪光原甲藻	<i>Prorocentrum micans</i>
26 椭圆原多甲藻	<i>Protoperdinium oblongum</i>
27 原多甲藻 sp.1	<i>Protoperdinium</i> sp.1
28 柔弱伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>
29 尖刺伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>
30 距端假管藻	<i>Pseudosolenia calcar-avis</i>
31 栅藻 sp.1	<i>Scenedesmus</i> sp.1
32 锥状施克里普藻	<i>Scripsiella trochoidea</i>
33 中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>
34 螺旋藻 sp.1	<i>Spirulina</i> sp.1
35 伏氏海线藻	<i>Thalassionema frauenfeldii</i>
36 菱形海线藻	<i>Thalassionema nitzschioides</i>
37 海链藻 sp.1	<i>Thalassiosira</i> sp.1
38 诺氏海链藻	<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>
39 圆海链藻	<i>Thalassiosira rotula</i>
40 铁氏束毛藻	<i>Trichodesmium thiebautii</i>

浮游植物种名更改参见孙军和刘东艳(2002) For phytoplankton species nomenclature changes, refer to Sun & Liu (2002)

3 讨论与结论

3.1 环境因子对浮游植物分布的总体影响
环境因子间的相关系数以及它们与物种第一、第二排序轴的相关系数见表 2。10 个环境因子中,透明度与第一排序轴成最大负相关 -0.956 4,其次为硝酸盐含量,成最大正相关 0.924 9,这说明第一排序轴明确地反映了长江口海区的营养盐和海水混浊状况,即排序图上从左到右,硝酸盐和硅酸盐的含量逐渐增加,透明度逐渐降低;与第二排序轴关系最大的是海水中磷酸盐的含量,其值为 0.287 6,尽管没有达到统计学意义上的显著水平,但还是反映了物种在磷酸盐梯度上的分布,即图3中物种沿着第二

表 2 前 2 个排序轴和 10 个环境因子间的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of ten environmental factors with the first two axes of CCA

	SP1	SP2	EN1	EN2	DEP	SAL	TEM	WC	TRA	DO	PHO	SIL	NIT
SP2	-0.011 2												
EN1	0.977 2***	0.000 0											
EN2	0.000 0	0.843 4***	0.000 0										
DEP	-0.675 0***	-0.174 4	-0.690 7***	-0.206 7									
SAL	-0.831 9***	-0.299 6	-0.851 4***	-0.355 2	0.803 1***								
TEM	0.305 1	0.085 1	0.312 2	0.100 9	-0.340 5	-0.348 3							
WC	0.912 0***	-0.146 3	0.933 3***	-0.173 5	-0.749 8***	-0.764 8***	0.168 4						
TRA	-0.956 4***	0.032 1	-0.978 7***	0.038 0	0.776 1***	0.823 4***	-0.364 8	-0.944 0***					
DO	-0.086 0	0.037 6	-0.088 0	0.044 5	0.296 2	0.235 8	0.355 7	-0.187 1	0.110 3				
PHO	-0.025 1	0.287 6	-0.025 7	0.341 0	-0.307 0	-0.177 9	0.170 6	0.016 8	-0.083 1	-0.211 8			
SIL	0.918 9***	-0.104 1	0.940 4***	-0.123 4	-0.745 4***	-0.802 0***	0.140 6	0.979 8***	-0.937 1***	-0.189 2	-0.020 6		
NIT	0.924 9***	-0.117 5	0.946 4***	-0.139 3	-0.767 6***	-0.818 1***	0.214 7	0.985 2***	-0.952 2***	-0.171 3	0.041 4	0.988 0***	
PH	-0.483 6*	-0.241 3	-0.494 9*	-0.286 2	0.584 3**	0.635 3***	0.043 4	-0.454 6*	0.535 2**	0.385 7	-0.515 0*	-0.529 9**	-0.507 6*

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$ *** : $p < 0.001$ SP1 物种排序轴 1 Species axis 1 SP2 物种排序轴 2 Species axis 2 EN1 环境因子排序轴 1 Environmental factor axis 1 EN2 环境因子排序轴 2 Environmental factor axis 2 DEP、SAL、TEM、WC、TRA、DO、PHO、SIL、NIT : 见图 2 See Fig. 2

图 3 长江口海区浮游植物物种与环境关系的 CCA 二维排序图
Fig.3 CCA biplot of phytoplankton species and environmental variables in Yangtze River Estuary
TRA, DEP, SAL, DO, PHO, TEM, SIL, NIT, WC : 见图 2 See Fig. 2 1~40 : 见表 1 See Table 1

排序轴方向 ,由下而上对磷酸盐的需求逐渐升高。
浮游植物物种和环境因子的二维排序图见图 3 ,位于右下方的物种有 :琼氏圆筛藻(*Coscinodiscus jonesianus*) 圆筛藻 sp.1 (*Coscinodiscus* sp.1) 布氏双尾藻(*Ditylum brightwellii*) 伪菱形藻 sp.2 (*Pseudo-nitzschia* sp.2) 闪光原甲藻(*Prorocentrum micans*) 原多甲藻 sp.1 (*Protoperidinium* sp.1) 尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*) 锥状施克里普藻(*Scripsiella trochoidea*) 从它们所处的位置不难看出 ,这些物种与海水中的硝酸盐梯度有着很大的相关性 ,主要分布在硝酸盐含量高的海水中(Wang *et al.* , 1995 ; Qin *et al.* , 1999) 而琼氏圆筛藻、圆筛藻 sp.1

和诺氏海链藻(*Thalassiosira nordenskiöldii*)对硅酸盐的需求则较高 ,与这些硅藻的实验生态学数据是一致的(Jørgensen , 1979) 位于左上方的膝沟藻 sp.1 (*Gonyaulax* sp.1) 斯氏几内亚藻(*Guinardia striata*) 裸甲藻 sp.1 (*Gymnodinium* sp.1) 伪菱形藻 sp.1 (*Pseudo-nitzschia* sp.1) 细长翼鼻状藻(*Proboscia alata* f. *gracillima*) 距端假管藻(*Pseudosolenia calcaravis*) 与海水的透明度有着极大的相关性 ,由于长江水带来大量的泥沙 ,使得海水的透明度降低、光合作用减弱 ,是影响这些藻种生长繁殖的限制条件 (Parkhill & Cembella , 1999) 除了上述的两种主要影响因子外 ,其它的环境参数也不能忽略。比如 ,与海水温度密切相关的藻种有偏心圆筛藻(*Coscinodiscus excentricus*) 辐射圆筛藻(*Coscinodiscus radiatus*) 环纹劳德藻(*Lauderia annulata*) 单角盘星藻(*Pediastrum simplex*) 栅藻 sp.1 (*Scenedesmus* sp.1) 螺旋藻 sp.1 (*Spirulina* sp.1) 圆海链藻(*Thalassiosira rotula*) 铁氏束毛藻(*Trichodesmium thiebautii*) ;而梭角藻(*Ceratium fusus*) 角毛藻 sp.1 (*Chaetoceros* sp.1) 菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*) 适合在相对低盐度下生存 菱软几内亚藻(*Guinardia flaccida*) 只适合在高盐度下生存 ,螺形旋环藻(*Gyrodinium spirale*) 舟形藻 sp.1 (*Navicula* sp.1) 具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*) 近缘斜纹藻(*Pleurosigma affine*) 柔弱伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia delicatissima*) 伏氏海线藻(*Thalassionema frauenfeldii*) 海链藻 sp.1 (*Thalassiosira* sp.1) 则生存在具有适宜的盐度、水深和 pH 值的环境中 (Thornton & Thake , 1998 ; Lundholm *et al.* , 2004) 从第二排序轴的分析可以看出 ,颗粒直链藻(*Melosira granulata*) 铁氏束毛藻、单角盘星藻、栅藻 sp.1 等对磷酸盐的需求比较高 ,这与蓝藻、绿藻比

硅藻对磷酸盐需求高的规律一致(Jørgensen , 1979)。因此 , 在长江口海区复杂环境条件的综合影响下 , 浮游植物的分布呈现出更加多样化。

3.2 主要优势种与环境的关系

通过浮游植物的水样分析 , 调查海域的主要优势种为细长翼鼻状藻(*Proboscia alata* f. *gracillima*) 和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*) , 前者主要分布在远河口海域 , 而后者主要分布在近河口长江冲淡水域(Luan *et al.* , 2006)。

两种藻的 CCA 分析表明 : 细长翼鼻状藻与海水中硝酸盐含量有着很大的负相关性 , 而与海水的透明度和盐度有着很大的正相关性(图 3)。长江水带来的大量泥沙使得河口区域的透明度降低 , 淡水入海使得河口区域的盐度降低 , 因此 , 细长翼鼻状藻主要分布于外海透明度高、盐度高的海域。同时细长翼鼻状藻与硝酸盐梯度呈负相关 , 不会受到硝酸盐缺乏的影响而成为外海的主要优势种 , 这与以前的研究河口区域营养盐主要是磷限制 , 而离岸较远的外海主要是氮限制是一致的(蒲新明等 , 2001 ; 赵卫红等 , 2004)。

中肋骨条藻的分布与海水的透明度和盐度呈负相关 , 与硝酸盐呈正相关(图 3)。中肋骨条藻生长和繁殖的盐度范围为 10 ~ 20 , 长江河口及冲淡水区域硝酸盐含量高 , 透明度和盐度适中 , 是中肋骨条藻形成水华的主要区域。本次调查中肋骨条藻对硝酸盐需求较高和主要分布于冲淡水的羽状锋区域 , 这些与以前的研究结果相一致(顾新根等 , 1995 ; 刘东艳等 , 2002)。

3.3 排序对物种生态分化的解释

CCA 排序很好地解释了物种与环境之间的内在联系 , 同时也反映出不同物种的生态分化现象。不同物种的浮游植物在形态学上的差异更多的与生态适应联系在一起 , 生态学上的每一个物种在 Hutchinson(1957) 超体积生态位(Hypervolume niche) 的 n 维空间中都有其特定的位置 , 数量排序中的每个物种在多个环境梯度上的空间位置反映了它们在分类学性状上的差异 , 因此 , 通过排序手段研究物种分布与生态环境的关系 , 能够揭示它们在不同环境因子(非生物的和生物的) 上的生态分化现象。从物种与环境的排序图上可以看出 , 分类学上关系较近的物种 , 它们在图中的位置也比较接近 , 这表明浮游植物在形态功能学上对于不同环境的适应性。从大的分类单元来看 , 硅藻、甲藻、绿藻和蓝藻在排序图上都有其各自的区域分布 , 绿藻门的单角盘星藻和

栅藻 sp. 1 , 蓝藻门的螺旋藻 sp. 1 和铁氏束毛藻在排序图中的位置相近 , 表现出它们在生态适应上的趋同性 ; 从小的分类单元来看 , 同一科属的不同物种之间对于生态环境要求的差异也能够被分辨 , 例如圆筛藻属的琼氏圆筛藻和辐射圆筛藻 , 海链藻属的诺氏海链藻和圆海链藻 , 皆表现出它们对于生态位中 n 维资源的不同依赖。

浮游植物分布与环境的关系分析受时空尺度影响很大 , 本文应用典范对应分析对大量的数据进行直接梯度排序 , 进一步揭示了该海区关键浮游植物种对环境因子的响应 , 为浮游植物群落生态学研究提供一种新的工具 , 其它海区的工作也需要陆续展开。同时 , 由于该海区生态环境和动力学过程的复杂性 , 更多的结论有待于实验或现场工作去验证和完善。

参 考 文 献

- Gu XG (顾新根) , Yuan Q (袁骐) , Yang JW (杨焦文) , Hua D (华棣) (1995) . An ecological study on phytoplankton in frontal region of Changjiang estuarine area. *Journal of Fishery Sciences of China* (中国水产科学) , 2 (1) , 1 - 15. (in Chinese with English abstract)
- Guo SL (郭水良) , Cao T (曹同) (2000) . Studies on relationships of epiphytic bryophytes and environmental factors in forest ecosystems in Changbai Mountain forests. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报) , 20 , 922 - 931. (in Chinese with English abstract)
- Hao ZQ (郝占庆) , Guo SL (郭水良) , Ye J (叶吉) (2003) . Canonical correspondence analysis on relationship of woody plants with their environments on the northern slope of Changbai Mountain. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报) , 27 , 733 - 741. (in Chinese with English abstract)
- Hutchinson GE (1957) . *A Treatise on Limnology*, Vol. 1. John Wiley & Sons Inc, New York.
- Jørgensen SE (1979) . *Handbook of Environmental Data and Ecological Parameters*. International Society for Ecological Modelling, Copenhagen.
- Liu DY (刘东艳) , Sun J (孙军) , Chen ZT (陈宗涛) , Wei TD (魏天迪) (2002) . Effect of N/P ratio on the growth of a red tide diatom *Skeletonema costatum*. *Transactions of Oceanology and Limnology* (海洋与湖泊通报) , (2) , 39 - 44. (in Chinese with English abstract)
- Lu DD (陆斗定) , Qi YZ (齐雨藻) , Goebel J , Zou JZ (邹景忠) , Gao YH (高亚辉) (2003) . Redescription of *Prorocentrum donghaiense* Lu and comparison with relevant *Prorocentrum* species. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报) , 14 , 1060 - 1064. (in Chinese with English abstract)
- Luan QS , Sun J , Shen ZL , Song SQ , Wang M (2006) . Phytoplankton assemblage of Yangtze River Estuary and the adjacent

- East China Sea in summer, 2004. *Journal of Ocean University of China*, 5, 123 – 131.
- Lundholm N, Hansen PJ, Kotaki Y (2004). Effect of pH on growth and domoic acid production by potentially toxic diatoms of the genera *Pseudo-nitzschia* and *Nitzschia*. *Marine Ecology Progress Series*, 273, 1 – 15.
- Ng SL, Sin FS (2003). A diatom model for inferring sea level change in the coastal waters of Hong Kong. *Journal of Paleolimnology*, 30, 427 – 440.
- Ning XR (宁修仁), Shi JX (史君贤), Cai YM (蔡昱明), Liu CG (刘诚刚) (2004). Biological productivity front in the Yangtze River Estuary and the Hangzhou Bay and its ecological effects. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报), 26(6), 96 – 106. (in Chinese with English abstract)
- Pan DY (潘代远), Kong LS (孔令韶), Jin QH (金启宏) (1995). DCA, CCA and DCCA ordination analysis of salty meadow community in Hutubi, Xinjiang. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 19, 115 – 127. (in Chinese with English abstract)
- Parkhill J, Cembella A (1999). Effects of salinity, light and inorganic nitrogen on growth and toxigenicity of the marine dinoflagellate *Alexandrium tamarense* from northeastern Canada. *Journal of Plankton Research*, 21, 939 – 955.
- Pu XM (蒲新明), Wu YL (吴玉霖), Zhang YS (张永山) (2001). Nutrient limitation of phytoplankton in the Changjiang estuary. II. Condition of nutrient limitation in spring. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报), 23(3), 57 – 65. (in Chinese with English abstract)
- Qin XM, Qian PY, Zou JZ (1999). Effect of nitrogen and phosphorus on the growth of a red tide dinoflagellate *Scrippsiella trochoidea* (Stein) Loeblich III. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 17, 212 – 218.
- Round FE (1981). *The Ecology of Algae*. Cambridge University Press, London. 1 – 653.
- State Ocean Administration (国家海洋局) (1975). *Protocol of Marine Investigation* (海洋调查规范) 3rd edn. Ocean Press, Beijing. (in Chinese)
- Sun J (孙军), Liu DY (刘东艳), Qian SB (钱树本) (2002). A quantitative research and analysis methods for marine phytoplankton: an introduction to Utermöhl method and its modification. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas* (黄渤海海洋), 20(2), 105 – 112. (in Chinese with English abstract)
- Sun J (孙军), Liu DY (刘东艳) (2002). The preliminary notion on nomenclature of common phytoplankton in China Seas Waters. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), 33, 271 – 286. (in Chinese with English abstract)
- Sun J (孙军), Liu DY (刘东艳), Wang ZL (王宗灵), Shi XY (石晓勇), Li RX (李瑞香), Zhu MY (朱明远) (2003). Microzooplankton herbivory during red tide frequent occurrence period in Spring in the East China Sea. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 14, 1073 – 1080. (in Chinese with English abstract)
- ter Braak CJF (1986). Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 67, 1167 – 1179.
- ter Braak CJF, Prentice IC (1988). A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research*, 18, 271 – 317.
- ter Braak CJF, Šmilauer P (1998). *CANOCO Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows: Software for Canonical Community Ordination*. Microcomputer Power, Ithaca, New York, 1 – 351.
- Thornton DCO, Thake B (1998). Effect of temperature on the aggregation of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae) and implication for carbon flux in coastal waters. *Marine Ecology Progress Series*, 174, 223 – 231.
- Wang ZF, Zhang Q, Gong M (1995). The effects of nitrogen, phosphorus, vitamins and trace metals on the growth of the red tide organism *Prorocentrum micans*. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 13, 338 – 342.
- Zhang JT (张金屯) (1992). Analysis of relationships between vegetation and its environmental variables. II. CCA and DCCA constrained ordinations. *Journal of Shanxi University* (山西大学学报), 15, 292 – 298. (in Chinese with English abstract)
- Zhao WH (赵卫红), Li JT (李金涛), Wang JT (王江涛) (2004). Study on nutrient limitation of phytoplankton in field experiment of Changjiang estuary in summer. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 23(4), 1 – 5. (in Chinese with English abstract)
- Zhu GH (朱根海), Xu WY (许卫忆), Zhu DD (朱德第), Shi QS (施青松), Zhang J (张健) (2003). Distribution of phytoplankton and water dynamics environmental factors in high red tide occurrence area of Changjiang River estuary. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 14, 1135 – 1139. (in Chinese with English abstract)