

渤海冬夏季营养盐和叶绿素 a 的分布特征

赵 骞¹, 田纪伟², 赵仕兰¹, 吴自库²

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266003; 2. 中国海洋大学 物理海洋实验室, 山东 青岛 266003)

摘要: 在 2000 年 8 月和 2001 年 1 月对渤海进行的两个航次的调查取样的基础上, 分析渤海营养盐和叶绿素 a 的分布特征, 各海区营养盐的结构以及营养盐和叶绿素 a 的关系。结果表明, 冬季营养盐的浓度高于夏季, 硅酸盐有明显的垂向结构, 40 多年来渤海中部硝酸盐呈现增加趋势; 莱州湾浮游植物生长处于磷限制, 其它海区处于氮限制; 冬季叶绿素 a 的浓度也高于夏季, 叶绿素 a 的季节差异可能与夏季浮游动物对浮游植物的大量摄食有关。

关键词: 渤海; 营养盐; 叶绿素 a

中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2004)04-0034-06

近 20 年来, 随着沿海地区经济的高速发展, 资源开发程度加大, 渤海生态环境发生了比较显著的变化。渤海初级生产力下降^[1], 赤潮发生次数不断增加, 渔业资源衰退, 引起了各界的广泛关注。控制渤海污染, 减轻污染造成的灾害损失, 保护渤海生态环境已经成为刻不容缓的问题。

在渤海的不同海区中, 由于营养盐组成不同, 浮游植物群落结构不同, 生物地球化学过程不同, 对浮游植物生长产生限制的营养盐也不尽相同^[2]。于志刚等^[3]通过分析历史数据认为, 渤海中部海域氮限制的状况正在逐步改变, 活性硅和磷从供给充分改变为硅磷限制的极限。邹立、张经^[4]通过现场实验认为, 在莱州湾附近浮游植物生长受到显著的磷限制, 渤海中部不存在营养盐的限制问题, 渤海海峡也不存在营养盐的限制问题。作者通过冬夏季的现场实测数据, 来分析渤海营养盐和叶绿素 a 的分布特征, 各海区营养盐的结构以及营养盐和叶绿素 a 的关系。

1 资料来源及分析方法

1.1 资料来源

渤海(37° 07' ~ 41° 00' N, 117° 35' ~ 122° 25' E) 是我国北方半封闭的典型浅海, 平均水深 18 m, 面积约 77 000 km²。其自净能力和与外海的交换能力较低, 对污染物的容纳能力有限。在国家重点基础研究

发展规划项目 G1999043812 的支持下, 2000~2001 年在渤海进行了冬夏两次大面调查, 时间分别为 2000 年 8 月 29 日~9 月 5 日和 2001 年 1 月 10~15 日。共在渤海里布设了 60 个(夏季)和 57 个(冬季)观测站, 基本包括了整个渤海, 见图 1。

1.2 分析方法

水深小于 10 m 的, 采取表层和底层的水样。水深大于 10 m 的, 采取表层、底层和中间各层的水样。营养盐检测方法依据《海洋监测规范》, NO₃⁻-N 测定采用镉柱还原法, NO₂⁻-N 测定采用萘乙二胺分光光度法, NH₄⁺-N 测定采用靛酚蓝分光光度法, PO₄³⁻-P 测定采用磷钼蓝分光光度法, SiO₄⁴⁻-Si 测定采用硅钼蓝法。叶绿素 a 用孔径 0.65 μm 的滤膜过滤水样, 所得到的浮游植物用 90% 的丙酮提取其色素, 使用荧光计测定提取液酸化前后的荧光值, 计算出海水中叶绿素 a 的浓度。

收稿日期: 2002-10-08; 修回日期: 2003-02-12

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“渤海环流及其变异对环境容量及质量的影响”(G1999043812); 国家高技术研究发展计划“模块化多源海洋遥感信息融合与同化技术”(2001AA633030)

作者简介: 赵骞(1978-), 男, 江苏苏州人, 硕士研究生, 目前研究方向为渤海生态系统动力学, 电话: 13792445015, E-mail: zhq780514@hotmail.com

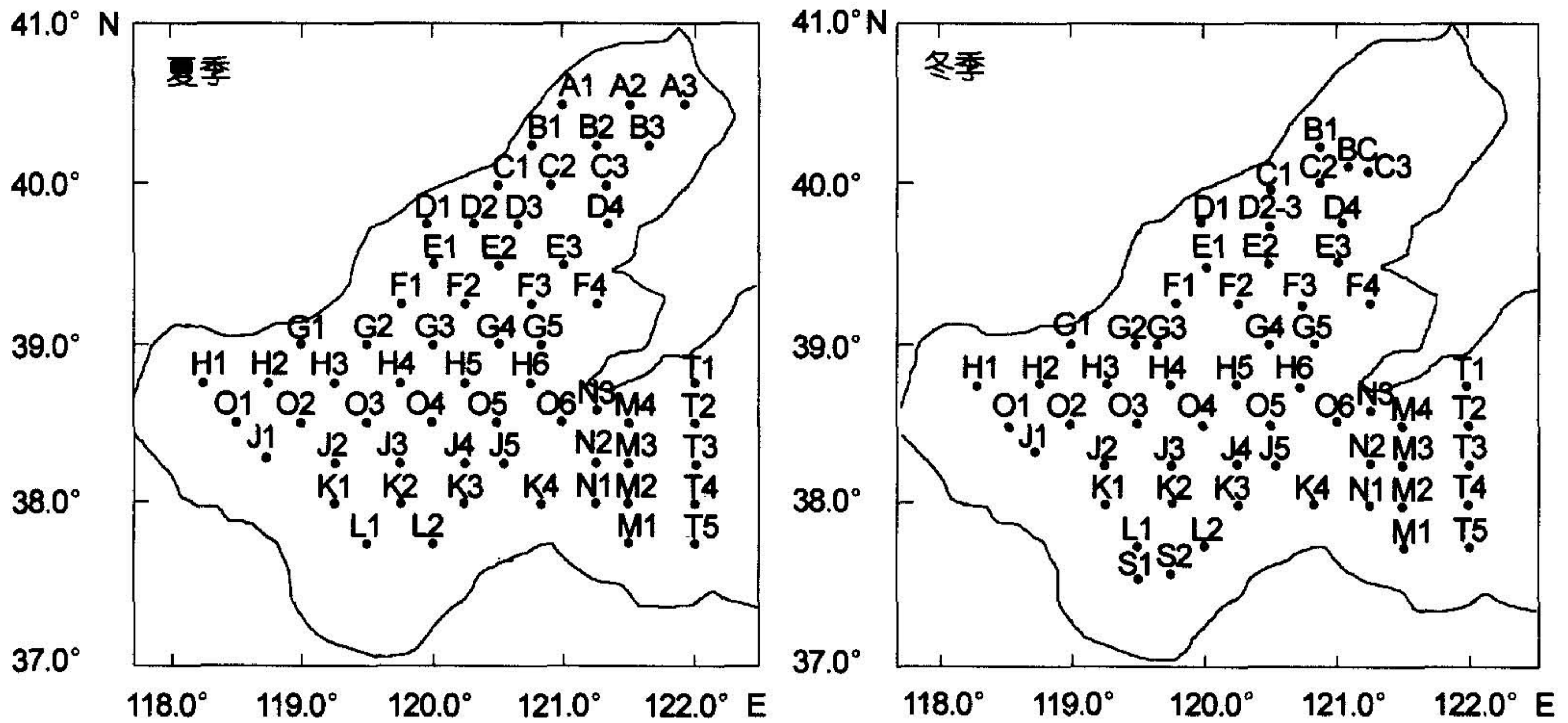


图1 调查站位

Fig. 1 The survey stations

2 结果分析

2.1 营养盐的平面分布特征

铵盐等5项营养盐含量变化范围及平均含量列于表1、表2。

表1 夏季渤海营养盐浓度(c)均值和变化范围

Tab.1 The averages and ranges of nutrients concentration of the Bohai Sea in summer

层次	c(μmol/L)				
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P	SiO ₄ ⁴⁻ -Si
	1.393	0.812	0.589	0.272	6.402
表层	4.053~	6.649~	1.885~	1.722~	16.082~
	0.743	0.000	0.000	0.007	1.695
	1.379	0.644	0.717	0.289	7.708
10 m层	3.933~	3.366~	2.279~	0.726~	21.242~
	0.648	0.000	0.011	0.050	1.586
	1.590	1.123	0.936	0.410	8.826
底层	4.053~	6.801~	3.201~	0.962~	27.195~
	0.720	0.000	0.018	0.007	1.804

比较表1和表2可以看出,除了亚硝酸盐外,渤海冬季的营养盐的平均浓度明显高于夏季,冬季NO₂⁻-N的平均浓度低于夏季。春季(3~5月),随着光照时间的变长,水温的回升,浮游植物的光合作用加强。在经历了春季浮游植物的生长高峰后,海水中的营养盐被大量消耗。到了8月底,海水中

的营养盐含量变的很低。之后,随着河流的输入和秋季层化的消失,秋季营养盐水平逐步回升。渤海4~9月为营养盐消耗期,10月到来年3月为营养盐补充期^[5]。

表2 冬季渤海营养盐浓度均值和变化范围

Tab.2 The averages and ranges of nutrients concentration of the Bohai Sea in winter

层次	c(μmol/L)				
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P	SiO ₄ ⁴⁻ -Si
	2.157	4.277	0.285	0.645	7.717
表层	7.553~	11.727~	2.282~	0.993~	18.626~
	1.149	0.532	0.000	0.057	0.736
	1.988	3.944	0.230	0.663	7.802
10 m层	3.448~	7.398~	1.286~	0.936~	20.700~
	1.196	0.180	0.000	0.134	0.702
	2.096	4.261	0.291	0.649	7.935
底层	6.498~	9.655~	2.286~	1.051~	18.626~
	1.149	0.195	0.000	0.057	0.836

硅酸盐浓度由表层到底层逐渐增加,表现出明显的垂向结构。夏季表层、10 m层、底层的浓度分别是6.402, 7.708, 8.826 μmol/L。冬季表层、10 m层、底层浓度分别是7.717, 7.802, 7.935 μmol/L。底层硅酸盐含量高,不仅与生物体下沉溶解有关,而且与地质表层硅酸盐矿物质的直接溶

解有关。

冬季，硅酸盐底层平均值与表层平均值之差为 $0.218 \mu\text{mol/L}$ ，夏季两者之差为 $2.424 \mu\text{mol/L}$ 。冬季硅酸盐浓度的差异不到夏季的十分之一。其原因是冬季随着温度的下降，表层海水密度变大下沉，

加上冬季大风过程的影响，海水上下充分混合。因此冬季硅酸盐浓度表层与底层的差异小于夏季。在渤海 $38^{\circ}45'$ 处（即调查站位上 H1~H6 的连线）取一断面，以 H1~H6 测站处所测的值做硅酸盐的垂直分布图（图 2），可以明显看到这一特征。

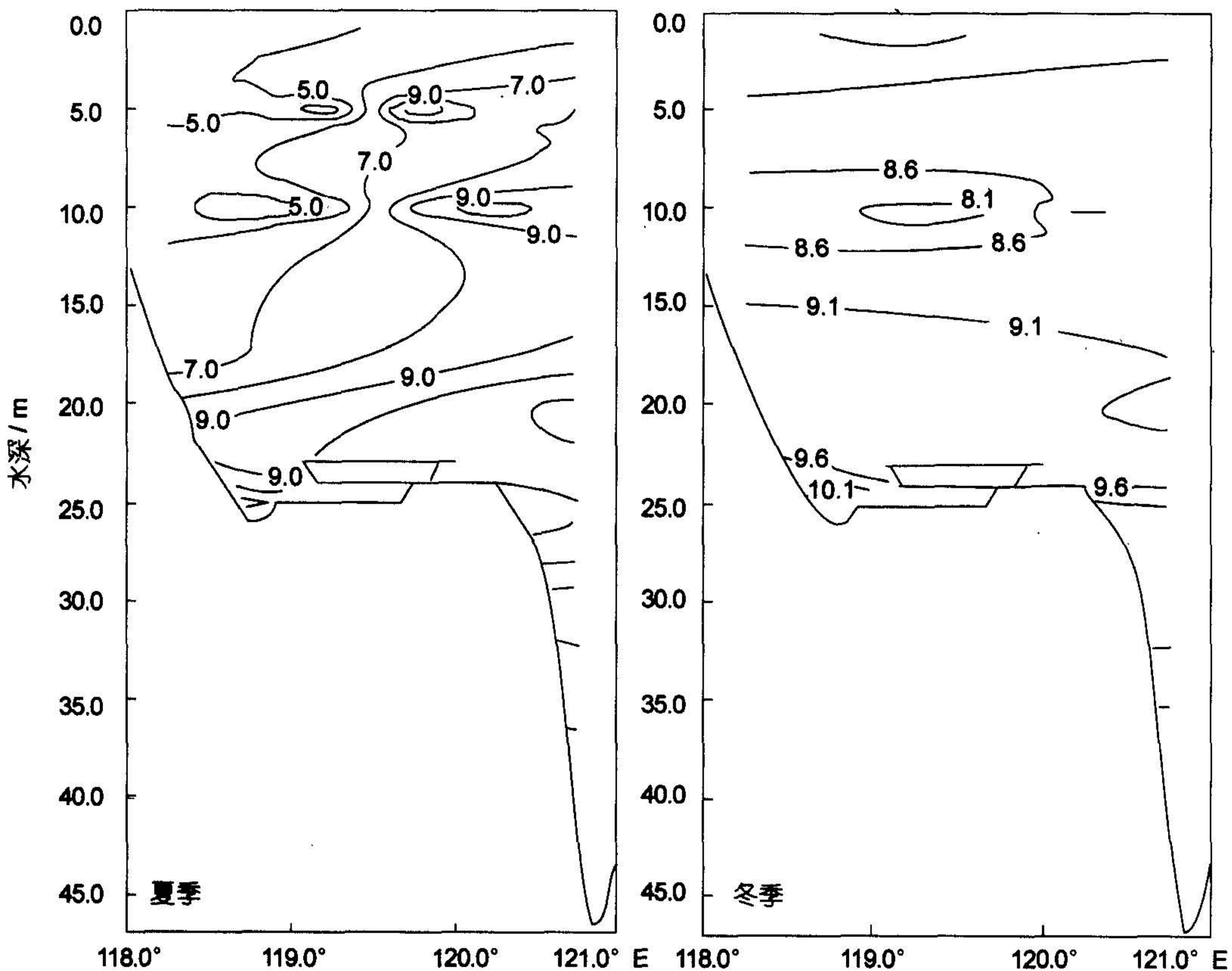


图 2 $38^{\circ}45'$ 断面硅酸盐浓度的分布 ($\mu\text{mol/L}$)

Fig.2 The distribution of the silicate concentration along the $38^{\circ}45'$ section ($\mu\text{mol/L}$)

2.2 渤海营养盐结构分析

调查资料表明^[6,7]，随着环渤海地区经济的发展，渤海的营养盐浓度和结构不断发生变化，30多年来渤海中部硝酸盐浓度呈现明显增加的趋势，从1960年的 $0.30 \mu\text{mol/L}$ 增加到1992年的 $1.74 \mu\text{mol/L}$ ，增加了4.8倍，2000年8~9月和2001年1月硝酸盐浓度的平均值为 $2.085 \mu\text{mol/L}$ ，说明渤海中部的硝酸盐浓度呈现继续上升的趋势。渤海中部磷酸盐和硅酸盐的浓度分别为 0.512 和 $8.440 \mu\text{mol/L}$ ，高于1992年的平均浓度，但是低于1960年和1982年的平均浓度。详见表3。

表 3 渤海中部硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐的平均浓度
Tab.3 Average concentrations of nitrate, phosphate and silicate

时间	$c(\mu\text{mol/L})$		
	NO_3^--N	$\text{PO}_4^{3-}-\text{N}$	$\text{SiO}_4^{4-}-\text{Si}$
1960年	0.30	0.76	26.6
1982年	1.13	1.14	16.96
1992年	1.74	0.36	6.44
2000年8~9月	0.595	0.331	8.504
2001年1月	3.574	0.693	8.376

将整个渤海分成渤海中部、入海口区、莱州湾、渤海湾、辽东湾 5 个区域，分析这 5 个区域的营养盐结构特征。这里所谓的营养盐结构，是指营养盐的相对组成，即 $c(N)/c(P)$ 和 $c(Si)/c(N)$ 。

莱州湾夏季和冬季 $c(N)/c(P)$ 分别为 33.46 和 23.84，远大于海洋生物体内的 $c(N)/c(P)$ (16)，因此莱州湾浮游植物的生长为显著的磷限制。其他海域 $c(N)/c(P)$ 小于 16，浮游植物的生长处于氮限制。

夏季渤海各个海域的 $c(Si)/c(N)$ 明显高于冬季，这是因为硅酸盐的浓度夏季与冬季相比变化不大，但是夏季海水中总无机氮的浓度小于冬季。

渤海硅酸盐的浓度远大于其它 4 种营养盐，并且冬夏两季变化不大，因此可以认为在渤海不存在硅酸盐的限制问题。见表 4。

表 4 渤海 5 个区域的营养盐结构

Tab.4 The nutrients structures of the five segments in the Bohai Sea

区域	$c(N)/c(P)$		$c(Si)/c(N)$	
	夏季	冬季	夏季	冬季
渤海中部	7.43	8.73	3.02	1.38
渤海海峡	8.46	8.67	2.89	0.94
莱州湾	33.46	23.84	1.37	1.03
渤海湾	8.32	13.67	2.46	0.96
辽东湾	10.74	9.09	2.18	1.38

2.3 渤海叶绿素 a 的平面分布特征

从图 3 可以看到在海峡口为叶绿素 a 的高值区，同时在渤海湾的东北部为叶绿素 a 的次高值区，其他海区为低值区。辽东湾、渤海湾、莱州湾的叶绿素 a 的浓度值与历史平均基本一致，但是海峡口的浓度值偏高。

从图 4 可以看到莱州湾北部和渤海中部存在高值区，浓度 2 mg/m^3 ，其他海区为低值区。

从图 5 可以看到渤海的中西部和海峡口南部为叶绿素 a 的高值区，叶绿素 a 的浓度超过 2 mg/m^3 。其它海区为低值区。

从图 6 可以看到莱州湾为叶绿素 a 的高值区，浓度超过 3 mg/m^3 ，海峡口为叶绿素 a 的次高值区，浓度接近 2 mg/m^3 ，其它海区为低值区。

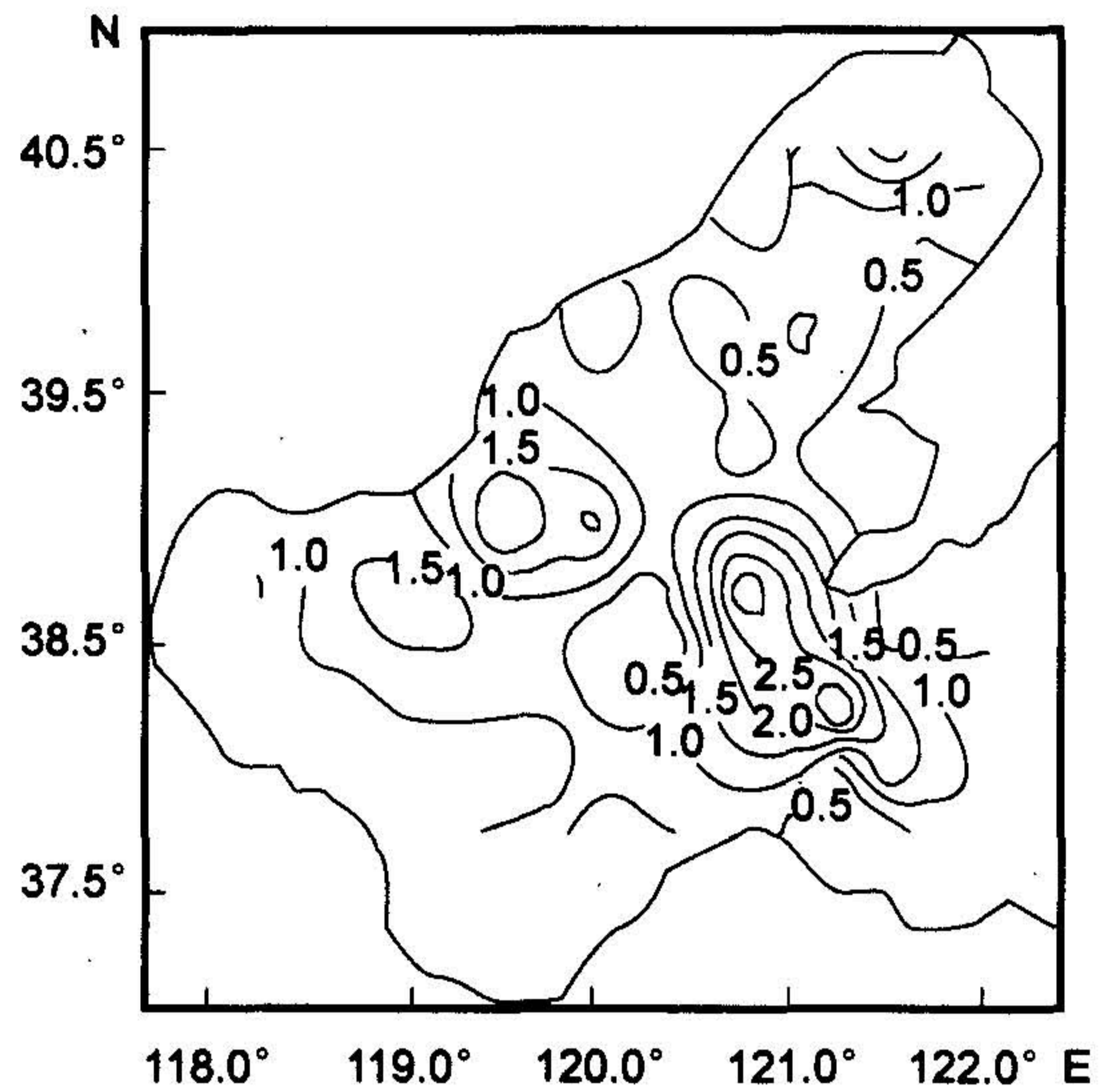


图 3 2000 年 8 月渤海表层叶绿素浓度分布 (mg/m^3)
Fig.3 Surface distribution of chlorophyll a in the Bohai Sea in Aug.,2000(mg/m^3)

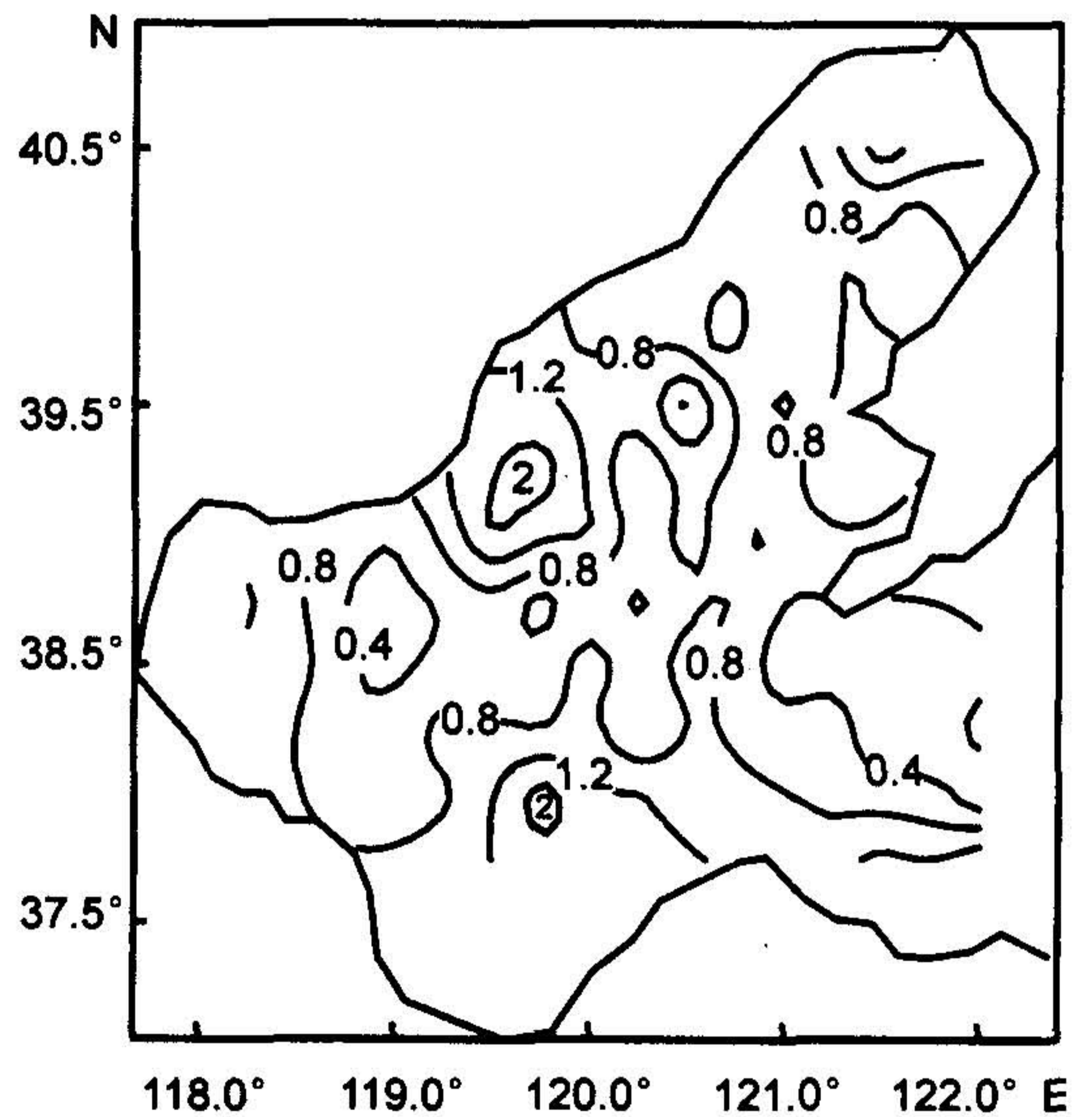


图 4 2000 年 8 月渤海底层叶绿素浓度分布 (mg/m^3)
Fig.4 Bottom distribution of chlorophyll a in the Bohai Sea in Aug.,2000(mg/m^3)

从表 5 可以看出，冬季渤海各海域叶绿素 a 的浓度都高于夏季，尤其以莱州湾最为明显，其冬季叶绿素 a 的浓度为 2.902 mg/m^3 ，高于夏季的 0.923 mg/m^3 ，大约是夏季的 3 倍。其次是海峡口，冬季叶绿素 a 的

浓度大约是夏季的2倍。渤海中部、渤海湾、辽东湾冬季叶绿素a的浓度略高于夏季。

表5 渤海5个区域叶绿素a浓度的平均值

Tab.5 The averages of the chlorophyll a concentration of the five segments in the Bohai Sea

区域	叶绿素a的平均浓度(mg/m ³)	
	夏季	冬季
渤海中部	0.959	1.153
渤海海峡	0.643	1.348
莱州湾	0.923	2.902
渤海湾	0.700	0.940
辽东湾	0.738	1.099

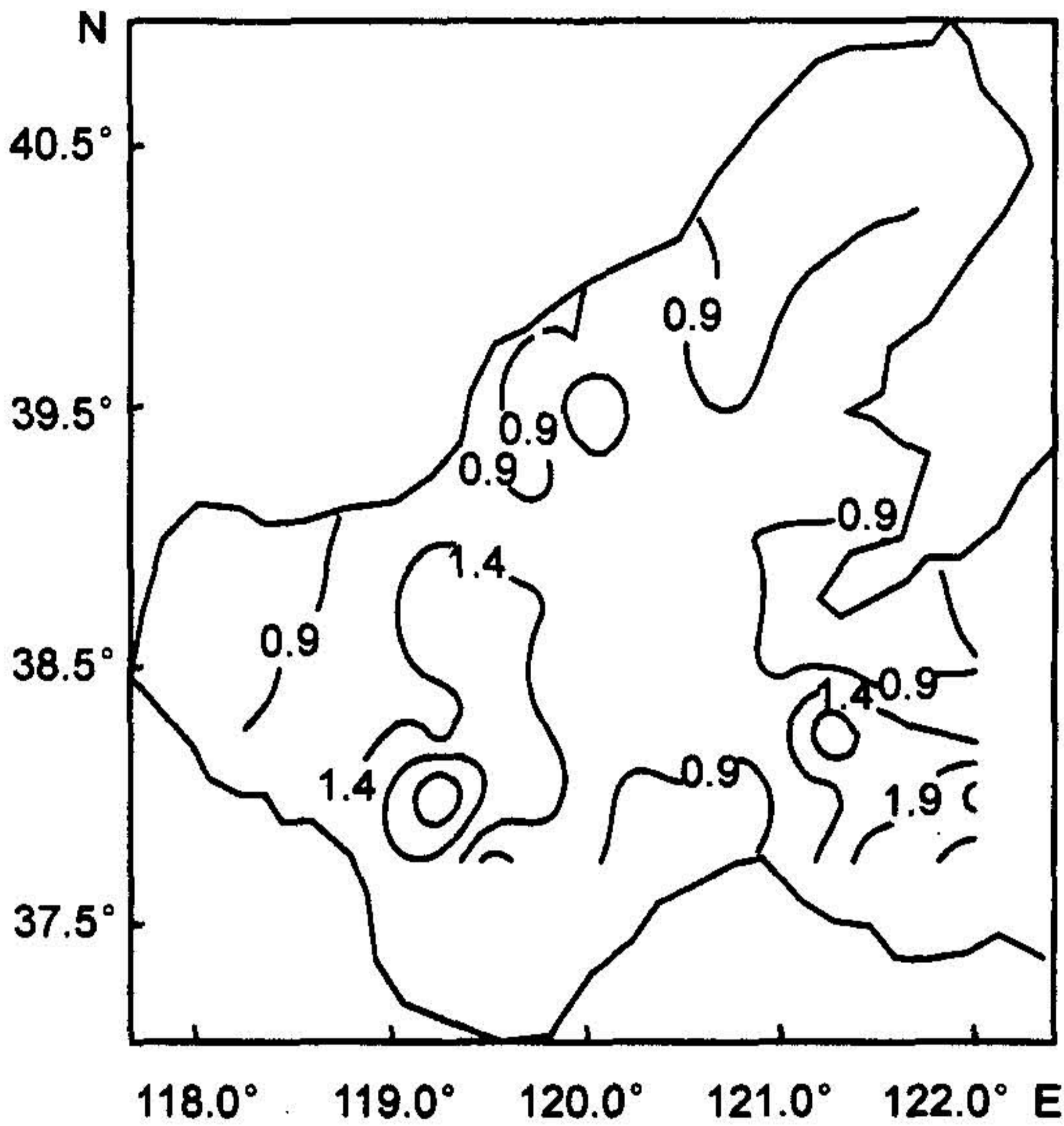


图5 2001年1月渤海表层叶绿素浓度分布(mg/m³)
Fig.5 Surface distribution of chlorophyll a in the Bohai Sea in Jan.,2001(mg/m³)

分析其原因,可能是因为夏季(8~9月)渤海浮游动物(主要是终生浮游动物)总生物量达到全年的第2个高峰,远大于冬季(1月)浮游动物总生物量^[8]。浮游动物对浮游植物的摄食压力很大,导致渤海夏季(8~9月)浮游植物生物量低于冬季(1月初),从而夏季(8~9月)叶绿素a的平均浓度低于冬季(1月)。综上所述,夏季(8~9月)与冬季(1月)相比呈现低营养盐,低浮游植物生物量特征。

3 结论

作者通过分析2000年8月和2001年1月2次渤海调查数据,并结合历史资料,讨论了渤海营养盐和叶绿素a的分布特征以及营养盐对浮游植物生长的限制问题。主要结论如下:(1)冬季(1月)营养盐的浓度高于夏季(8~9月),但是亚硝酸盐的浓度却低于夏季。40多年来渤海中部硝酸盐呈现增加趋势。(2)硅酸盐具有明显的垂向结构,冬季混合层的消失使硅酸盐的垂向差异减弱。(3)莱州湾浮游植物生长处于磷限制,其它海区处于氮限制;在渤海,硅的浓度远高于其它4种营养盐,因此在渤海不存在硅的营养盐限制问题。(4)冬季叶绿素a的浓度也高于夏季,可能与夏季浮游动物对浮游植物的大量摄食有关。夏季(8~9月)与冬季(1月)相比呈现低营养盐,低浮游植物生物量的特征。

参考文献:

- [1] 吕瑞华,夏滨,李保华,等.渤海水域初级生产力10年间的变化[J].黄渤海海洋,1999,17(3): 80-86.

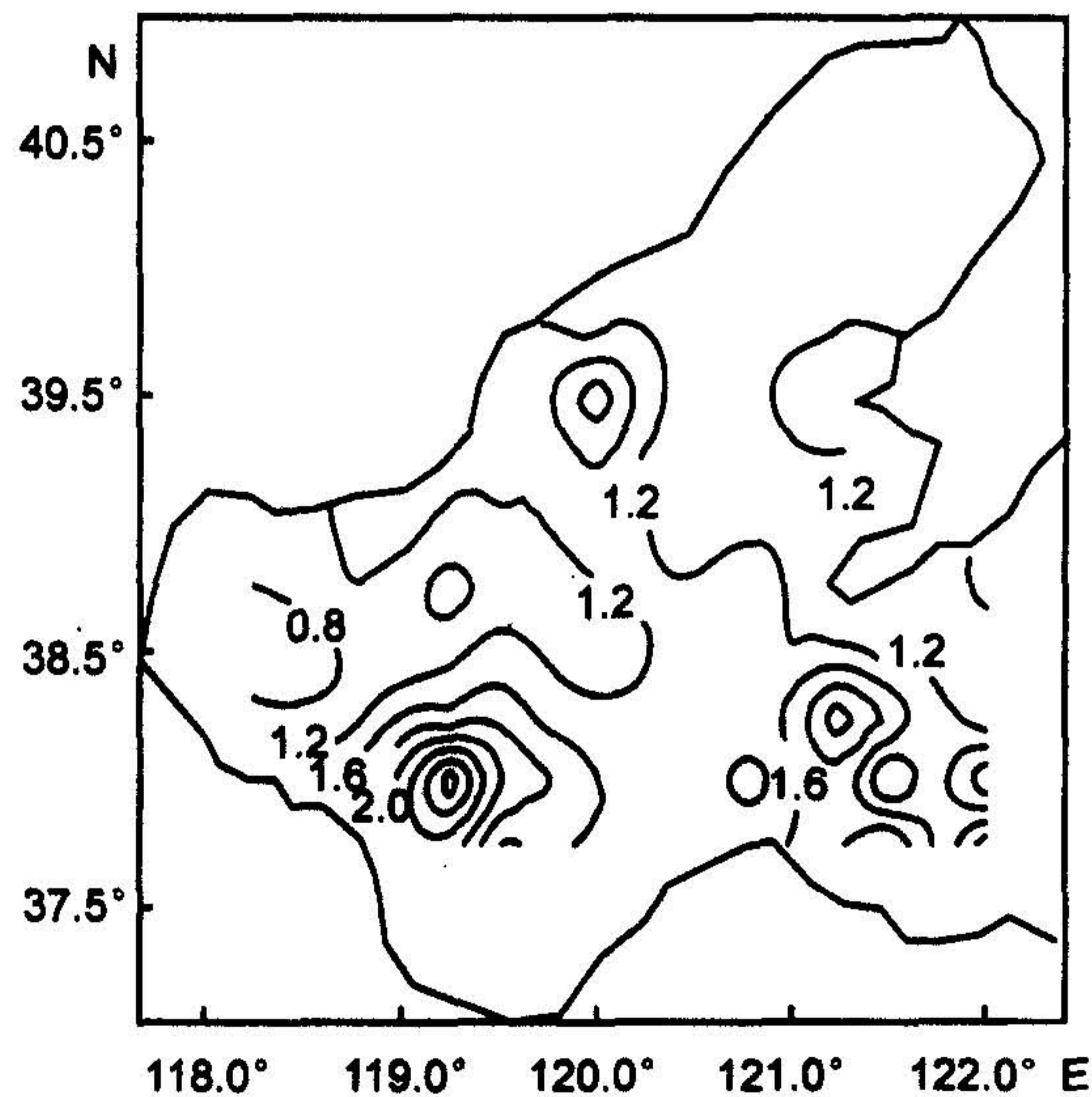


图6 2001年1月渤海底层叶绿素浓度分布(mg/m³)
Fig.6 Bottom distribution of chlorophyll a in the Bohai Sea in Jan.,2001(mg/m³)

- [2] 张平, 沈志良. 2001 营养盐限制的水域特征[J]. 海洋科学, 2001, 25 (6): 16 - 19.
- [3] 于志刚, 米铁柱, 谢宝东. 二十年来渤海生态环境参数的演化和相互关系[J]. 海洋环境科学, 2000, 19 (1): 15 - 19.
- [4] 邹立, 张经. 渤海春季营养盐限制的现场实验[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32 (6): 672 - 678.
- [5] 赵亮, 魏皓, 冯士竿. 渤海氮磷营养盐的循环和收支[J]. 环境科学, 2002, 23 (1): 78 - 81.
- [6] 林庆礼, 宋云利, 杨琴芳, 等. 渤海增殖水化学环境[J]. 海洋水产研究, 1991, 12: 11 - 30.
- [7] 崔毅, 宋云利. 渤海营养状况变化[J], 海洋水产研究, 1996, 17: 57 - 62.
- [8] 白雪娥, 庄志猛. 渤海浮游动物生物量及其主要种类数量变动的研究. 海洋水产研究[J], 1991, 12: 71 - 91.
- [9] 刁焕祥, 沈志良, 刘兴俊, 等. 渤海无机氮的分布[A]. 中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊(25) [C]. 北京: 科学出版社, 1985. 53 - 63.
- [10] 王勇, 焦念志. 北黄海浮游植物营养盐限制的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30 (5): 512 - 518.

Winter and summer chlorophyll a and nutrient distribution and characteristics in the Bohai Sea

ZHAO Qian^{1,2}, TIAN Ji-wei², ZHAO Shi-lan¹, WU Zi-ku²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 26003, China; 2. Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 26003, China)

Received: Oct., 8, 2002

Key words: the Bohai Sea; nutrients; chlorophyll a

Abstract: On the basis of samplings from two cruises carried on in the Bohai Sea during August, 2000 and January, 2001, characteristics of nutrients and chlorophyll a distribution were analyzed. Nutrients structure of the sea area and the relationship between nutrients and chlorophyll a in vestigated. Results show the following: (a) during winter, concentrations of nitrogen are higher than those in summer. (b) Silicate was shown to have a vertical structure. (c) Nitrate levels have increased during the past over forty years in the central Bohai Sea. (d) Phytoplankton growth in Laizhou Bay was subject to phosphate limitation, while in other sea area it is subject to nitrogen limiting. (e) Concentration of chlorophyll a during winter was also higher than in summer, may be related to zooplankton mass-grazing on the phytoplankton in the summer.

(本文编辑: 刘珊珊)