

Article

동중국해 북부해역에서 봄과 여름동안 영양염과 엽록소의 분포특성

김동선^{1*} · 심정희¹ · 이정아¹ · 강영철²¹한국해양연구원 해양환경연구본부²한국해양연구원 부설 극지연구소

(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

The Distribution of Nutrients and Chlorophyll in the Northern East China Sea during the Spring and Summer

Dongseon Kim^{1*}, JeongHee Shim¹, Jeong-Ah Lee¹, and Young-Chul Kang²¹Marine Environment Research Department, KORDI²Korea Polar Research Institute, KORDI

Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : In order to study changes in the marine ecosystem of the East China Sea derived by the global warming and construction of the Three Gorges Dam in the middle of the Changjiang, temperature, salinity, nutrients, and chlorophyll-a were studied intensively in the northern part of the East China Sea during the summer of 2003 and spring of 2004. According to the previous studies, the upwelling of the Kuroshio Current and the Changjiang resulted in a major inputs of nutrients in the East China Sea, but these two inputs may not contribute greatly to a build up of nutrients in the northern East China Sea. In spring, relatively high concentrations of nitrates and phosphates were observed in the western part of the study area, which resulted from the supply of high concentrations of nutrients showing up in the surface waters as a result of vertical mixing from the ocean bottom. The concentrations of nitrates and phosphates observed in summer were lower than those in spring, since the surface waters were well stratified by the larger discharge of fresh water from the Changjiang in summer. The surface nitrate/phosphate ratios ranged from 1.3 to 16 in spring and from 1.1 to 15 in summer and were lower than the Redfield ratio of 16, indicating that the growth of phytoplankton is limited by nitrogen. This results are contrary to the previous results, in which the growth of phytoplankton was limited by phosphate in the East China Sea. The reason for this contrary result is that most nutrients in the surface waters are supplied by vertical mixing from the bottom waters with low nitrate/phosphate ratios, not directly influenced by the Changjiang with high nitrate/phosphate ratios. The depth-integrated chlorophyll observed in summer was similar to the previous results, but those measured in spring were almost twice as high as those found in previous results. The depth-integrated chlorophyll in spring was higher than that of summer, which results from high concentrations of nitrates and phosphates in the surface waters in spring due to active vertical mixing.

Key words : 영양염(nutrients), 엽록소(chlorophyll), 동중국해 북부해역(northern East China Sea), 봄(spring), 여름(summer)

1. 서론

동중국해는 서태평양에서 가장 큰 주변해(marginal sea)로서, 대략 $0.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 의 넓은 대륙붕 위에 있다. 동중국해는 북쪽으로 제주도(북위 $33^\circ 20'$)에서 남쪽으로 대만의 북쪽 해안(북위 25°) 사이에 위치하고 있으며, 동쪽으로는 쿠로시오 해류와 경계를 이루고 있어 이들 사이에서 경계작용(frontal process)과 쿠로시오의 심층수가 대륙붕으로 올라오는 용승작용에 의해 상당한 교환이 이루어지는 것으로 알려져 있다(Wong *et al.* 1991; Liu *et al.* 1992; Chen *et al.* 1995; Chen and Wang 1999). 또한, 서쪽으로는 중국대륙과 경계를 이루고 있어 중국대륙으로부터 장강(양자강)을 통해 상당히 많은 양의 담수가 유입된다. 장강을 통한 담수 유입량은 계절에 따라 큰 변화를 보여, 겨울에는 최저 방류량을 보이고 여름에 최고 방류량을 보인다(Beardsley *et al.* 1985). 겨울동안에는 장강 방류량이 작고 북서풍이 강하게 불기 때문에 장강의 영향이 해안선을 따라 남쪽으로 작은 범위로 한정되어 있다. 하지만 여름에는 많은 방류량과 강한 남풍에 의해 장강 배출수가 대륙붕을 가로질러 동중국해 북쪽 대부분 해역에 영향을 미친다(Beardsley *et al.* 1985; Su and Weng 1994). 여름 동안 장강 입구에서부터 퍼져나오는 혀모양의 저염 해수가 동중국해에서 자주 관측된다. 따라서 동중국해는 진정한 해양환경이라기 보다는 염하구 시스템(estuarine system)에 가까운 것으로 보인다.

장강으로부터 매년 1000 km^3 가량의 담수가 동중국해로 유입된다(Milliman and Jin 1985; Milliman *et al.* 1987). 장강으로부터 유입되는 담수에는 질산염 농도가 비교적 높은 반면 인산염 농도는 그다지 높지 않아, 질소인 비율이 100 이상인 경우도 관측된다(Edmond *et al.* 1985; Tang *et al.* 1990). 장강을 통해 동중국해로 들어오는 질산염과 인산염의 유입량은 각각 60×10^9 과 $1.3 \times 10^9 \text{ mol yr}^{-1}$ 으로, 평균 질산염/인산염 비율은 46이다(Edmond *et al.* 1985). 이 비율은 해양에서 일반적으로 관측되는 질소인 비율인 Redfield ratio(16)보다 월등히 높다. 일반적으로 해양환경에서는 일차생산성이 질소에 의해 제한받고 담수환경에서는 인에 의해 제한받는다(Raymont 1980). 하지만 동중국해의 경우, 장강을 통해 인보다 질소의 유입량이 월등히 많기 때문에 일차생산성은 질소보다는 인에 의해 제한받는다(Harrison *et al.* 1990; Wong *et al.* 1998; Chen *et al.* 1999; Gong *et al.* 2003).

최근 세계에서 가장 큰 삼협댐(Three-Gorges Dam)이 장강 중류에 건설 중이고 2009년에 완공 예정이다. 이 댐이 완공되면 장강을 통해 동중국해로 유입되는 담수량이 감소하게 되고 따라서 영양염 공급이 감소하여 동중국해 해양생태계에 커다란 영향을 미칠 가능성이 높다(Milliman

1997; Humborg *et al.* 1997). 또한 동중국해는 주로 대륙붕 위에 있기 때문에 지구온난화에 의해 수온 상승, 강수량 증가, 해수면 상승 등에 의해 해양환경요인과 해양생태계가 급격히 변화할 가능성이 높다. 따라서 이런 인위적인 요인에 의해 동중국해의 해양환경요인과 해양생태계가 어떻게 변화하는지를 파악하기 위해서 장기 해양관측이 필요하다.

동중국해는 대륙붕이 넓게 잘 발달되어 있어 어장으로서의 가치가 매우 높기 때문에, 동중국해에서 수괴(water mass), 영양염, 엽록소, 일차생산력의 분포에 대해 연구가 상당히 많이 수행되었다(Gong *et al.* 1996; Hama *et al.* 1997; Wong *et al.* 1998; Chen *et al.* 2003; Gong *et al.* 2003; Wang *et al.* 2003; Chen *et al.* 2004). 장강은 동중국해에서 가장 중요한 영양염 공급원 중 하나이기 때문에(Edmond *et al.* 1985), 장강에 인접한 중국 연안해역에서는 영양염이 풍부해서 일차생산력과 식물플랑크톤 생물량이 높게 관측되었다(Hama *et al.* 1997; Gong *et al.* 2003; Chen *et al.* 2004). 하지만 장강에서 멀어질수록 영양염 부족으로 인하여 일차생산력과 식물플랑크톤 생물량도 감소한다. 현재까지 동중국해에서 영양염, 엽록소, 일차생산력에 대한 연구는 주로 중국과 일본에 의해 수행되었고, 연구해역도 중국과 일본에 인접한 해역에 집중되어 있다. 우리나라에서는 동중국해 북부해역에서 영양염과 엽록소 분포에 대한 연구가 수행하였고(오 등 1999; 이 등 2005), 동중국해 외대륙붕에서 저층수의 영양염 기원에 대한 연구도 수행하였다(정 등 2000). 또한, 동중국해 북부해역에서 해양전선 구조와 수계분석에 대한 연구가 다수 수행되었다(양과 이 1999; 김과 한 2000; 손 등 2003; 허와 최 2004; Lie *et al.* 2003).

본 연구는 지구온난화와 삼협댐 건설에 의한 동중국해 해양환경 변화를 파악하기 위해서 장기 해양관측의 일환으로 수행되었으며, 본 논문에서는 2003년 8월과 2004년 4월에 동중국해 북부해역에서 관측한 수온, 염분, 영양염, 엽록소 등에 대한 결과를 보고하고자 한다. 본 연구목적은 동중국해 북부해역에서 봄과 여름에 영양염과 엽록소의 해역별 분포 특성과 계절변화를 파악하고 영양염과 엽록소 분포에 직접적으로 미치는 주요 요인들을 규명하는 것이다.

2. 재료 및 방법

현장조사는 연구선인 이어도호를 이용하여 2003년 8월 26일부터 9월 3일까지, 2004년 4월 29일부터 5월 8일까지 두 차례 이루어졌다. 연구 해역은 북위 $31^\circ 30' \sim 34^\circ$, 동경 $124^\circ 00' \sim 127^\circ 30'$ 으로, 주로 동중국해 북부해역이다(Fig. 1). 조사 정점은 여름에 55점, 봄에 52점으로, 각 정점마다 SeaBird CTD를 이용하여 수온과 염분을 측정하였고,

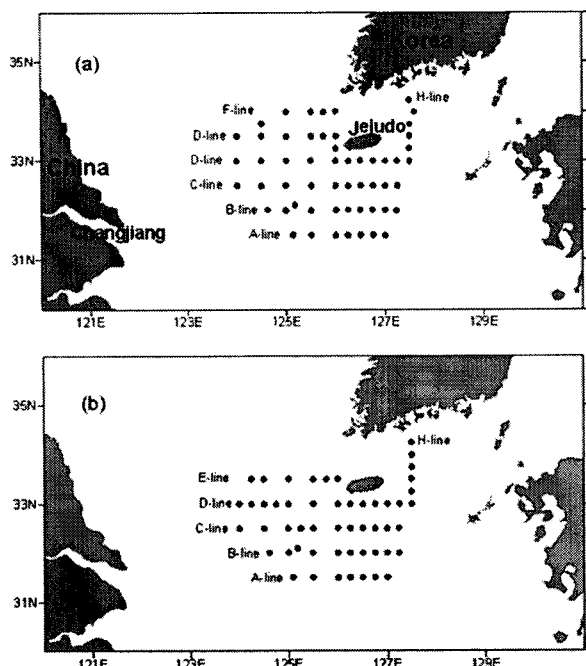


Fig. 1. Study area and sampling stations in August 2003 (a) and April 2004 (b).

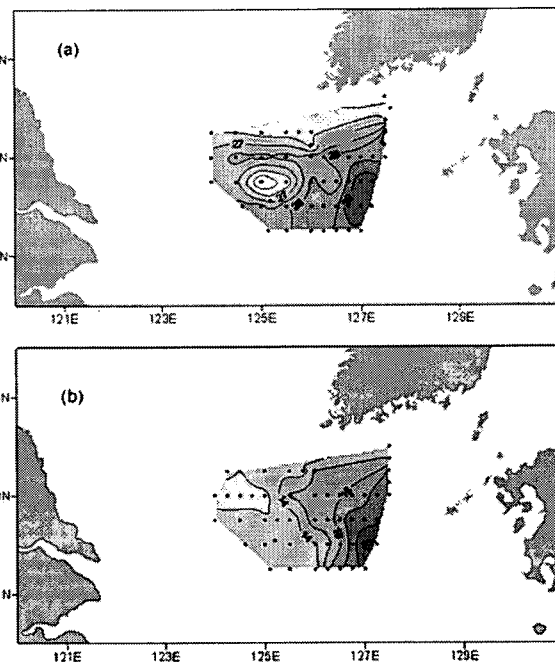


Fig. 2. Surface temperature (°C) in the northern East China Sea in August 2003 (a) and April 2004 (b).

표층에서 해저면까지 표준수심에서 니스킨(Niskin) 채수 병을 이용하여 해수를 채집하였다. 해수 1 l를 0.7 μm Whatman GF/F 여과지로 거른 후, 여과된 해수 60 ml는 영양염 분석을 위해 냉동하였고, GF/F 여과지도 엽록소 분석을 위해 냉동하였다.

질산염과 인산염 농도는 자동이온분석기(LaChat model, QuikChem AE)을 이용하여 측정하였으며, 각각의 측정값은 표준 해수시료(SRM)를 이용하여 검정하였다. 두 번 이상 분석을 통하여 얻은 질산염과 인산염의 정밀도는 5% 이내였다. 엽록소 농도는 90% 아세톤 10 ml로 24시간 동안 추출한 후에 Turner-designed fluorometer(10-006R)를 이용하여 측정하였다. Phaeopigment 농도는 아세톤으로 추출된 엽록소에 1 N 염산을 넣고 1분 30초 후에 Turner-designed fluorometer로 측정하였다. 본 연구에서는 엽록소 측정값에서 phaeopigment 농도를 뺀 보정된 엽록소 (corrected chlorophyll) 값을 이용하였다.

3. 결 과

표층 수온은 여름에 25.4~29.5°C의 범위를 보이는 반면, 봄에는 12.2~19.4°C의 범위를 보여, 10°C 이상의 차이를 나타낸다(Fig. 2). 봄과 여름 모두 대마난류(Tsushima Warm Current)의 영향을 받는 남동해역에서 수온이 높게 나타나고 북서해역으로 갈수록 점차 감소한다. 봄에는 해역에 따

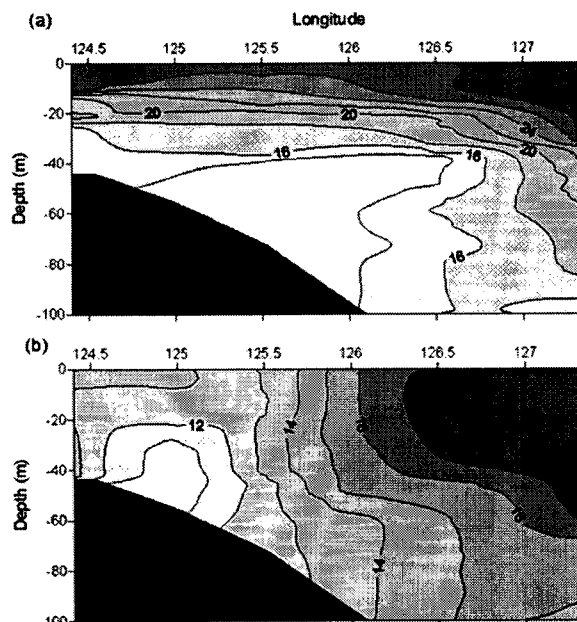


Fig. 3. Temperature (°C) sections along the line-C in August 2003 (a) and April 2004 (b).

른 수온차이가 7.2°C인 반면, 여름에는 4.1°C 가량으로, 봄보다 여름에 해역에 따른 수온 차이가 적다. 수온의 수직분포는 봄과 여름에 매우 큰 차이를 보인다(Fig. 3). 여

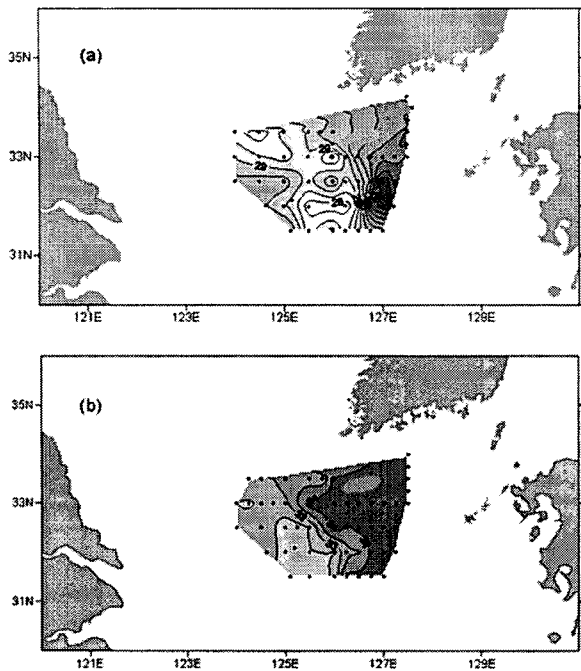


Fig. 4. Surface salinity (psu) in the northern East China Sea in August 2003 (a) and April 2004 (b).

름에 표층 40 m에서 수온은 수심에 따라서 큰 변화를 보이는 반면, 수평적으로는 큰 변화를 나타내지 않는다. 이와 달리 봄에 표층 40 m에서 수온은 수심에 따라서 큰 변화를 보이지 않는 반면, 해역에 따라서는 뚜렷한 변화를 나타낸다. 이런 수온분포는 여름에 표층해수가 성층화가 되어 수직혼합이 거의 일어나지 않고 봄에는 성층이 발달하지 않아 수직혼합이 활발히 일어나고 있음을 지시해준다.

표층 염분은 여름에 27.7~33.2 psu의 범위를 나타내는 반면, 봄에는 32.1~34.5 psu의 범위를 나타낸다(Fig. 4). 표층 염분도 표층 수온과 마찬가지로 대마난류의 영향을 받는 동쪽해역에서 높은 값을 나타내고 장강에 인접한 서쪽해역으로 갈수록 감소한다. 봄에는 해역에 따른 염분차이가 3.4 psu인 반면, 여름에는 5.5 psu로 봄에 비해 여름에 해역에 따른 염분차이가 크게 나타난다. 염분은 여름에 제주도 남쪽해역에 28 psu 이하의 낮은 염분을 갖는 수괴가 형질조각(patch) 형태로 존재한다. 이렇게 염분이 낮은 해수가 형질조각 형태로 존재하는 것은 장강에서 간헐적으로 다량 유입된 담수가 해수와 완전히 섞이지 않고 일부가 해수 중에 포획된 결과로 생각된다. 봄에 비해 여름에 표층염분이 1.3~4.4 psu 가량 낮게 관측되는 것은 여름에 장강을 통해 상당한 양의 담수가 동중국해로 유입되기 때문이다(Milliman and Jin 1985; Wang *et al.* 2003). 염분의 수직분포도 수온과 마찬가지로 봄과 여름에 매우 큰

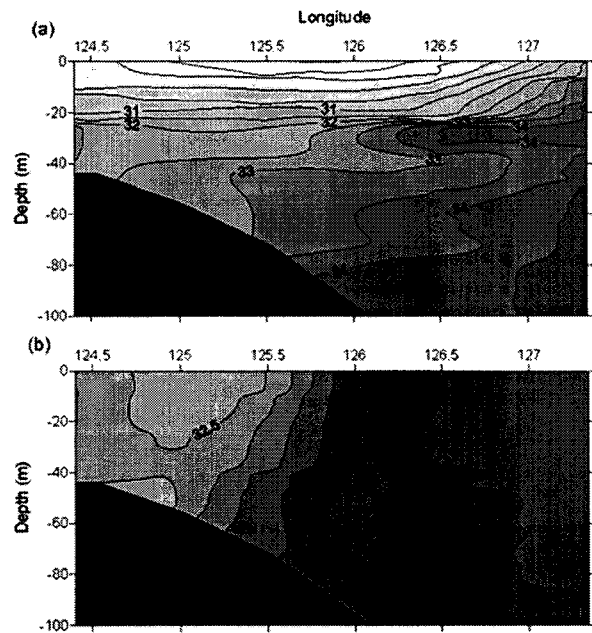


Fig. 5. Salinity (psu) sections along the line-C in August 2003 (a) and April 2004 (b).

차이를 보인다(Fig. 5). 여름에 29.5 psu 이하의 낮은 염분을 갖는 수괴가 경도 125.5°를 중심으로 표층 5 m에 렌즈 형태로 존재한다. 여름에는 염분의 수직변화가 매우 큰 반면, 봄에는 염분이 수직적으로 큰 변화를 나타내지 않는다. 이런 현상도 수온의 경우와 마찬가지로 여름에는 해수의 수직혼합이 미미하지만 봄에는 수직혼합이 활발히 일어나고 있음을 지시해준다.

여름에 관측한 표층 질산염 농도는 장강 인근해역에서 $1\sim 2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 으로 상대적으로 높고 대마난류의 영향을 받는 동쪽해역에서는 $1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하로 낮다(Fig. 6a). 하지만 봄에 관측한 표층 질산염 농도는 장강 인근해역에서 $5\sim 9 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 으로, 여름에 관측한 값보다 3배 이상 높고 그 외 다른 해역에서는 $1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하로 오히려 여름보다 낮은 값들을 나타낸다(Fig. 6b). 질산염 농도는 봄과 여름에 수심에 따라 매우 다른 분포양상을 보인다(Fig. 7). 여름에 질산염 농도는 모든 표층에서 $1\sim 2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 으로 상당히 낮고 수심에 따라 점차 증가하여 수심 40 m에서 $9 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 가량을 나타낸다. 장강에 인접한 서쪽해역에서는 질산염이 수심 20 m에서 $10 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이상의 높은 농도를 보이고 수심에 따른 농도증가도 이 해역에서 매우 큰 반면, 대마난류의 영향을 받는 동쪽해역에서는 질산염이 수심 25 m까지 $1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하의 매우 낮은 농도를 나타낸다(Fig. 7a). 봄에 관측한 질산염은 해역에 따라 매우 다른 수직분포를 나타낸다(Fig. 7b). 서쪽해역(경도 124.5°)에서 질산염은 표층부터 수심 30 m까지

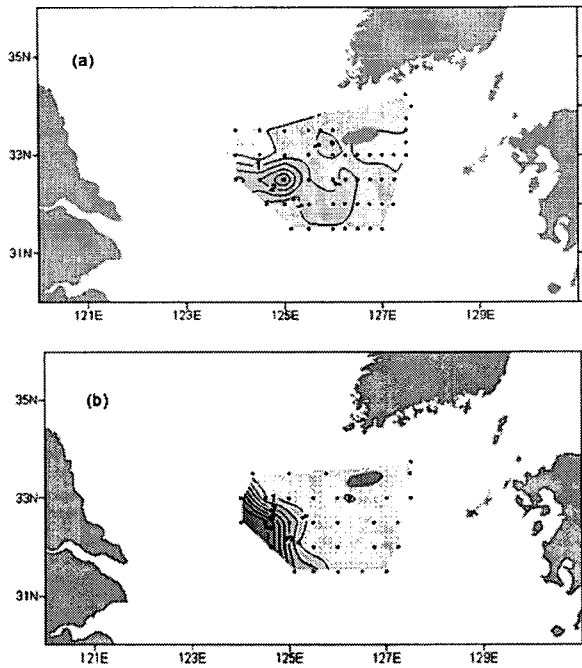


Fig. 6. Surface distribution of nitrate ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) in the northern East China Sea in August 2003 (a) and April 2004 (b).

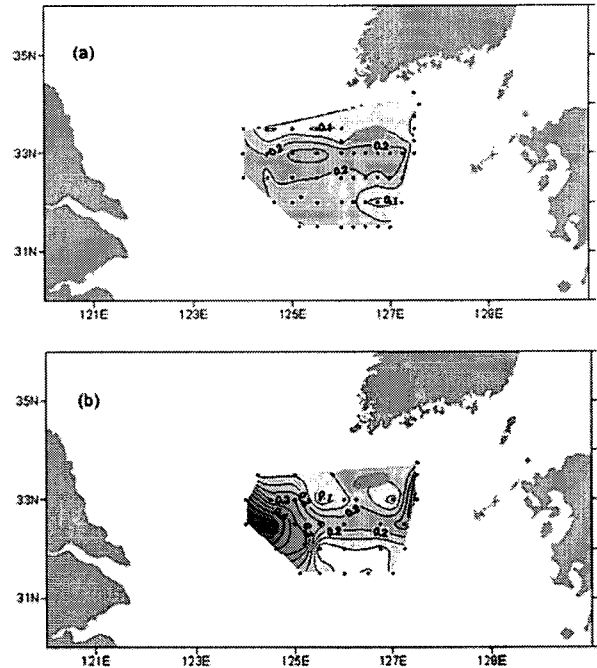


Fig. 8. Surface distribution of phosphate ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) in the northern East China Sea in August 2003 (a) and April 2004 (b).

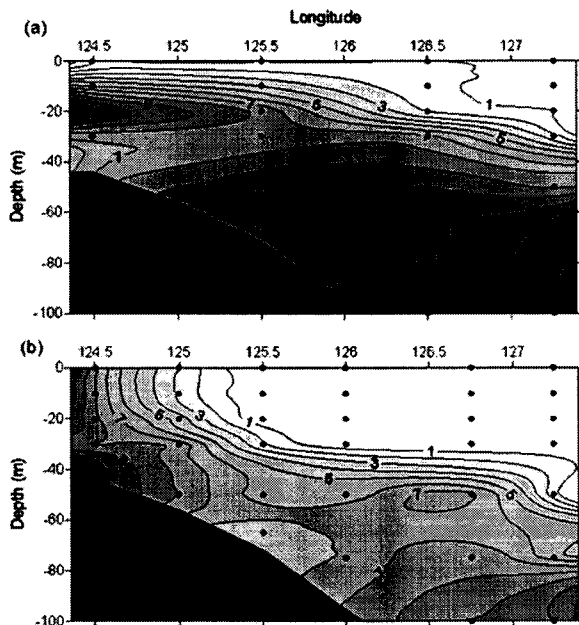


Fig. 7. Vertical distribution of nitrate ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) along the line-C in August 2003 (a) and April 2004 (b).

$8 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이상의 높은 농도를 나타내고 동쪽으로 갈수록 농도가 점차 감소하여 경도 $125.5\sim 127.5^\circ$ 해역, 표층 30 m에서 $1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하의 낮은 농도를 나타낸다. 질산

염의 수직분포도 수온과 염분의 수직분포와 마찬가지로, 여름에는 수직적 농도변화가 뚜렷한 반면, 봄에는 수평적 농도변화가 크다.

표층 인산염 농도는 여름에 제주도 남쪽해역에서 띠형태로 $0.2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이상의 비교적 높은 값을 나타내고 그 외 해역에서는 $0.1\sim 0.2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 으로 낮은 값을 나타낸다(Fig. 8a). 하지만 봄에 관측한 표층 인산염은 장강 인근 해역에서 $0.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이상의 높은 농도를 나타내고 장강에서 멀어질수록 농도가 점차 감소하여 대마난류의 영향을 받는 동쪽해역에서는 $0.1\sim 0.2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 의 농도범위를 나타낸다(Fig. 8b). 인산염도 질산염과 마찬가지로, 봄과 여름에 수심에 따라 매우 다른 농도분포를 보인다(Fig. 9). 여름에 인산염 농도는 모든 표층에서 $0.2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하의 낮은 값을 나타내고 수심에 따라 점차 증가하여 수심 40 m에서 $0.6 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 가량을 나타낸다. 질산염은 서쪽해역 수심 20 m에서 매우 높은 농도를 나타내지만 인산염은 이 해역에서 특별히 높은 농도를 보이지 않는다. 또한 인산염은 질산염과 달리 수심에 따른 농도증가가 해역에 따라 큰 차이를 보이지 않는다. 봄에 관측한 인산염의 수직분포는 질산염의 경우와 유사하다(Fig. 9b). 서쪽해역(경도 124.5°)에서 인산염은 표층부터 수심 30 m까지 $0.6 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이상의 높은 농도를 나타내고 동쪽으로 갈수록 농도가 점차 감소하여 경도 $125.5\sim 127.5^\circ$ 해역,

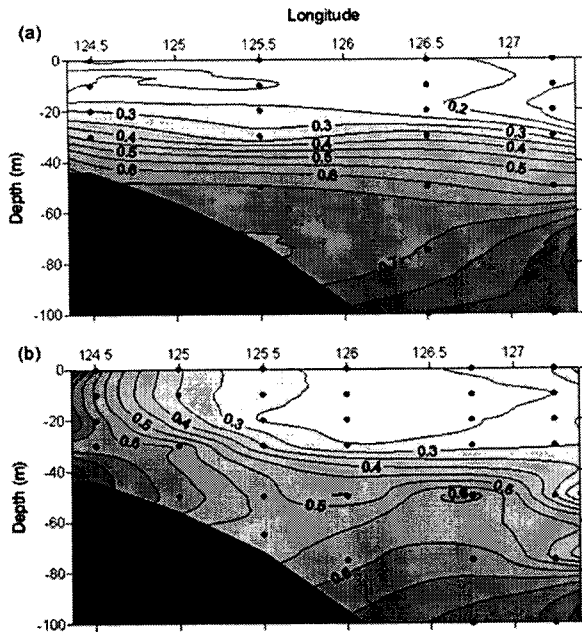


Fig. 9. Vertical distribution of phosphate ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) along the line-C in August 2003 (a) and April 2004 (b).

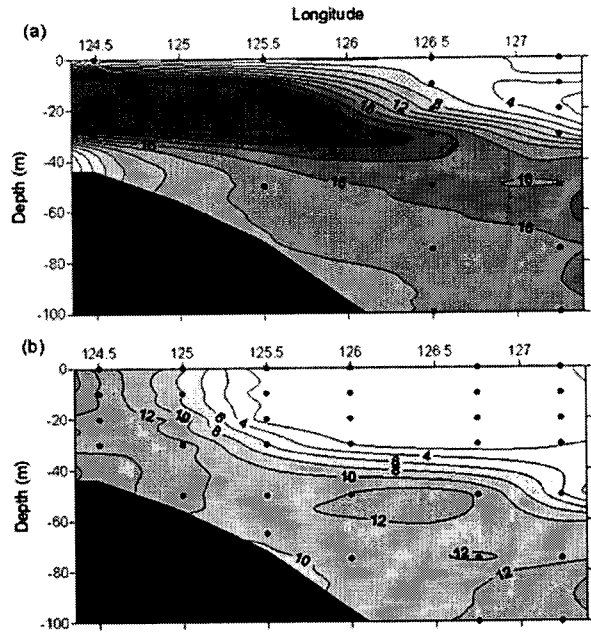


Fig. 11. Vertical distribution of nitrogen/phosphate ratio along the line-C in August 2003 (a) and April 2004 (b).

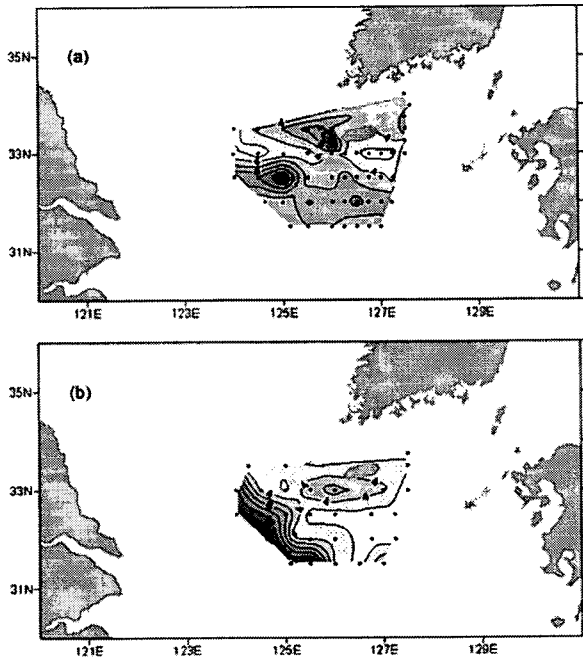


Fig. 10. Surface distribution of nitrogen/phosphorus ratio in the northern East China Sea in August 2003 (a) and April 2004 (b).

표층 30 m에서 $0.3 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하의 낮은 농도를 나타낸다. 인산염의 수직분포도 질산염의 경우와 마찬가지로, 여

름에는 수직적 농도변화가 뚜렷한 반면, 봄에는 수평적 농도변화가 크다.

여름에 측정된 질산염/인산염 비율은 여름에 1.1~15의 범위를 보이며, 장강에 인접한 서쪽해역에서 높은 값을 나타내고 대마난류의 영향을 받는 동쪽해역에서 낮은 값을 나타낸다(Fig. 10a). 봄에 측정된 질산염/인산염 비율은 1.0~16의 범위를 보이고 장강 인근해역에서 12 이상의 높은 값을 나타내고 장강에서 멀어질수록 점차 감소하여 대마난류의 영향을 받는 동쪽해역에서는 2~4의 낮은 값들을 나타낸다(Fig. 10b). 질산염/인산염 비율의 수직분포도 봄과 여름에 매우 큰 차이를 보인다(Fig. 11). 여름에 질산염/인산염 비율은 서쪽해역(경도 $124.5\sim 126^\circ$) 수심 10~30 m 사이에서 20 이상의 매우 높은 값들을 나타내고 동쪽으로 갈수록 점차 감소하며, 동쪽해역(경도 127.5°)에서는 질산염/인산염 비율이 표층에서 수심 30 m까지 6 이하의 낮은 값들을 나타낸다. 봄에 관측한 질산염/인산염 비율은 서쪽해역(경도 124.5°)에서 표층부터 수심 30 m까지 12 이상의 높은 값들을 나타내고 동쪽으로 갈수록 비율이 점차 감소하여 경도 $125.5\sim 127.5^\circ$ 해역 표층 30 m에서 2 이하의 매우 낮은 값들을 나타낸다.

여름에 표층 엽록소 농도는 $0.2\sim 1.3 \text{ mg m}^{-3}$ 의 범위를 보이며, 장강에 인접한 서쪽해역에서 1.0 mg m^{-3} 이상으로 나타나고 동쪽으로 갈수록 점차 감소하여 대마난류의 영향을 받는 동쪽해역에서는 0.4 mg m^{-3} 이하로 낮은 값

들을 나타낸다(Fig. 12a). 봄에 관측한 표층 엽록소 농도는 0.3~3.7 mg m⁻³의 범위를 보이며, 제주도 남쪽해역에서

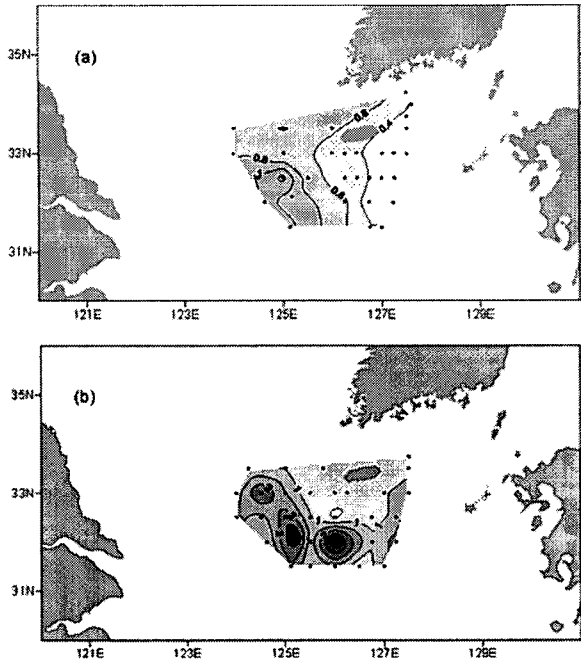


Fig. 12. Surface distribution of chlorophyll-*a* (mg m⁻³) in the northern East China Sea in August 2003 (a) and April 2004 (b).

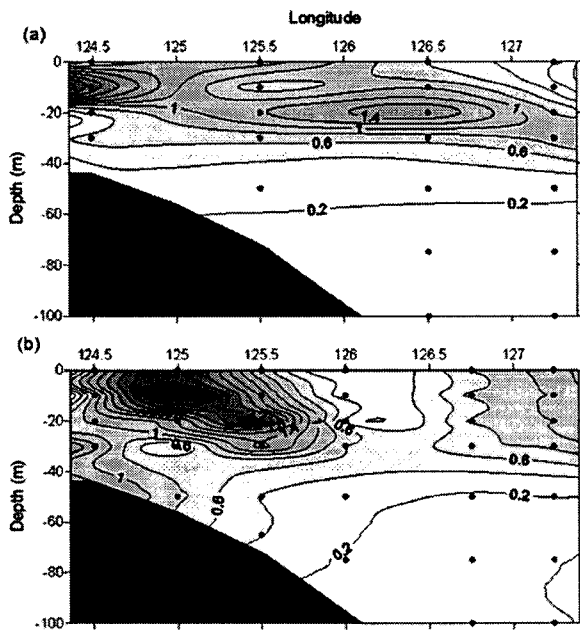


Fig. 13. Vertical distribution of chlorophyll-*a* (mg m⁻³) along the line-C in August 2003 (a) and April 2004 (b).

3.0 mg m⁻³ 이상의 높은 값을 나타내고 대마난류의 영향을 받는 동쪽해역에서는 0.6 mg m⁻³ 이하의 낮은 값들을 나타낸다(Fig. 12b). 여름에 관측한 엽록소는 서쪽해역(경도 124.5°) 수심 10m에서 최고 농도(2.1 mg m⁻³)를 나타내고 경도 126.5° 해역 수심 20m에서 또한 1.4 mg m⁻³ 이상의 높은 농도를 나타내며, 나머지 해역에서는 1.0 mg m⁻³ 이하의 낮은 농도를 나타낸다(Fig. 13a). 봄에 관측한 엽록소 농도는 여름에 비해 상당히 높은 값들을 보인다(Fig. 13b). 봄에 엽록소는 경도 125~125.5° 해역, 수심 10~20m에서 2.4 mg m⁻³ 이상의 매우 높은 농도를 보이는 반면, 경도 126~126.8° 해역, 수심 0~40m에서는 0.8 mg m⁻³ 이하의 낮은 농도를 나타낸다.

4. 토 의

동중국해 북부해역에서 영양염의 기원

동중국해에서 가장 중요한 영양염 공급원은 쿠로시오 해류(Kuroshio Current)의 용승(upwelling)과 장강이다(Edmond *et al.* 1985; Gong *et al.* 1996; Chen and Wang 1999). 쿠로시오 해류의 용승은 대만부근 해역에서 주로 일어나기 때문에, 본 연구해역처럼 동중국해 북부해역에서는 장강이 보다 중요한 영양염 공급원으로 작용한다. 장강을 통해 방출되는 담수량은 계절에 따라 큰 차이를 보여, 홍수가 자주 일어나는 여름에 일년 담수 방류량의 1/3 이상을 차지한다(Milliman and Jin 1985). 본 연구해역에서 표층염분은 여름에 27.7~33.2 psu의 범위를 나타내고 봄에는 32.1~34.5 psu의 범위를 나타내, 봄에 비해 여름에 1.3~4.4 psu 낮았다(Fig. 3). 이처럼 봄에 비해 여름에 표층 염분이 낮은 것은 장강을 통해 동중국해로 방류되는 담수량이 봄에 비해 여름에 많다는 것을 지지해준다. 봄에 비해 여름에 담수 방류량이 많다는 것은 장강을 통해 유입되는 영양염의 양도 여름에 더 많다는 것을 의미한다. 또한, 장강을 통해 동중국해로 유입되는 영양염의 양도 여름에 제일 많다고 보고되었다(Shen *et al.* 2001). 따라서 지금까지 연구결과를 보면, 동중국해 표층해수에서 관측한 영양염도 다른 계절보다 여름에 제일 높은 농도를 나타냈다(Gong *et al.* 2003; Wang *et al.* 2003). 하지만 본 연구해역에서는 2003년 8월에 장강 인근해역에서 관측한 질산염 농도는 1~2 μmol kg⁻¹인 반면, 2004년 4월에 관측한 질산염 농도인 3~7 μmol kg⁻¹으로, 2003년 8월에 관측한 것보다 3배 가량 높았다(Fig. 6). 또한, 장강 인근해역에서 관측한 인산염 농도도 여름에 비해 봄에 2~3배 가량 높았다(Fig. 8). 만약 장강이 본 연구해역에서 주요 영양염 공급원이라면, 영양염 공급이 제일 많은 여름에 관측한 표층 영양염 농도가 봄에 관측한 것보다 높아야 한다. 따라서 본 연구해역인 동중국해 북부해역에서 표층 질산염과

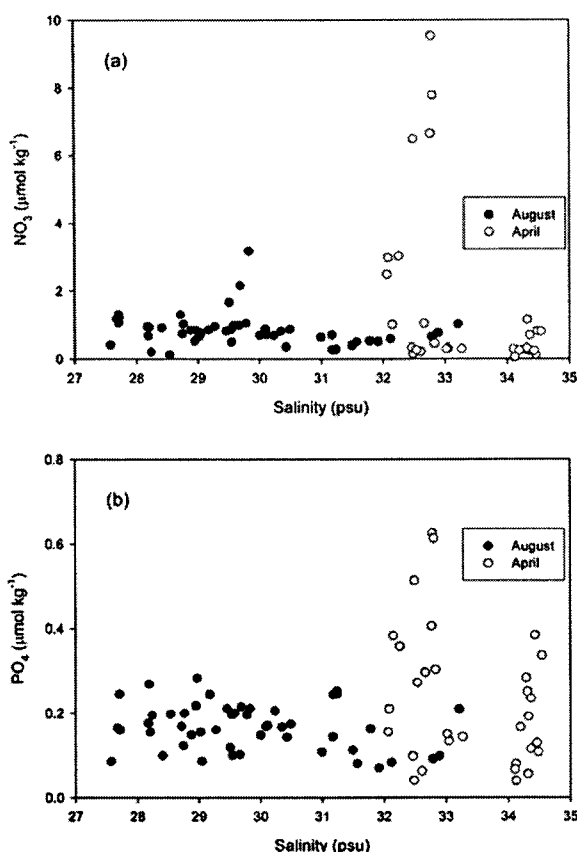


Fig. 14. Nitrate vs. salinity (a) and phosphate vs. salinity (b) in the surface waters. Filled circles indicate the data obtained in August and open circles indicate the data in April.

인산염 농도가 여름보다 봄에 높은 사실은 장강이 영양염의 주요 공급원이 아니라는 것을 지시해준다.

표층 질산염, 인산염 농도와 염분과의 상관관계는 Fig. 14에 도시하였는데, 질산염과 인산염 농도는 봄과 여름 모두 염분과 뚜렷한 상관관계를 나타내지 않는다. 동중국해에서는 장강을 통해 상당한 양의 질산염이 유입되기 때문에, 기존의 연구결과에서는 표층 질산염 농도가 염분과 뚜렷한 음의 상관관계를 보였다(Gong *et al.* 1996; Wong *et al.* 1998; Wang *et al.* 2003). 이처럼 기존의 연구결과 달리 본 연구에서 표층 질산염 농도가 염분과 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는 것은 본 연구해역이 기존 연구해역보다 장강 입구로부터 더 멀리 떨어져 있기 때문이다. 기존 연구해역은 장강 입구에서 300 km 이내 해역으로, 장강 입구로부터 멀리 떨어져 있지 않기 때문에, 장강으로부터 유입된 질산염 양이 식물플랑크톤에 의해 섭취되는 양보다 충분히 많아, 질산염 농도가 주로 해수와 혼합에 의해 결정되어 염분과 반비례 관계를 보인다. 하지만 본 연구해

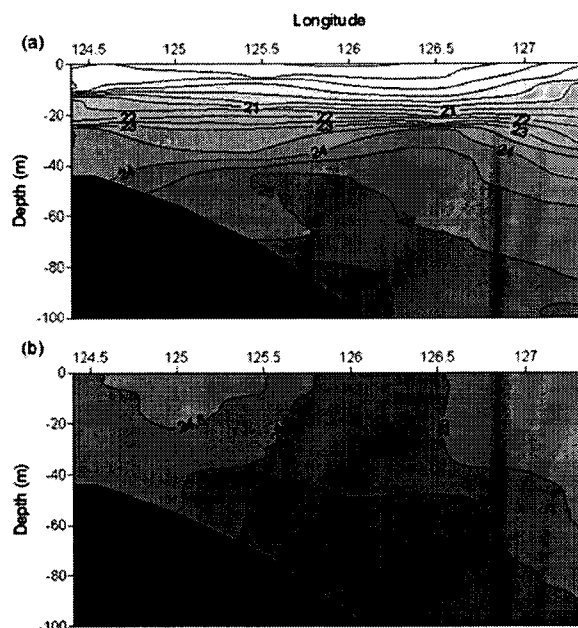


Fig. 15. Vertical distribution of water density (σ_t) along the line-C in August 2003 (a) and April 2004 (b).

역은 장강 입구로부터 260 km 이상 떨어져 있어, 높은 질산염 농도를 포함하는 장강수가 연구해역으로 이동하여 오는데 10일 이상 소요되기 때문에(Lie *et al.* 2003), 대부분의 질산염이 연구해역으로 이동 중에 식물플랑크톤에 의해 섭취된다. 따라서 본 연구해역에서 질산염 농도는 해수와 혼합과 같은 물리적 요인보다는 식물플랑크톤의 섭취와 같은 생물학적 요인에 의해 더 큰 영향을 받아, 염분과 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는 것이다.

본 연구해역에서 관측한 표층해수 안정도(water column stability)는 봄과 여름에 매우 큰 차이를 보여, 여름에는 표층 10-20 m의 밀도가 저층에 비해 매우 낮아 표층해수가 상당히 안정한 반면, 봄에는 표층부터 저층까지 해수 밀도가 거의 차이를 보이지 않아 매우 불안정하다(Fig. 15). 따라서 여름에는 표층과 저층의 혼합이 거의 안 일어나는 반면, 봄에는 표층과 저층이 완전히 혼합된다. 이처럼 봄과 여름에 표층해수 안정도의 차이에 의해 영양염 농도의 수직분포도 큰 영향을 받는다. 여름에 관측한 질산염은 모든 표층에서 매우 낮은 농도를 보이고 수심에 따라 점차적으로 농도가 증가하는 반면, 봄에 관측한 질산염은 서쪽해역에서 표층부터 저층까지 큰 농도차 없이 높은 농도를 나타내고 동쪽으로 갈수록 표층에서 농도가 감소한다(Fig. 7). 따라서 봄에 본 연구해역의 서쪽해역에서 상대적으로 높은 영양염 농도를 보이는 것은 표층과 저층의 수직혼합에 의해 저층에 풍부한 영양염이 표층으로 공

급된 결과로 생각된다. 결국, 봄에 본 연구해역의 서쪽해역에서 높은 영양염 농도를 보이는 것은 영양염이 장강을 통해 유입된 것이 아니고 해수의 수직혼합에 의해 저층에 풍부한 영양염이 표층으로 공급되었기 때문이다. 여름에는 장강을 통해 유입된 대부분의 영양염이 본 연구해역에 도달하기 전에 식물플랑크톤에 의해 섭취되어 본 연구해역으로 공급되는 양이 적고, 장강을 통해 유입된 많은 담수에 의해 수위가 성층화되어 저층에 풍부한 영양염이 표층으로 공급되지 못하여 모든 해역에서 표층 영양염 농도가 낮게 관측되었다.

식물플랑크톤의 성장을 제한하는 영양염

기존의 연구결과에 의하면, 동중국해에서 식물플랑크톤의 성장은 질소보다는 주로 인에 의해 제한 받는다고 보고하였다; Harrison *et al.*(1990)은 염분이 32 psu 이하의 동중국해에서 인이 일차생산력을 결정하는 주요 영양염이라고 주장하였으며, Wong *et al.*(1998)은 동중국해 전체해역의 1/3~1/2에서 초과 질산염(excess nitrate) 농도가 $6 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 에 이르는 반면, 인산염 농도는 $0.07 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하라고 보고하였다. 또한, Chen *et al.*(1999)은 질산염이 풍부함에도 불구하고 인 부족으로 인하여 식물플랑크톤이

질산염을 섭취하지 않았다고 보고하였으며, Gong *et al.*(2003)은 동중국해에서 여름부터 가을까지 일차생산력 속도가 주로 인에 의해서 결정된다고 제시하였다. 하지만 본 연구해역에서 봄과 여름에 관측한 표층 질산염/인산염 비율은 각각 1.3~16과 1.1~15으로 대부분이 Redfield ratio인 16보다 낮았다(Fig. 10). 특히 여름에 관측한 표층 질산염/인산염 비율이 대부분 해역에서 10 이하이고 평균 값은 5.7으로, Redfield ratio에 비해 1/3 수준이었다. 봄에 관측한 표층 질산염/인산염 비율은 수심이 얕은 서쪽해역에서는 10 이상으로 비교적 높은 값들을 나타내지만 대마난류의 영향을 받는 동쪽해역에서는 4 이하의 매우 낮은 값들을 나타냈다. Fig. 16은 표층해수에서 얻은 질산염 농도에 대해 질소/인 비율, 인산염 농도에 대해 질소/인 비율을 도시한 것이다. 질산염 농도는 여름과 봄, 모두에서 질소/인 비율과 양의 상관관계를 보이며, 특히 질산염 농도가 $2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하일 때, 질소/인 비율이 10 이하의 낮은 값들을 나타낸다. 이와 달리, 인산염 농도는 질소/인 비율과 아무런 상관관계를 보이지 않는다. 이처럼 질산염 농도가 $2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 로 낮은 때에 질소/인 비율이 10 이하로 감소하는 것은 식물플랑크톤의 성장이 질산염 농도가 $2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하로 낮아지면 질소에 의해서 제한받는다는

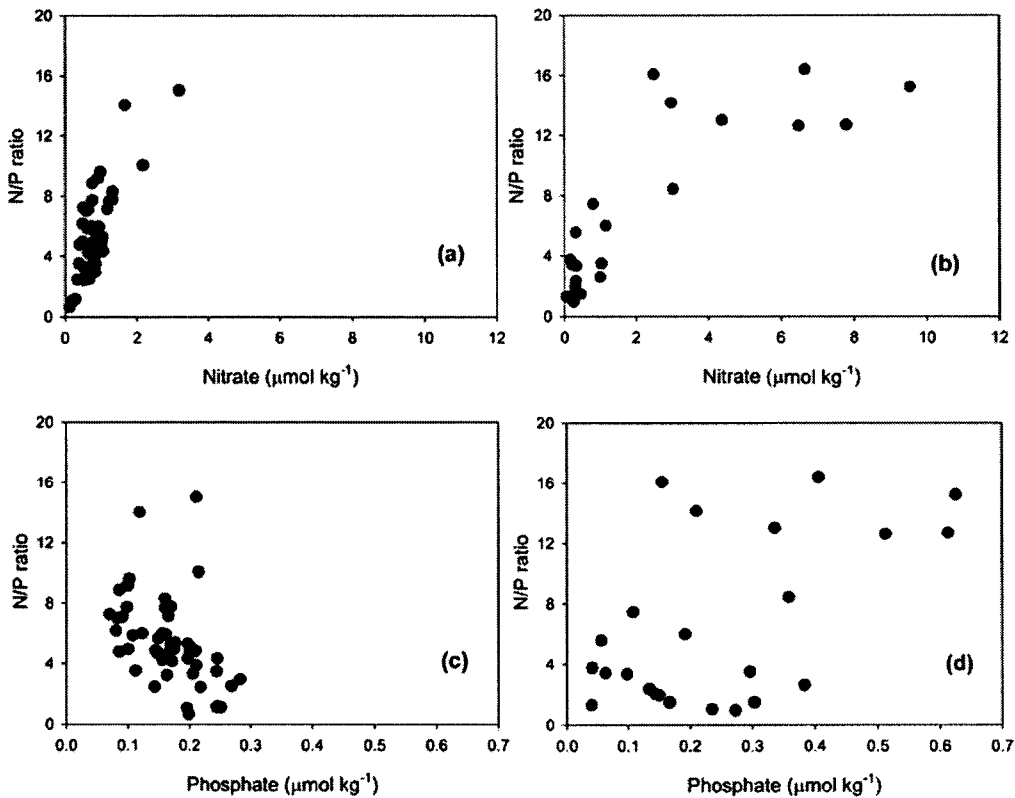


Fig. 16. Surface nitrate vs. N/P ratio in the summer (a) and spring (b), and surface phosphate vs. N/P ratio in the summer (c) and spring (d).

것을 지시해준다(Kilham and Hecky 1988; Wang *et al.* 2003). 따라서 본 연구해역인 동중국해 북부해역에서는 식물플랑크톤의 성장이 인보다는 주로 질소에 의해 제한받는 것으로 생각된다. 이와 같은 사실은 동중국해에서는 식물플랑크톤의 성장이 주로 인에 의해 제한받는다라는 기존 연구결과와 상반된다.

왜 본 연구가 기존의 연구와 상반된 결과를 보이는 것일까? 그 이유는 기존의 연구는 장강의 영향을 받는 장강 인근해역에서 수행되었고 본 연구는 장강 입구에서 260 km 이상 떨어진 해역에서 연구가 수행되었기 때문인 것으로 생각된다. 장강 담수에서 관측한 영양염 농도는 질산염이 $32.9 \mu\text{mol kg}^{-1}$, 인산염이 $0.57 \mu\text{mol kg}^{-1}$, 규산염이 $95 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 으로, 질소/인 비율이 58로 Redfield ratio인 16에 비해 3배 이상 높다(Zhang 1996). 이처럼 인산염 농도에 비해 질산염 농도가 특별히 높은 것은 중국대륙에서 농작을 위해 질소비료를 많이 사용하기 때문이다. 따라서 장강의 영향을 받는 해역에서는 질산염이 풍부한 것에 비해 인산염은 상대적으로 부족하게 되어 식물플랑크톤의 성장이 인에 의해 영향을 받게 된다. 하지만 앞에서 언급한 바와 같이 본 연구해역은 장강 입구에서 260 km 이상 떨어져 있기 때문에, 장강을 통해 유입된 높은 농도의 질산염이 본 연구해역에 도달하기 전에 식물플랑크톤에 의해 섭취되어 본 연구해역에서는 장강의 영향을 거의 받지 않는다. 앞장의 결과에 의하면, 본 연구해역에서 표층해수의 영양염은 주로 해수의 수직혼합에 의해 저층으로부터 공급된다. 일반적으로 질소의 순환속도보다 인의 순환속도가 빠르기 때문에, 해양환경에서는 인보다 질소에 의해 식물플랑크톤의 성장이 제한받는다(Raymont 1980). 따라서 본 연구해역에서 영양염 농도가 장강의 영향보다는 해수의 수직혼합에 의해 주로 영향받기 때문에 인보다 질소에 의해 식물플랑크톤의 성장이 제한받는다.

엽록소 분포 특성

본 연구해역에서 여름(2003년 8월)동안에 관측한 엽록소 분포는 전반적으로 질산염 분포와 잘 일치한다. 표층 질산염 농도는 장강 인근 서쪽해역에서 $1\sim 2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 으로 비교적 높고 대마난류의 영향을 받는 동쪽해역에서는 $1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하로 낮다(Fig. 6a). 표층 엽록소 농도도 장강 인근 서쪽해역에서 1 mg m^{-3} 내외의 비교적 높은 값을 나타내고 동쪽으로 갈수록 점점 감소하여 대마난류 영향을 받는 동쪽해역에서는 0.4 mg m^{-3} 이하의 낮은 값을 나타낸다(Fig. 12a). 연구해역 라인 C에서 여름에 관측한 엽록소의 수직분포를 보면, 장강에 인접한 서쪽해역에서 엽록소 농도는 수심 10 m에서 최고 값을 나타내고 동쪽으로 갈수록 최고 농도를 나타내는 수심이 점차 깊어져 대마난류의 영향을 받는 동쪽해역에서는 수심 30 m에

서 엽록소의 최고 농도를 나타낸다(Fig. 13a). 질산염 농도도 장강에 인접한 서쪽해역 수심 10 m에서 $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이상으로 증가하고 대마난류의 영향을 받는 동쪽해역에서는 수심 30 m 보다 깊은 곳에서 $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이상의 높은 값을 나타낸다(Fig. 7a). 전반적으로 엽록소의 최고 농도를 보이는 수심과 질산염 농도가 $5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 를 보이는 수심과 잘 일치한다. 따라서 여름동안 엽록소 분포는 질산염 분포에 의해 크게 영향을 받는 것으로 생각된다. 하지만 봄(2004년 4월)에 관측한 엽록소 분포는 여름과 달리 질산염 분포와 잘 일치하지 않는다. 표층 엽록소는 제주도 남쪽, 일부해역을 제외하고는 모든 해역에서 1.5 이상의 높은 농도를 보이는 반면(Fig. 12b), 표층 질산염 농도는 장강에 인접한 서쪽해역에서 최고 7 이상의 높은 값을 나타내고 동쪽으로 갈수록 점차 감소한다(Fig. 6b). 특히 연구해역의 남쪽해역에서는 질산염 농도가 $1.0 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하로 매우 낮음에도 불구하고 엽록소 농도는 2.4 mg m^{-3} 이상의 최고 값을 나타낸다. 연구해역 라인 C에서 봄에 관측한 질산염 농도는 서쪽해역(경도 124.5°)에서 표층에서 저층까지 $8.0 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이상의 높은 값을 나타내고 동쪽으로 갈수록 점차 감소하여 경도 $125.5\sim 127.5^\circ$ 해역, 표층 30 m에서 $1.0 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이하의 낮은 값을 나타낸다(Fig. 7b). 하지만 엽록소 농도는 경도 $125\sim 125.5^\circ$ 해역, 수심 10~20 m에서 2.0 mg m^{-3} 이상의 최고 값을 나타내

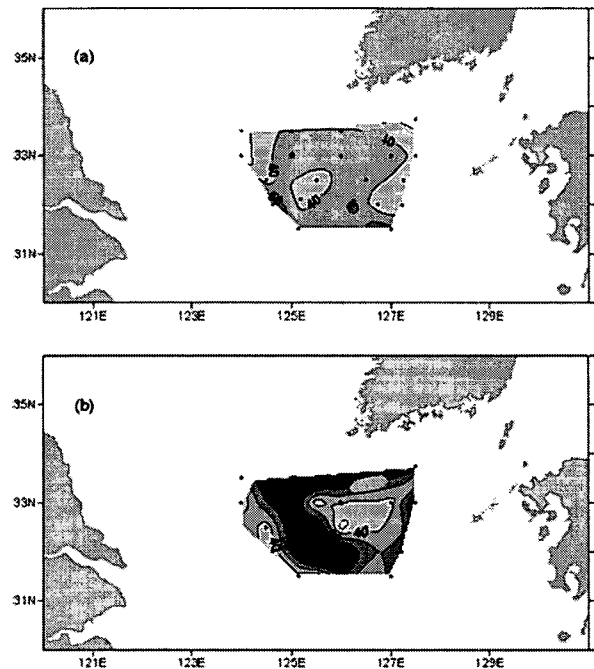


Fig. 17. Surface distribution of depth-integrated chlorophyll-*a* (mg m^{-2}) in the northern East China Sea in August 2003 (a) and April 2004 (b).

고 경도 126~127° 해역, 표층 30 m에서 0.6 mg m^{-3} 내외의 낮은 값을 나타내, 질산염의 수직분포와 크게 다른 수직분포를 보인다(Fig. 13b). 따라서 봄에 엽록소 분포는 질산염 이외의 다른 요인에 의해서도 영향을 받는 것으로 판단된다.

Fig. 17은 본 연구해역에서 봄과 여름에 수심별 엽록소를 합한 총엽록소(depth-integrated chlorophyll)의 분포를 나타낸다. 여름에 관측한 총엽록소 양은 $24\sim60 \text{ mg m}^{-2}$ 의 범위이고 평균값은 40 mg m^{-2} 이며, 해역에 따라 큰 차이를 보이지 않는다. 봄에 관측한 총엽록소 양은 $26\sim104 \text{ mg m}^{-2}$ 의 범위이고 평균값은 55 mg m^{-2} 으로 여름에 관측한 것에 비해 약간 높다. 봄에 총엽록소 양은 해역에 따라 큰 차이를 보여, 연구해역의 남쪽과 북쪽해역에서 80 mg m^{-2} 이상의 높은 값을 나타내고 제주도 남쪽해역에서는 40 mg m^{-2} 이하의 낮은 값을 나타낸다. 본 연구에서 여름에 관측한 총엽록소 양은 동중국해에서 1994년 8월에 관측한 총엽록소 양(평균 $42\pm44 \text{ mg m}^{-2}$)과 유사하지만 1998년 7월에 관측한 총엽록소 양($29\pm11 \text{ mg m}^{-2}$)보다는 다소 높다(Hama *et al.* 1997; Gong *et al.* 2003). 봄에 관측한 총엽록소 양은 동중국해에서 1993년 3월에 관측한 총엽록소 양(평균 $32\pm9 \text{ mg m}^{-2}$)보다 2배 가량 높고 1998년 3월에 관측한 총엽록소 양(평균 $25\pm13 \text{ mg m}^{-2}$)보다 2배 이상 높다(Hama *et al.* 1997; Gong *et al.* 2003). 따라서 동중국해 북부해역에서 여름에 관측한 총엽록소 양은 기존의 동중국해 연구결과와 큰 차이를 보이지 않지만 봄에 관측한 값은 기존의 동중국해 연구결과보다 2배 가량 높다. 기존의 연구결과에 의하면, 동중국해에서 일차생산력과 총엽록소 양은 봄보다 여름에 높게 관측되었는데, 이것은 여름에 일사량이 많고 장강을 통해 유입되는 영양염 양이 많기 때문이다(Hama *et al.* 1997; Chen *et al.* 2001; Gong *et al.* 2003; Wang *et al.* 2003). 하지만 본 연구에서는 총엽록소 양이 여름보다 봄에 더 높게 관측되었다. 이것은 이미 앞에서 언급한 바와 같이 본 연구해역이 장강으로부터 멀리 떨어져 있어 장강으로부터 공급되는 영양염이 큰 영향을 미치지 못하고 여름보다 봄에 해수의 수직혼합에 의해 저층의 영양염이 표층으로 더 많이 공급되어 영양염 농도가 높기 때문이다. 따라서 동중국해 북부해역에서 봄과 여름에 관측된 영양염과 엽록소의 분포는 기존의 동중국해에서 관측된 결과와 크게 다른 모습을 보인다.

5. 결 론

1) 본 연구해역에서 관측한 표층 질산염과 인산염 농도는 장강에서 방류되는 담수의 양이 많은 여름보다 봄에 높게 나타났는데, 이것은 지금까지 동중국해에서 영양염

의 주요 공급원으로 알려진 장강이 본 연구해역에서는 영양염 공급에 큰 기여를 하고 있지 않음을 시사해준다. 봄에 서쪽해역에서 상대적으로 높은 질산염과 인산염 농도를 보이는 것은 표층과 저층의 수직혼합에 의해 저층에 풍부한 영양염이 표층으로 공급된 결과이다.

2) 봄과 여름에 관측한 표층 질산염/인산염 비율은 각각 1.3~16과 1.1~15으로, Redfield ratio인 16보다 낮았는데, 이것은 표층에서 식물플랑크톤의 성장이 주로 질소에 의해 제한받고 있다는 것을 시사해준다. 동중국해에서 식물플랑크톤의 성장이 주로 인에 의해 제한받는다는 기존의 연구결과와 달리 본 연구에서 식물플랑크톤의 성장이 주로 질소에 의해 제한받는 이유는 본 연구해역이 장강에서 멀리 떨어져 있어, 표층 영양염이 질산염/인산염 비율이 매우 높은 장강 담수의 영향을 많이 받지 않고, 주로 해수의 수직혼합에 의해 질산염/인산염 비율이 낮은 심층수가 표층으로 공급되기 때문으로 생각된다.

3) 여름에 관측한 엽록소 분포는 전반적으로 질산염 분포와 잘 일치하는 반면, 봄에 관측한 엽록소 분포는 여름과 달리 질산염 분포와 잘 일치하지 않는다. 따라서 식물플랑크톤 성장은 여름에는 주로 질산염 공급에 의해 결정되고, 봄에는 질산염 이외의 다른 요인에 의해서도 영향을 받는 것으로 판단된다. 동중국해 북부해역에서 여름에 관측한 총엽록소 양은 기존의 동중국해 연구결과와 유사하지만, 봄에 관측한 값은 기존의 동중국해 연구결과보다 2배 가량 높다. 또한 본 연구에서는 기존의 동중국해 연구결과와 달리, 총엽록소 양이 여름보다 봄에 더 높게 관측되었는데, 이것은 여름보다 봄에 해수의 수직혼합에 의해 저층의 영양염이 표층으로 더 많이 공급되어 표층 영양염 농도가 높기 때문이다.

사 사

본 연구에 많은 도움을 주신 연구선 이어도호 선생님과 송조원 여러분께 감사드립니다. 또한 현장조사와 시료분석에 많은 도움을 주신 극지연구소 송수진 연구원과 한국해양연구원 노재훈, 장성태 박사님께도 진심으로 감사드립니다. 또한, 본 논문을 세심하게 검토해 주시고 조언을 해주신 부산대학교 이동섭 교수님과 한국해양연구원 김석현, 정창수 박사님께도 심심한 감사를 드립니다. 본 연구는 해양수산부에서 지원한 “중장기 기후변화에 따른 동중국해 해양생태계 변동예측 연구(PN53500)”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

김기현, 한 정. 2000. 라뎀 동위원소와 염분을 이용한 동중국

- 해, 남해 및 대한해협 해수의 기원과 혼합비율 추정. *한국해양학회지 바다*, 5, 216-223.
- 손영태, 이상호, 이재철, 김정창. 2003. 동중국해 북부해역의 겨울철 수계와 전선구조. *한국해양학회지 바다*, 8, 327-339.
- 양한섭, 이동섭. 1999. 여름철 동중국해 및 남중국해 표층수의 Ra 동위원소를 이용한 수계분석. *한국해양학회지 바다*, 4, 305-311.
- 오현주, 강영실, 박정훈. 1999. 동중국해 북부해역 클로로필-*a*의 분포특성과 해양환경 특성. *한국수산학회지*, 32, 88-97.
- 이대인, 조현서, 윤양호, 최영찬, 이정훈. 2005. 남해 및 동중국해의 하계 수질 및 저질 환경평가. *한국해양공학회지*, 8, 83-99.
- 정창수, 홍기훈, 김석현, 김영일, 문덕수, 박준건, 박용철, 이재학, 이홍재. 2000. 동중국해 외대륙붕 저층수의 영양염 기원. *한국해양공학회지*, 3, 13-23.
- 허만영, 최영찬. 제주도 서남방 동중국해에서 하계 해양전선 형성과 수질특성. *한국해양공학회지*, 7, 64-69.
- Beardsley, R.C., R. Limeburner, H. Yu, and G.A. Cannon. 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, 4, 57-76.
- Chen, C., J. Zhu, R.C. Beardsley, and P.J. Franks. 2003. Physical-biological sources for dense algal blooms near the Changjiang River. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 22.
- Chen, C.T.A. and S.L. Wang. 1999. Carbon, alkalinity and nutrient budgets on the East China Sea continental shelf. *J. Geophys. Res.*, 104, 20,675-20,686.
- Chen, C.T.A., R. Ruo, S.C. Pai, C.T. Liu, and G.T.F. Wong. 1995. Exchange of water masses between the East China Sea and the Kuroshio off northeastern Taiwan. *Cont. Shelf Res.*, 15, 19-39.
- Chen, Y.L., H. Lu, F. Shiah, G. Gong, K. Liu, and J. Kanda. 1999. New production and f-ratio on the continental shelf of the East China Sea: comparisons between nitrate inputs from the subsurface Kuroshio Current and the Changjiang River. *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, 48, 59-75.
- Chen, Y.L., H.-Y. Chen, G.-C. Gong, Y.-H. Lin, S. Jan, and M. Takahashi. 2004. Phytoplankton production during a summer coastal upwelling in the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, 24, 1321-1338.
- Chen, Y.L., H.-Y. Chen, W.-H. Lee, C.-C. Hung, G.T.F. Wong, and J. Kanda. 2001. New production in the East China Sea, comparison between well-mixed winter and stratified summer conditions. *Cont. Shelf Res.*, 21, 751-764.
- Edmond, J.M., A. Spivack, B.C. Grant, M.-H. Hu, Z. Chen, S. Chen, and X. Zeng. 1985. Chemical dynamics of the Changjiang estuary. *Cont. Shelf Res.*, 4, 17-36.
- Gong, G.-C., Y.-I. Chen, and K.-K. Liu. 1996. Chemical hydrography and chlorophyll *a* distribution in the East China Sea in summer: implications in nutrient dynamics. *Cont. Shelf Res.*, 16, 1561-1590.
- Gong, G.-C., Y.-H. Wen, B.-W. Wang, and G.-J. Liu. 2003. Seasonal variation of chlorophyll *a* concentration, primary production and environmental conditions in the subtropical East China Sea. *Deep-Sea Res. II*, 50, 1219-1236.
- Hama, T., K.H. Shin, and N. Handa. 1997. Spatial variability in the primary productivity in the East China Sea and its adjacent waters. *J. Oceanogr.*, 53, 41-51.
- Harrison, P.J., M.H. Hu, Y.P. Yang, and X. Lu. 1990. Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 140, 79-87.
- Humborg, C.V., A.C. Ittekkot, and B.V. Bodungen. 1997. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, 386, 385-388.
- Kilham, P. and R.E. Hecky. 1988. Comparative ecology of marine and freshwater phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 33, 776-795.
- Lie, H.-J., C.-H. Cho, J.-H. Lee, and S. Lee. 2003. Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea. *J. Geophys. Res.*, 108, 3077.
- Liu, K.-K., G.-C. Gong, C.-Z. Shyu, S.-C. Pai, C.-L. Wei, and S.-Y. Chao. 1992. Response of Kuroshio upwelling to the onset of the northeast monsoon in the sea north of Taiwan: Observations and a numerical simulation. *J. Geophys. Res.*, 97, 12,511-12,526.
- Milliman, J.D. 1997. Blessed dam or damned dams? *Nature*, 386, 325-327.
- Milliman, J.D. and Q. Jin. 1985. Introduction. *Cont. Shelf Res.*, 4, 1-4.
- Milliman, J.D., Y.S. Qin, M.E. Ren, and S. Yoshiki. 1987. Man's influence on the erosion and transport of sediment by Asian rivers: the Yellow River (huanghe) example. *J. Geol.*, 95, 751-762.
- Raymont, J.E.G. 1980. Plankton and Productivity in the Ocean, 2nd Edition, Vol. 1. Phytoplankton. Pergamon Press, Oxford. 489 p.
- Shen, Z.L., Q. Liu, S.M. Zhang, H. Miao, and P. Zhang. 2001. The dominant controlling factors of high content inorganic nitrogen in the Changjiang River and its mouth. *Oceanol. Limnol. Sinica*, 32, 465-473.
- Su, Y. and X. Weng. 1994. Water masses in China Seas. p. 3-16. In: *Oceanography of China Seas*. ed. by D. Zhou, Y.-B. Liang, and C.K. Zeng. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Tang, R., H. Dong, and F. Wang. 1990. Biogeochemical behavior of nitrogen and phosphate in the Changjiang estuary and its adjacent waters. p. 322-334. In: *Biogeo-*

- chemical Study of the Changjiang Estuary*. ed. by G. Yu, L.M. Martin, J. Zhou, H. Windom, and R. Dawson. China Ocean Press, Beijing.
- Tsunogai, S., S. Watanabe, J. Nakamura, T. Ono, and T. Sato. 1997. A preliminary study of carbon system in the East China Sea. *J. Oceanogr.*, 53, 9-17.
- Wang, B-D., X-L. Wang, and R. Zhan. 2003. Nutrient conditions in the Yellow Sea and the East China Sea. *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, 58, 127-136.
- Wong, G.T.F., G-C. Gong, K-K. Liu, and S-C. Pai. 1998. 'Excess Nitrate' in the East China Sea. *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, 46, 411-418.
- Wong, G.T.F., S-C. Pai, K-K. Liu, C-T. Liu, and C.T.A. Chen. 1991. Variability of the chemical hydrography at the frontal region between the East China Sea and the Kuroshio north-east of Taiwan. *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, 33, 105-120.
- Zhang, J. 1996. Nutrient elements in large Chinese estuaries. *Cont. Shelf Res.*, 16, 1023-1045.

Received May 9, 2005

Accepted Sep. 14, 2005