

# 烟台四十里湾养殖水域氮的存在形态研究\*

赵卫红 焦念志 赵增霞

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

**提要** 1997年5、8、11月及1998年3月对烟台四十里湾养殖水域的溶解无机氮、溶解有机氮及颗粒氮进行了调查,对不同形态氮的分布、季节变化及在总氮中所占比例进行了分析。结果表明,春、夏季溶解态氮的分布主要受自然及养殖生物活动控制;秋、冬季主要受陆源输入及物理混合控制。颗粒氮的分布主要受生物活动及陆源输入共同控制。全年总氮主要以溶解态氮为主,其中有机氮为主要存在形式,溶解无机氮主要以氨氮为主。溶解态氮的含量及在总氮中的比例从春季到冬季升高;颗粒氮正相反,颗粒氮的变化趋势与叶绿素 $a$ 的变化基本相一致。

**关键词** 烟台四十里湾 养殖水域 氮 形态

**学科分类号** P734

海水中氮的存在形态一般以过滤法分为颗粒态和溶解态,二者均包括无机氮和有机氮。溶解无机氮主要由一些可溶的氨盐、硝酸盐、亚硝酸盐组成,各种形态氮通过物理、化学、生物等过程可以相互转化(Fogg, 1975; Edmond *et al.*, 1985; Kristiansen *et al.*, 1989; 朱明远等, 1991)。烟台四十里湾是中国北方的一个重要浅海养殖海区,它三面邻陆,一面向海,为一耳状半封闭性海湾,近年来养殖面积不断扩大,湾内扇贝、海带等养殖动植物,自然生长的各种浮游植物、浮游动物以及各种底栖生物形成了一个庞大的养殖生态系统,这必然对该水域氮的存在形态产生影响,本文报告烟台四十里湾水域氮的存在形态的研究结果,以期为进一步研究氮在该水域生态系中的循环过程提供资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样时间、站位及方法

1997年5、8、11月及1998年3月对烟台四十里湾12个站位进行了调查,站位分布见图1,其中1、4、6、8、9和10号站处于扇贝养殖区内。水样用颠倒采水器采集,取300—500ml水样,用直径为25mm的GF/F(Whatman)玻璃纤维滤膜在聚四氟乙烯过滤器上过滤,玻璃纤维滤膜使用前在450℃下预灼烧4h。收集约100ml滤液于120ml聚乙烯瓶中,加入200 $\mu$ l氯仿于-20℃下冷冻保存,用于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、溶解总氮(DTN)的测定。将附有颗粒有机物的滤膜于-20℃下保存,用于测定颗粒氮(PN),用另一膜于滤液

\* 国家重点科技攻关计划资助项目,96-922-02-04号;国家自然科学基金资助项目,39625008号,39630060号;中国科学院特别支持项目,KZ95T-04-04号。赵卫红,女,出生于1969年5月,博士后,Fax:0086-0532-2891114

收稿日期:1998-12-25,收修改稿日期:1999-03-26

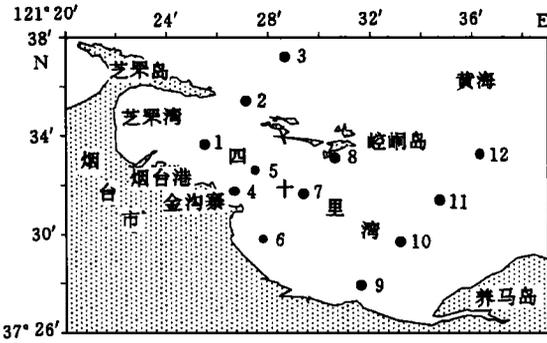


图1 烟台四十里湾调查站位分布图

Fig.1 The sampling stations in Yantai Sishili Bay

PE240 CHN 元素分析仪测定(杨鹤鸣等, 1995)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同形态氮的分布变化

**2.1.1 溶解态氮** 表1列出了不同形态氮的浓度范围及平均值。1997年5月份表层溶解无机氮变化范围为0.80—1.49 $\mu\text{mol/L}$ , 沿岸浓度较低, 平均只有1.08 $\mu\text{mol/L}$ 。海湾东部的10号站最高, 浓度为1.49 $\mu\text{mol/L}$ 。东部高于西部, 如图2a所示。在无机氮中, 氨氮占81%, 硝酸氮占13%, 亚硝酸氮占6%。氨氮是扇贝等养殖生物的主要排泄产物, 其分布与扇贝养殖区域的分布、养殖状况及海流状况都有着直接关系。烟台四十里湾由金沟寨至养马岛沿岸及崆峒岛沿岸均为扇贝养殖区, 西部的芝罘湾及其东侧受潮流影响较大, 水交换相对较好, 东部受潮流影响相对较弱, 由生物产生的无机氮水平运输较差, 故东部的溶

表1 不同形态氮的浓度范围及平均值( $\mu\text{mol/L}$ )Fig.1 Concentration and average value ( $\mu\text{mol/L}$ ) of different nitrogen forms

氮的形态	浓度	采样时间(年.月)			
		1997.05	1997.08	1997.11	1998.03
NH <sub>4</sub> -N	浓度范围	0.65—1.29	0.46—1.17	0.64—9.41	3.13—3.56
	平均值	0.88	0.73	3.37	6.81
NO <sub>3</sub> -N	浓度范围	0.03—0.27	0.08—4.45	1.07—2.93	3.49—7.57
	平均值	0.14	0.63	1.66	4.68
NO <sub>2</sub> -N	浓度范围	0.00—0.12	0.01—0.13	1.15—2.03	0.24—0.98
	平均值	0.06	0.06	1.58	0.39
DIN	浓度范围	0.80—1.49	0.73—5.12	3.13—13.34	6.96—32.12
	平均值	1.08	1.42	6.61	11.88
DON	浓度范围	6.04—16.43	8.01—29.78	18.46—25.78	21.03—97.12
	平均值	11.27	14.45	21.04	47.67
DTN	浓度范围	7.16—14.70	8.91—30.91	22.87—39.56	30.36—117.07
	平均值	12.35	15.87	27.65	59.57
PN	浓度范围	2.64—13.71	0—4.14	0.79—3.86	0.38—4.54
	平均值	5.56	2.43	1.95	1.54

中浸润后取出冷冻保存作为空白膜。

### 1.2 分析方法

NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N用Skalar San&plus微量自动分析系统分析, 并分别采用酚-次氯酸钠法、Cd-Cu还原后重氮偶氮法、重氮偶氮法测定。溶解总氮采用Valderrama (1981)方法消解后, 利用自动分析测定水样中的硝酸盐的含量。溶解无机氮(DIN)为NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N之和, 溶解有机氮(DON)为溶解总氮与溶解无机氮之差, 颗粒氮用

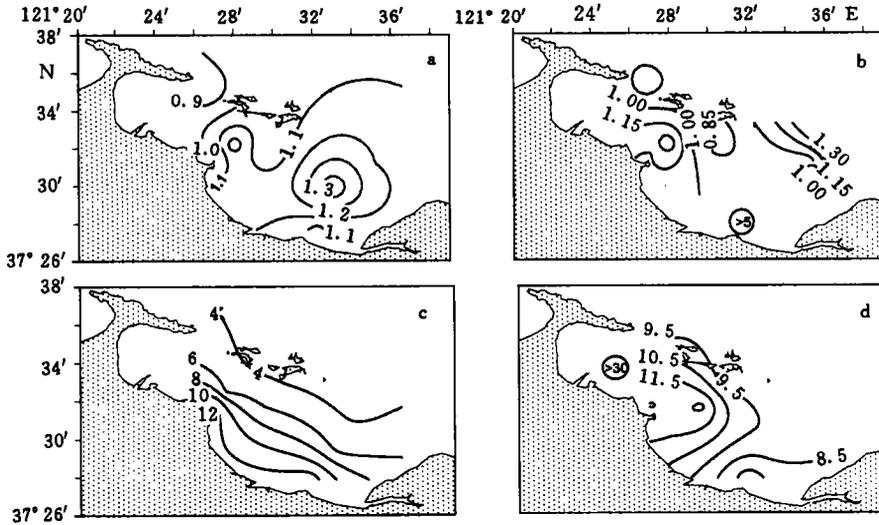


图2 表层DIN的水平分布(μmol/L)

Fig.2 The horizontal distribution of DIN at the surface layer (μmol/L)

a:5月, b:8月, c:11月, d:3月

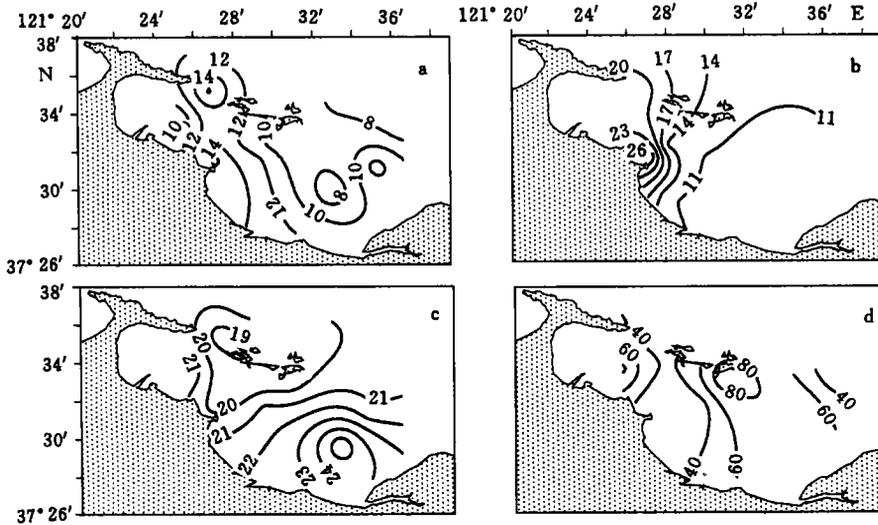


图3 表层DON的水平分布(μmol/L)

Fig.3 The horizontal distribution of DON at the surface layer (μmol/L)

a: 5月, b: 8月, c: 11月, d: 3月

解无机氮要高。亚硝酸氮与氨氮分布相似,硝酸氮分布则与氨氮相反,西南沿岸较高,主要由于临近港口附近的排污口,受陆源控制为主,但由于溶解无机氮中大部分以氨氮形式存在,整个海区的溶解无机氮的水平分布主要受氨氮分布控制。表层溶解有机氮的变化范围为 6.04—16.43μmol/L(表 1),沿岸浓度较高,2 号和 4 号站最高,分别为 16.36μmol/L

和  $16.43\mu\text{mol/L}$ 。湾内大于湾外(图 3a)。溶解有机氮占溶解总氮的 84%—95%,特别是西部湾(1—8 号站),溶解有机氮占溶解总氮的 89%—95%;平均为 92%;而东部平均为 87%。溶解无机氮占溶解总氮的 5%—19%,平均只有 9%。同期叶绿素 *a* 及扇贝长势调查表明湾的西部叶绿素 *a* 及扇贝长势均比东部要好,特别是 4 号站,叶绿素 *a* 含量最高,扇贝长势最好。溶解有机氮的分布主要受生物释放的控制。

8 月份表层溶解无机氮浓度变化范围为  $0.73\text{—}5.12\mu\text{mol/L}$ (表 1)。1、4、5、6 和 12 号站略高,9 号站最高,见图 2b。氨氮占 67%,硝酸氮占 28%,亚硝酸氮占 5%,仍以氨氮为主,但硝酸氮比例有所升高。表层溶解有机氮浓度范围为  $8.01\text{—}29.78\mu\text{mol/L}$ (表 1),由 4 号站向外辐射递减,仍呈西高东低的趋势,沿岸浓度较高(图 3b)。溶解有机氮占溶解总氮的 65%—97%,西部湾(1—8 号站)所占比例为 92%—97%,平均为 94%,东部平均为 82%。溶解无机氮占溶解总氮的 3%—35%,平均只有 10%,其中 9 号站溶解无机氮的比例最高,占 35%。

11 月份表层溶解无机氮浓度范围为  $3.13\text{—}13.34\mu\text{mol/L}$ (表 1),其分布由沿岸向外海递减(图 2c)。1998 年 3 月份溶解无机氮浓度范围为  $6.96\text{—}32.12\mu\text{mol/L}$ (表 1),由西南沿岸向东递减(图 2d),高值出现在港口外的 1 号站,浓度为  $32.12\mu\text{mol/L}$ 。11 月份和 3 月份的氨氮分别占溶解无机氮的 43% 和 54%,硝酸氮占 28% 和 43%,亚硝酸氮占 29% 和 3%,氨氮仍为溶解无机氮的主要存在形式,但所占比例有所减少。表层溶解有机氮 11 月份和 3 月份的浓度范围分别为  $18.46\text{—}25.78\mu\text{mol/L}$  和  $21.03\text{—}97.12\mu\text{mol/L}$ (表 1),其分布 11 月份由东南向西北递减(图 3c),高值分别处于 10 号和 1 号站,3 月份高值分别处于 8 号和 1 号站(图 3d)。1 号站位于烟台港外,临近排污口,高浓度的溶解无机氮和有机氮主要受陆源排污输入的影响。11 月份和 3 月份的溶解有机氮平均分别占溶解总氮的 76% 和 71%。由上述四个月的溶解有机氮占溶解总氮的比例分析表明溶解氮中绝大部分是有机氮。

**2.1.2 颗粒态氮** 1997 年 5 月份表层颗粒氮浓度变化范围为  $2.64\text{—}13.71\mu\text{mol/L}$ ,平均为  $5.56\mu\text{mol/L}$ (表 1),其分布由金沟寨沿岸的 4 号站向外辐射状递减,西部高于东部,湾内高于湾外(图 4a)。8 月份颗粒氮浓度变化范围为  $0\text{—}4.14\mu\text{mol/L}$ ,平均为  $2.43\mu\text{mol/L}$ ,北部湾口 2 号站及 6 号站具有高值,湾内高于湾外。11 月份的颗粒氮的浓度变化范围为  $0.79\text{—}3.86\mu\text{mol/L}$ ,平均为  $1.95\mu\text{mol/L}$ (表 1),西南沿岸及崆峒岛沿岸浓度较高(图 4c)。3 月份表层颗粒氮浓度变化范围为  $0.38\text{—}4.54\mu\text{mol/L}$ ,平均为  $1.54\mu\text{mol/L}$ (表 1),其分布由沿岸向东北方向递减(图 4d)。叶绿素 *a* 的含量及初级生产力都较高的区域,颗粒氮含量也较高,这表明浮游生物是颗粒氮的重要来源。3 月份港口外 1 号站附近的颗粒氮最高,但叶绿素 *a* 并非最高,表明该水域的颗粒氮主要来源于陆源排污输入。

## 2.2 不同形态氮的季节变化及相互转化

由图 5 可以看出,春季和夏季的氨氮、硝酸氮、亚硝酸氮以及溶解无机氮的浓度较低,秋季浓度开始回升,氨氮、硝酸氮及无机氮的浓度到了冬季达到最大,亚硝酸氮的浓度有所回落。溶解有机氮的浓度从春季到冬季不断增高。颗粒氮的浓度变化则正相反,从春季到冬季,不断降低。颗粒氮的浓度变化趋势与叶绿素 *a* 的变化基本一致,但溶解无机氮与溶解有机氮则与叶绿素 *a* 的变化相反。

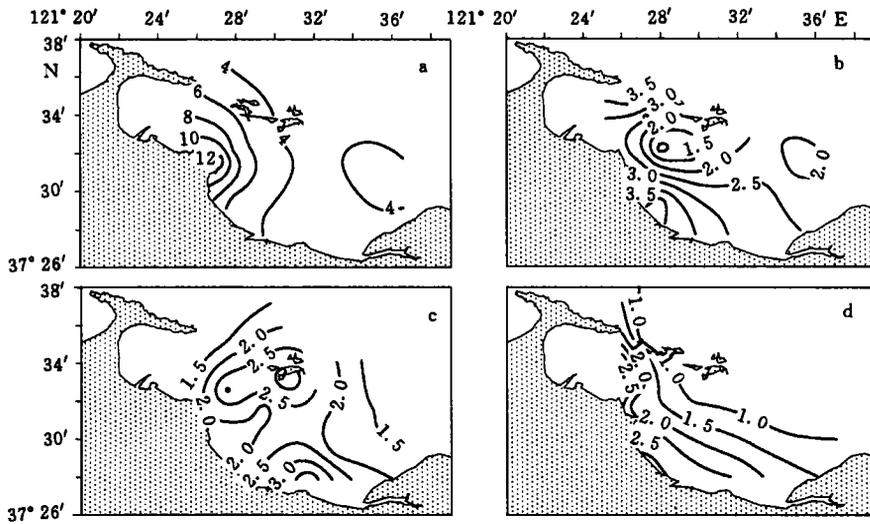


图4 表层PN的水平分布(µmol/L)

Fig.4 The horizontal distribution of PN at the surface layer (µmol/L)

a:5月, b:8月, c:11月, d:3月

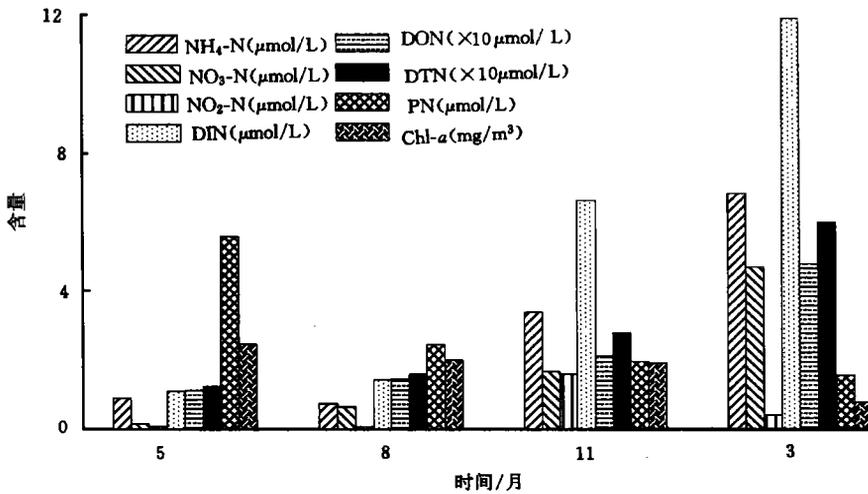


图5 叶绿素a与不同形态氮的季节变化

Fig.5 The seasonal changes of chlorophyll-a and different forms of nitrogen

在春、夏季,由于大量浮游植物繁殖及一些大型藻类(如海带)的生长,吸收大量溶解无机氮,并转化成颗粒的或更大型的含氮有机体。当海水中无机氮的吸收速率大于其输入速率(陆源输入速率、大气输入速率、有机物的细菌分解矿化速率、底层沉积物中的无机氮向上输送速率等)时,水体中的无机氮含量很低。这些颗粒的或更大型的含氮有机体通过食物链被更高营养级生物(如扇贝等)所捕食,或者被人类作为产品(如扇贝、海带等)收获而迁移出水体。生物细胞自溶、生物排泄以及有机碎屑的分解等过程会向海水

中释放大量的溶解有机氮,如蛋白质、氨基酸、尿素等(Fogg, 1975)。在无机氮缺乏时,海水中的部分溶解有机氮,如尿素及氨基酸等,可被某些种类的浮游植物吸收利用而转化成颗粒氮(Williams *et al*, 1986; Kaufman *et al*, 1983)。扇贝等滤食性生物在摄食颗粒有机物的同时,也会释放出氨等无机营养盐(Richard *et al*, 1988),可供海洋植物吸收利用。部分颗粒氮,如活体浮游生物、生物尸体碎屑及扇贝粪便等沉降到海底,通过细菌矿化分解进一步转化成溶解有机氮和无机氮重新进入氮循环。1997年5月和8月烟台四十里湾水体的总氮近乎相等,溶解态氮分别占总氮的69%和84%,其中90%以上为溶解有机氮。由于生物的吸收、迁移和转化,水体中总氮和溶解态氮处于全年较低水平,颗粒氮处于较高水平。5月份的颗粒氮高于8月份,分别占总氮的31%和14%。在溶解无机氮中氨氮的比例最高,分别占到81%和67%。

秋冬季节,浮游植物的生长繁殖减缓,扇贝等生物量处于最大期,摄食大量颗粒氮,并释放出无机氮(Richard *et al*, 1988);又由于受垂直混合的影响,底层沉积物中的氮被带到上层,水体中的总氮浓度增高,其中溶解态氮所占比例增加。1997年11月份及1998年3月份溶解态氮分别占总氮的93%和97%。其中无机氮在总溶解态氮中的比例增加,但溶解有机氮仍为溶解态氮的主要存在形态。溶解无机氮中氨氮比例有所下降,硝酸氮的比例有所上升,但仍以氨氮为主。颗粒氮占总氮的比例有所下降,分别为7%和3%。

### 3 结语

**3.1** 春、夏季,烟台四十里湾的溶解态氮的分布主要受自然及养殖生物活动控制;秋、冬季则受陆源输入及物理混合控制。叶绿素 *a* 含量高的区域,颗粒氮含量也高,表明浮游生物是颗粒氮的重要来源。冬季,在港口外的排污口附近出现颗粒氮最高值,而叶绿素 *a* 并非最高值,说明该处颗粒氮主要来源于陆源输入。

**3.2** 溶解态氮的含量及在总氮中的比例从春季到冬季不断升高;颗粒氮正相反,颗粒氮的变化与叶绿素 *a* 的变化相一致。

**3.3** 全年总氮主要以溶解态氮为主,其中溶解有机氮为主要存在形态;溶解无机氮主要以氨氮为主。

### 参 考 文 献

- 朱明远,杨小龙,1991. 三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum*)的亚硝酸盐释放及其生态学意义. 青岛海洋大学学报,21(2):83—89
- 杨鹤鸣,刘 群,1995. 海水中POC和PN测定方法的改进. 见:董金海,焦念志主编. 胶州湾生态学研究. 北京:科学出版社,53—61
- Edmond J M, Sprvack A, Boyle B *et al*, 1985. Chemical dynamics of the Changjiang estuary. *Continental Shelf Res*, 4(1/2):17—36
- Fogg G E, 1975. Primary Productivity. In: Riley J P, Skirrow G ed. *Chemical Oceanography*, Vol. 2. New York: Academic Press, 385—453
- Kaufman Z G, Lively J S, Carpeter E J, 1983. Uptake of nitrogenous nutrients by phytoplankton in a Barrier Island Estuary: Great South Bay, New York. *Estuarine Coastal and Shelf Sci*, 17:483—493
- Kristiansen E J, Lund B Aa, 1989. Nitrogen cycling in the Barents Sea—I: Uptake of nitrogen in the water column. *Deep-Sea Res*, 36(2):255—258
- Richard F D, Dankers N, 1988. Uptake and release of materials by a Wadden Sea mussel bed. *J Exp*

Mar Biol Ecol, 118:207—206

Valderrama J C, 1981. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters.

Mar Chem, 10:109—122

Williams R, Poulet S A, 1986. Relationship between the zooplankton, phytoplankton, particulate matter and dissolved free amino acids in the Celtic Sea. Mar Biol, 90:284—291

## FORMS OF NITROGEN IN THE YANTAI SISHILI BAY CULTIVATED WATER

ZHAO Wei-hong, JIAO Nian-zhi, ZHAO Zeng-xia

(*Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

**Abstract** Four seasonal investigations into different nitrogen forms were carried out from May 1997 to March 1998 in the Yantai Sishili Bay cultivated water. The forms of nitrogen were separated into dissolved and particulate forms by filtration. The dissolved form was mainly composed of inorganic and organic species. The dissolved inorganic nitrogen included ammonium, nitrate and nitrite. The results showed that the range of dissolved total nitrogen concentration was 7.16—117.07 $\mu\text{mol/L}$ , representing 69%—97% of total nitrogen. The range of dissolved inorganic nitrogen concentration was 0.73—32.12 $\mu\text{mol/L}$ . 43%—81% of dissolved inorganic nitrogen was ammonium, 13%—43% nitrate and 3%—29% nitrite. The range of dissolved organic nitrogen concentration was 6.04—97.12 $\mu\text{mol/L}$ , representing 65%—97% of dissolved total nitrogen. The range of particulate nitrogen concentration was 0—13.71 $\mu\text{mol/L}$ , representing 3%—31% of total nitrogen. The distributions of dissolved nitrogen in the Yantai Sishili Bay were influenced by natural and cultivated biological activities in spring and summer and by continental input and physical mixing in autumn and winter. The distributions of particulate nitrogen were controlled by both biological activities and continental input. The major form of total nitrogen through the whole year was dissolved nitrogen in which organic nitrogen was the main species. Ammonium was the dominant species of dissolved inorganic nitrogen. The dissolved nitrogen concentration and the percentage in total nitrogen became higher from spring to winter whose bend was contrary to chlorophyll-*a*; however, particulate nitrogen changed with a trend which was consistent with that of the chlorophyll-*a*.

**Key words** Yantai Sishili Bay Cultivated water Nitrogen Forms

**Subject classification number** P734