

# 长江口海域悬浮颗粒有机物的稳定氮同位素分布及其生物地球化学意义

刘秀娟<sup>1,2</sup>, 俞志明<sup>1</sup>, 宋秀贤<sup>1</sup>, 曹西华<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 对2006年2, 5, 8, 11月份长江口海域表层水体中的悬浮颗粒物(SPM)进行稳定氮同位素分析, 根据不同季节、不同区域内其 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化研究水体中氮的迁移、转化等生物地球化学过程, 揭示其环境行为, 从而对该海域的氮循环机制进行探索。研究发现: 该海域悬浮颗粒有机物的稳定氮同位素组成( $\delta^{15}\text{N}_p$ )分布范围较宽, 在0.6‰~8.2‰之间, 具有明显的时空分布特点, 反映了不同程度的陆源输入和氮的生物地球化学过程的影响。口门内, 表层水体中 $\delta^{15}\text{N}_p$ 的变化主要受长江径流的陆源输入影响, 生物地球化学作用影响较弱; 最大浑浊带, 水体中的悬浮颗粒有机氮受微生物的降解活动影响明显, 各季节均存在不同程度的颗粒物分解作用; 外海区, 陆源输入减弱, 悬浮颗粒物的 $\delta^{15}\text{N}_p$ 值主要受微藻的同化吸收作用以及一定程度的颗粒物分解作用影响。

**关键词:** 悬浮颗粒物; 稳定氮同位素; 生物地球化学; 长江口

中图分类号: X145

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)01-0011-07

20世纪60年代以来, 稳定氮同位素技术已被广泛应用于海洋学的研究<sup>[1]</sup>; 在海洋氮循环和海洋生物地球化学研究中, 氮同位素有着不可替代的独特作用。悬浮颗粒物中稳定氮同位素组成的变化可以示踪氮的来源<sup>[2,3]</sup>, 判断氮的生物地球化学过程<sup>[4,5]</sup>, 还可以作为河口海域富营养化程度的指示参数<sup>[6,7]</sup>。因此, 利用悬浮颗粒物的 $\delta^{15}\text{N}$ 方法来研究海水体系中氮的迁移、转化等环境生物地球化学过程, 揭示其环境行为, 具有重要的科学意义和现实意义。

长江口是中国最大的河口, 丰水、多沙、生态脆弱, 每年经由长江径流入海的输沙量可达4.86亿t。长江输送的颗粒物入海后, 发生一系列迁移、转化, 对氮的生物地球化学循环和河口生态环境产生重要影响。因此, 对长江口海域悬浮颗粒有机氮的来源、分布及其影响过程的研究十分重要。近年来, 关于长江和长江口地区颗粒有机物的来源、分布、 $\delta^{15}\text{N}$ 的分布特征及其对物源和沉积动力过程的指示等方面的研究较多<sup>[8-11]</sup>, 但对长江口不同区域悬浮颗粒有机氮的生物地球化学过程的综合分析较少。长江口水文条件复杂, 不同区域水体中颗粒有机物的组成、影响条件等差异较大; 通过比较分析悬浮颗粒物 $\delta^{15}\text{N}$ 在口门内、最大浑浊带和外海区不同的分布及其变化特点, 可以在一定程度上获得较详细的氮的生物地球化学过程信息。

因此, 作者在2006年2, 5, 8, 11月份(4个季节)对长江口海域(30.3~32.1°N, 121.0~123.5°E)进行了4个航次的调查, 分析不同区域内悬浮颗粒物 $\delta^{15}\text{N}$ 的时空分布, 研究影响其 $\delta^{15}\text{N}$ 变化的主要生物

地球化学特征, 并对该海域的氮循环机制进行初步探索, 其研究结果可为长江口海域的富营养化分析提供重要的基础资料和科学依据。

## 1 材料与方法

本研究的调查海域共设40个站位(图1)。为便于分析研究, 根据盐度和浑浊度特征, 将调查海域分成3个区域进行分析。区域1: 口门内, 水体浑浊, 盐度 $< 3$ ; 区域2: 最大浑浊带区<sup>[12]</sup>, 中等盐度( $< 25$ ); 区域3: 外海区, 水体清澈, 悬浮体质量浓度 $< 10 \text{ mg/L}$ 。

在每个站位采集表层水样, 现场用450℃预处理过的GF/F滤膜过滤, 然后将该滤膜在-20℃冷冻保存以备实验室测量 $\delta^{15}\text{N}$ 值; 过滤完的滤液保存在聚乙烯瓶中, 并用适量氯仿固定后冷冻保存以测量硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ )、铵盐( $\text{NH}_4^+$ )浓度。叶绿素a(Chl a)样品用450℃预处理过的GF/F滤膜过滤, 样品在-20℃保存。

用恒重后的醋酸纤维滤膜过滤一定体积的水样, 通过差量法计算水体中悬浮颗粒物的含量( $S_s$ )。现场利用YSI测定表层水体的温度( $T$ )、盐度( $S$ )和

收稿日期: 2009-06-01; 修回日期: 2009-09-15

基金项目: 国家基金委创新研究群体科学基金项目(40821004); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-208和KZCX3-SW-232); 国家863计划专题项目(2008AA09Z107)

作者简介: 刘秀娟(1981-), 女, 山东日照人, 博士研究生, 研究方向: 海洋环境化学, E-mail: liuxiujuan@ms.qdio.ac.cn; 俞志明, 通信作者, 电话: 0532-82898581, E-mail: zyu@ms.qdio.ac.cn

溶氧(DO), 并分别使用标准方法进行校正。

营养盐及 Chl a 分析方法如下:  $\text{NO}_3^-$  用镉铜还原法,  $\text{NH}_4^+$  用靛酚蓝法, Chl a 用分光光度法测定, 分析偏差均小于 10%。

悬浮颗粒有机氮同位素的测定方法如下: 将 GF/F 滤膜在 60 °C 下恒温烘干 36 h, 冷却至室温后取足量的悬浮颗粒物用锡箔包裹, 然后通过自动进样盘到元素分析仪同位素比值质谱仪联机 (CE flash EA 1112-Finnigan Delta<sup>plus</sup> XL) 进行测量。测量误差为  $\pm 0.2\text{‰}$ 。

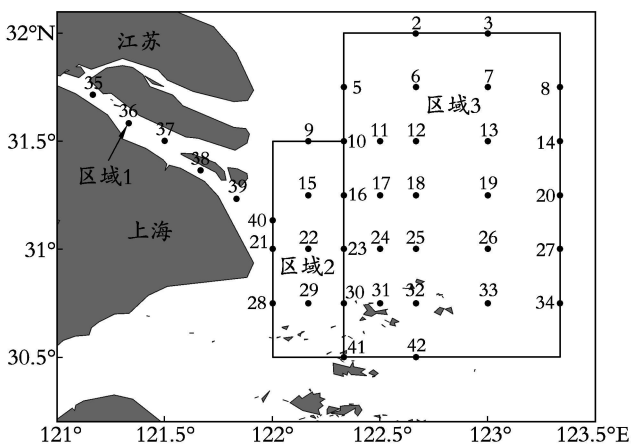


图 1 长江口海域调查站位

Fig. 1 Sampling stations in the Yangtze River estuary

## 2 结果与讨论

### 2.1 长江口海域表层水体中 $\delta^{15}\text{N}$ 的时空分布特征

2006 年长江口海域表层水体中悬浮颗粒物四个

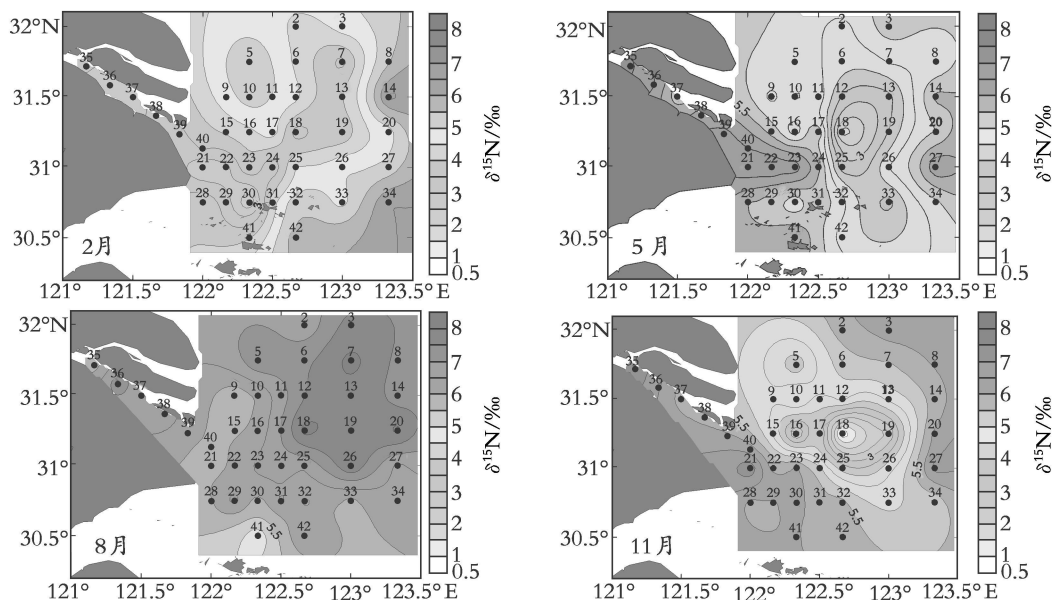


图 2 2006 年长江口海域不同季节表层水体中悬浮颗粒物  $\delta^{15}\text{N}$  值的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of  $\delta^{15}\text{N}$  in surface water of the Yangtze River estuary during four seasons

季度的  $\delta^{15}\text{N}$  值分布范围为 0.6‰~ 8.2‰, 总体平均值为 5.3‰。由表 1 中数据可以看出, 该结果与 2005 年长江口的调查结果相似, 在文献报道值范围之内, 与国外其他一些河口的  $\delta^{15}\text{N}$  值水平一致。

表 1 长江口海域表层水体与其他水域水体中悬浮颗粒物的  $\delta^{15}\text{N}$  值比较

Tab. 1 Comparison of  $\delta^{15}\text{N}$  in surface water in the Yangtze River estuary with other estuaries

水域	$\delta^{15}\text{N}$ 范围 (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ 平均值 (‰)	参考文献
Apalachicola Bay, FL	5.8~ 7.2	6.5	[7]
Narragansett Bay, RI	2.1~ 7.9	5.6	[13]
Tijuana Estuary, CA	6~ 10.9	8.5	[14]
Forth, Scotland	5.0~ 6.2		[15]
Delaware 河口	2.3~ 7.5		[5]
Tay 河口	0.2~ 4.0		[16]
Amazon 河口	3.2~ 6.1		[17]
长江口(2005年2月)	0.1~ 6.3	3.7	[10]
长江口(2005年5月)	0.6~ 10.1	5.6	[10]
长江口(2005年8月)	2.3~ 7.4	4.6	[10]
长江口(2005年11月)	- 1.6~ 9.0	4.7	[10]
长江口(2006年2月)	2.1~ 6.6	4.2	本文
长江口(2006年5月)	1.8~ 7.1	5.1	本文
长江口(2006年8月)	4.7~ 8.2	6.7	本文
长江口(2006年11月)	0.6~ 7.4	5.2	本文

长江口海域表层水体中悬浮颗粒物有机质的稳定氮同位素在不同季节、不同区域都呈现不同的分布特点, 如图 2, 图 3 所示。

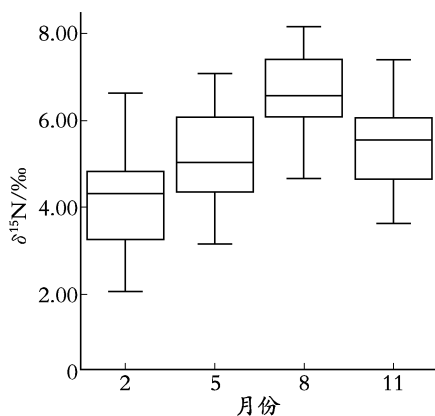


图3 2006年长江口表层水体悬浮颗粒物  $\delta^{15}\text{N}$  值的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of  $\delta^{15}\text{N}$  in surface water of the Yangtze River estuary

2月份,表层水体中  $\delta^{15}\text{N}$  值分布在  $2.1\text{‰} \sim 6.6\text{‰}$  之间,平均为  $4.2\text{‰}$ 。空间分布规律明显,呈现出近岸水域低、远岸水域高的趋势; $\delta^{15}\text{N}$  高值分布在远岸海域的外沿,而低值分布于口门内以及最大浑浊带附近水域。从离散程度来看,2月份  $\delta^{15}\text{N}$  的离散度较5月份低,而略高于8月份和11月份,整体分布水平在4个季节中最低。

5月份,表层水体中  $\delta^{15}\text{N}$  值分布在  $1.8\text{‰} \sim 7.1\text{‰}$  之间,平均为  $5.1\text{‰}$ 。该季节  $\delta^{15}\text{N}$  的离散程度最大,整体水平高于2月份。空间分布规律与2月份相反,近岸水域高而远岸水域低; $\delta^{15}\text{N}$  高值分布于口门内和最大浑浊带区域,远岸水域的东部外沿14,27号站附近也有高值出现,低值则分布于外海的大部份区域,最低值位于18号站附近。

8月份,表层水体中  $\delta^{15}\text{N}$  值分布在  $4.7\text{‰} \sim 8.2\text{‰}$  之间,平均为  $6.7\text{‰}$ 。空间分布均匀且规律明显,沿口门向外海  $\delta^{15}\text{N}$  值逐渐增加,最高值位于北部外海区,最低值则出现在西南部水域42号站附近。就离散程度而言,该季节  $\delta^{15}\text{N}$  的离散度最低,而整体水平最高,说明控制该季节悬浮颗粒物的生物地球化学过程较其他季节单一。

11月份,表层水体中  $\delta^{15}\text{N}$  值分布在  $0.6\text{‰} \sim 7.4\text{‰}$  之间,平均为  $5.2\text{‰}$ 。与5月份比较而言,二者  $\delta^{15}\text{N}$  值的分布水平相近,而11月份  $\delta^{15}\text{N}$  的离散程度略低于5月份。在空间分布上,口门内、最大浑浊带的西南部以及外海区东北部外沿海域表层水体中  $\delta^{15}\text{N}$  值较高,其他海域  $\delta^{15}\text{N}$  值较低;其中,最高值位于口门附近21号站附近,而最低值出现在外海区16,18号站附近。

## 2.2 各季节长江口海域 $\delta^{15}\text{N}$ 的生物地球化学特征

### 2.2.1 2月份

2月份,河口区生物作用较弱,悬浮颗粒物的组成主要来自陆源和海源,其稳定氮同位素值在一定意义上可以反映不同的物源信息。如图4所示,该季节长江口海域表层水体中悬浮颗粒物的  $\delta^{15}\text{N}$  值和盐度具有较好的线性关系 ( $R = 0.655, P < 0.001$ ),从河口到外海逐渐增加,体现了不同物源贡献程度的差异。有研究表明,陆源有机质的  $\delta^{15}\text{N}$  分布多在  $2.7\text{‰}$  附近<sup>[16, 18]</sup>,而海源有机质的  $\delta^{15}\text{N}$  较高,平均值约为  $6.5\text{‰}$ <sup>[31]</sup>。从河口到外海,悬浮颗粒物中陆源有机质的影响减小,而海源的影响增大,  $\delta^{15}\text{N}$  呈现逐渐增加的趋势。此外,2月份  $\delta^{15}\text{N}$  值与  $\text{Chla}/S_s$  ( $\text{Chla}$  质量浓度与悬浮体质量浓度的比值) 之间亦呈明显正相关性 ( $R = 0.543, P = 0.003$ ),进一步表明水体中悬浮颗粒物组成体现的是不同程度陆源和海源的混合影响。

由该季节不同水域悬浮颗粒物  $\delta^{15}\text{N}$  的离散程度分布情况(图5)可以看出,各区域的离散程度均较小,以口门内最小,而最大浑浊带的离散度最大。这说明在口门内悬浮颗粒物的组成较为单一,主要来自长江径流输入;而最大浑浊带内的悬浮颗粒物组成相对较为复杂,除受径流影响外,水体中可能还存在相对口门内较为复杂的化学和生物过程的影响。外海区,相对较高的  $\delta^{15}\text{N}$  值则体现了海源对该区域悬浮颗粒物组成的影响。

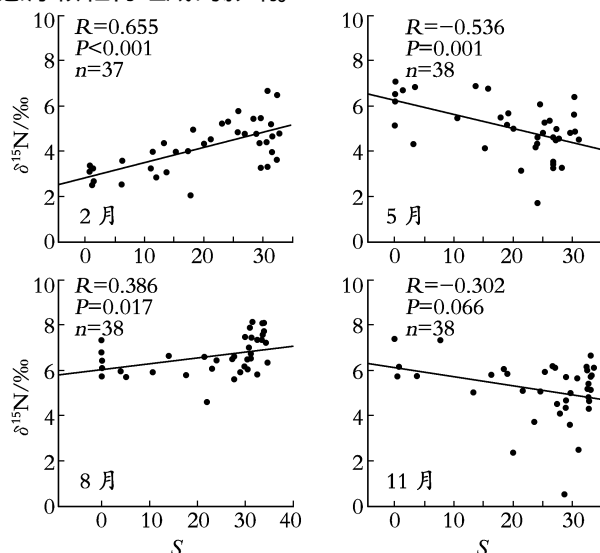


图4 2006年长江口表层水体中悬浮颗粒有机物的  $\delta^{15}\text{N}$  随盐度变化趋势

Fig. 4 Distribution of  $\delta^{15}\text{N}$  and SPOM as a function of salinity in surface water of the Yangtze River estuary in four seasons

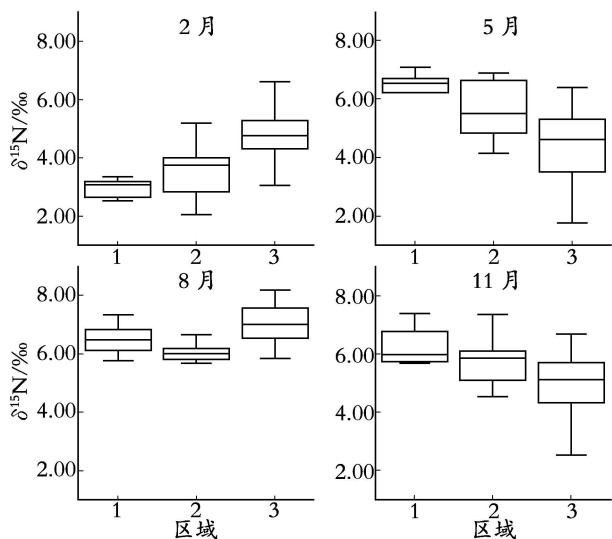


图5 2006年各季节长江口不同水域悬浮颗粒物  $\delta^{15}\text{N}$  值的分布

Fig. 5 Variations in the distribution of  $\delta^{15}\text{N}$  in Zone 1, 2, 3 of the Yangtze River estuary in February, May, August, November of 2006

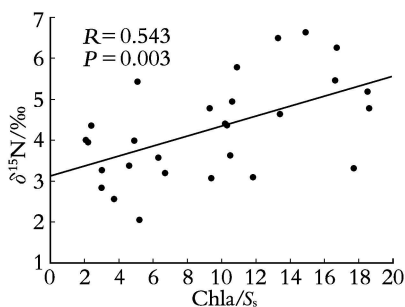


图6 2月份长江口海域表层水体中  $\delta^{15}\text{N}$  值与  $\text{Chla}/S_s$  之间的相互关系

Fig. 6 Correlation between  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\text{Chla}/S_s$  in the Yangtze River estuary in February

### 2.2.2 5月份

与2月份相比,5月份长江口海域  $\delta^{15}\text{N}$  值升高,与盐度之间呈明显负相关性(图4,  $R = -0.536$ ,  $P = 0.001$ ),从河口到外海  $\delta^{15}\text{N}$  值逐渐降低,可能与该季节水体中较明显的生物地球化学作用有关。

区域1(口门内),表层水体中的  $\delta^{15}\text{N}$  值较2月份迅速升高,且离散程度较小(图5),说明影响其悬浮颗粒物组成的过程相对简单;随着5月份长江径流量明显增大,河口  $\delta^{15}\text{N}$  值相应增加,体现了长江径流陆源输入对该区域悬浮颗粒物组成的影响。

区域2(最大浑浊带),  $\delta^{15}\text{N}$  值的离散程度较大(图5),说明影响该区域悬浮颗粒物组成的过程相对复杂,除一部分陆源和海源影响外,同时存在生物地

球化学作用的影响。5月份长江陆源输入量增大,水温升高,长江径流和河口沿岸排污携带大量细菌进入水体,同时河口的低盐度水环境和大量悬浮颗粒物的存在适于微生物滋生繁衍,导致最大浑浊带内微生物活动剧烈,悬浮颗粒有机质的分解作用明显<sup>[19]</sup>。较强烈的分解作用一般对应相对较高的  $\delta^{15}\text{N}$  值<sup>[20]</sup>。从2月份到5月份,最大浑浊带水体温度升高,DO含量及  $\text{Chla}/S_s$  比值下降,而  $\text{NO}_3^-$  含量增加,同时悬浮颗粒物的  $\delta^{15}\text{N}$  值相应升高(表2),体现了5月份较明显的分解作用影响。

区域3(外海区),  $\delta^{15}\text{N}$  值在整个海域中最低,且分布较为分散(图5),这与5月份该水域生物活动较强,生物作用影响复杂有关。在外海区,由于盐度增大,陆源带来的细菌大量死亡,使有机质的降解作用大大减弱,同时浮游植物的光合作用增强,大量浮游植物的生长和繁殖摄取营养盐,生成有机质,使水中的硝酸盐浓度降低,  $\text{Chla}/S_s$  比值升高,且颗粒物的  $\delta^{15}\text{N}$  值降低(如表2所示)。因此,5月份外海区生物的同化吸收作用对  $\delta^{15}\text{N}$  影响较大,而悬浮颗粒有机氮的分解作用相对较弱;水体中藻类对硝酸盐的吸收利用使得有机质的  $\delta^{15}\text{N}$  变轻,而硝酸盐的  $\delta^{15}\text{N}$  升高,与该区域硝酸盐  $\delta^{15}\text{N}$  的分析结果相一致。

### 2.2.3 8月份

如图4所示,8月份悬浮颗粒物  $\delta^{15}\text{N}$  与盐度之间呈现一定的正相关性( $R = 0.386$ ,  $P = 0.017$ ),和2月份  $\delta^{15}\text{N}$  的变化趋势类似;根据该季节不同水域  $\delta^{15}\text{N}$  离散程度分布图(图5)可以看出,8月份不同水域的  $\delta^{15}\text{N}$  离散度均较其他季节偏低,其中以最大浑浊带的  $\delta^{15}\text{N}$  离散度最小。说明该季节控制各个水域悬浮颗粒物  $\delta^{15}\text{N}$  变化的生物地球化学过程相对单一。

区域1(口门内),表层水体中的  $\delta^{15}\text{N}$  值在四个季节中处于最高水平,离散度较小,主要体现了长江径流的陆源影响。研究表明,2006年长江下游水体中  $\delta^{15}\text{N}$  的季节变化与长江口口门内水体中  $\delta^{15}\text{N}$  的季节变化趋势一致:8月 > 5月 > 11月 > 2月,反映了长江径流输入对口门内悬浮颗粒物组成的影响明显。8月份长江进入洪季,陆源输入颗粒有机氮的  $\delta^{15}\text{N}$  水平增加,且来源于工业及生活污水氮的比重相对较高<sup>[22]</sup>,从而导致该季节口门内较高的  $\delta^{15}\text{N}$  值。

表 2 2006 年各季节不同水域表层水体中氮同位素及其理化参数的平均分布

Tab. 2 Average distribution of  $\delta^{15}\text{N}$  and the main physical, chemical and biological parameters in surface water of the Yangtze River estuary in February, May, August and November of 2006

季节	区域编号	$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$S$	$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{mol/L}$ )	$\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{mol/L}$ )	$S_s$ ( $\text{mg/L}$ )	Chla ( $\mu\text{g/L}$ )	Chla/ $S_s$ ( $\text{mg/g}$ )	DO ( $\text{mg/L}$ )	$\delta^{15}\text{N}$ ( $\text{‰}$ )
2月	1	8.0	1.1	63.1	11.1	201.2	1.4	7.1	8.7	3.0
	2	7.5	13.4	45.9	5.5	273.0	0.9	3.2	8.4	3.6
	3	9.3	27.6	12.7	1.7	55.8	0.6	10.1	8.4	4.7
5月	1	22.3	0.4	84.1	3.3	120.2	0.6	4.7	6.6	6.3
	2	21.1	14.6	51.6	1.9	409.1	1.1	2.8	7.0	5.6
	3	19.3	25.8	17.6	1.8	28.6	4.0	139.7	6.9	4.5
8月	1	30.1	0.1	82.6	3.7	77.0	1.1	14.6	6.9	6.5
	2	27.8	18.4	37.0	5.7	107.5	1.2	11.4	6.1	6.1
	3	27.7	31.1	7.3	3.1	27.8	2.8	100.7	5.6	7.0
11月	1	17.8	1.1	75.1	5.4	80.1	1.4	17.5	9.5	6.3
	2	18.2	21.5	44.8	9.1	216.0	2.3	10.5	8.5	5.5
	3	20.6	30.5	15.3	5.2	34.4	1.8	51.5	7.9	4.8

区域 2(最大浑浊带),  $\delta^{15}\text{N}$  值较口门和外海略低, 离散度最小(图 5); 从季节比较而言, 8 月份  $\delta^{15}\text{N}$  的分布水平最高。说明影响该区域的生物地球化学作用较为单一, 且存在较大程度的悬浮颗粒有机氮的正向分馏。8 月份长江径流输入量增大, 带入水体中的微生物含量相应增加, 并且该季节温度较高, 有利于细菌大量生长繁衍<sup>[21]</sup>, 微生物对有机质的降解活动较其他季节强烈, 从而悬浮颗粒有机氮的分解反应及其氮分馏程度均较大, 导致该季节较高的  $\delta^{15}\text{N}$  值。

区域 3(外海区),  $\delta^{15}\text{N}_p$  值及其离散程度在整个海域中相对较大(图 5); 和口门内及最大浑浊带相比, 该区域水体中影响悬浮颗粒有机氮的生物地球化学作用相对更复杂。由表 2 可知, 8 月份外海区硝酸盐的平均浓度仅有  $7.3 \mu\text{mol/L}$ , 远低于其他季节, 且该季节 Chla 含量也较 5 月份明显降低, 微藻对硝酸盐的吸收作用减弱<sup>[22]</sup>, 水体中较高度度的  $\delta^{15}\text{N}_p$  值可能主要来自悬浮颗粒有机氮的矿化分解作用。从 5 月份到 8 月份, 水体温度升高,  $\text{NO}_3^-$ 、DO 含量以及 Chla/ $S_s$  比值减小, 而  $\text{NH}_4^+$  含量增加, 悬浮颗粒物  $\delta^{15}\text{N}$  值升高(表 2), 说明 8 月份水体中悬浮颗粒有机氮分解作用的存在; 此外, 该季节  $\delta^{15}\text{N}$  与 Chla/ $S_s$  呈负相关( $R = -0.466, P = 0.025$ ), 而与温度呈正相关关系( $R = 0.415, P = 0.049$ )(图 7), 同样反映了颗粒有机氮分解作用的影响。

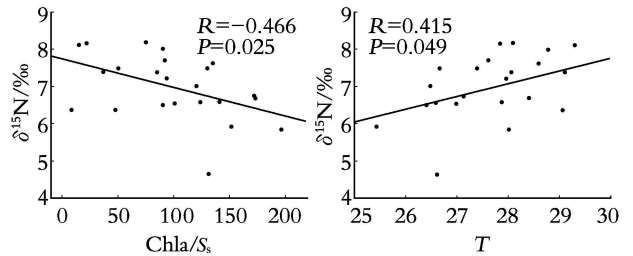


图 7 8 月份外海区表层水体  $\delta^{15}\text{N}$  与 Chla/ $S_s$  以及温度之间的相互关系

Fig. 7 Correlations between  $\delta^{15}\text{N}$ , Chla/ $S_s$ ,  $T$  in the adjacent marine area in August

#### 2.2.4 11 月份

11 月份, 表层水体中悬浮颗粒物  $\delta^{15}\text{N}$  的变化趋势与 5 月份类似, 沿口门到外海逐渐降低, 且各区域  $\delta^{15}\text{N}$  的平均分布水平也与 5 月份相近(图 4, 5), 说明该季节也受到程度相近的物理、生物地球化学过程的影响。

区域 1(口门内), 悬浮颗粒物的氮同位素特征和其他季节一样, 主要受长江径流输入的影响。该季节长江径流量减少, 水体中输入的悬浮颗粒有机氮的  $\delta^{15}\text{N}$  水平相应降低, 导致该季节  $\delta^{15}\text{N}$  值低于 8 月份。

区域 2(最大浑浊带区域), 悬浮颗粒物的  $\delta^{15}\text{N}$  值略低于口门内, 离散程度较小(图 5)。11 月份径流输入减少, 水体中携带的微生物数量相应减少, 且水温降低, 微生物活动减弱, 从而导致该区域悬浮颗

粒有机氮的分解作用程度相对降低,  $\delta^{15}\text{N}$  值较 8 月份减小。

区域 3(外海区), 悬浮颗粒物的  $\delta^{15}\text{N}$  值低于口门内和最大浑浊带, 离散度相对较大。和 5 月份类似, 外海区盐度增大, 有机质的降解作用减弱, 浮游生物大量生长, 藻类的同化吸收作用相对明显, 导致  $\delta^{15}\text{N}$  值偏低。与最大浑浊带相比较, 水体中  $\text{Chla}/S_s$  比值升高,  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  含量减少,  $\delta^{15}\text{N}$  值降低, 说明外海区藻类对营养盐的同化吸收作用程度较大。此外, 由图 8 可知,  $\delta^{15}\text{N}$  与  $\text{Chla}$  含量和  $\text{Chla}/S_s$  之间均呈现一定的负相关性( $R = -0.417$ ,  $P = 0.048$ ;  $R = -0.447$ ,  $P = 0.032$ ), 体现了微藻同化作用对该区域悬浮颗粒有机氮的影响。

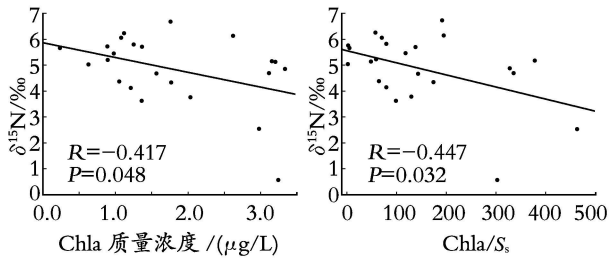


图 8 11 月份外海区  $\delta^{15}\text{N}$  与  $\text{Chla}$  质量浓度及  $\text{Chla}/S_s$  的相互关系

Fig. 8 Correlations of  $\delta^{15}\text{N}$  with  $\text{Chla}$  and  $\text{Chla}/S_s$  in the adjacent marine area in November

### 3 结论

长江口海域表层水体中悬浮颗粒物的稳定氮同位素组成具有较宽的数值范围,  $\delta^{15}\text{N}$  值分布范围为  $0.6\text{‰} \sim 8.2\text{‰}$ , 与国外其他一些河口的  $\delta^{15}\text{N}$  分布水平一致。该区域  $\delta^{15}\text{N}$  值具有明显的时空分布特点, 其变化趋势与陆源输入和水中存在的氮的生物地球化学过程有关。

研究区域内, 悬浮颗粒物  $\delta^{15}\text{N}$  的分布呈现明显的季节性差异, 8 月份最高, 其次为 5、11 月份, 2 月份最低, 与长江入海径流的季节变化基本一致。

从  $\delta^{15}\text{N}$  的地区分布特征可以看出, 口门内、最大浑浊带和外海区域  $\delta^{15}\text{N}$  的分布差异较大, 反映了不同的物理混合和生物地球化学作用在各区域的影响。口门内,  $\delta^{15}\text{N}$  的变化主要受长江径流输入影响, 不同季节的长江径流所携带的悬浮颗粒有机氮的同位素组成不同, 导致口门内水体中悬浮颗粒物  $\delta^{15}\text{N}$  值不同, 二者的季节变化相吻合。最大浑浊带, 各季节均存在不同程度的颗粒物分解作用, 这与该区域颗粒物含量较高, 微生物对有机质的降解活动强烈有关。外海区, 生物活动较强, 5、11 月份  $\delta^{15}\text{N}$  的分

布主要受微藻的同化吸收作用影响; 而 8 月份微藻对硝酸盐的吸收作用相对较弱, 水体中的  $\delta^{15}\text{N}$  值主要受颗粒物分解作用的影响, 导致该季节  $\delta^{15}\text{N}$  的水平高于其他季节。

致谢: 衷心感谢中国科学院广州地球化学研究所于志强老师在样品测量时给予的大力帮助!

### 参考文献:

- [1] Dugdale R C, Menzel D W, Ryther J H. Nitrogen fixation in the Sargasso Sea [J]. *Deep-Sea Research*, 1961, 7: 298-300.
- [2] Mariotti A. Natural isotopic composition of nitrogen as a tracer of origin for suspended organic matter in the Scheldt estuary [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 549-555.
- [3] Wu Y, Zhang J, Li D J, *et al.* Isotopic variability of particulate organic matter at the PN section in the East China Sea [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 65: 31-49.
- [4] Ostrom N E, Macko S A, Deibel D, *et al.* Seasonal variation in the stable carbon and nitrogen isotopic biogeochemistry of a coastal cold ocean environment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61 (14): 2 929-2 942.
- [5] Cifuentes L A, Sharp J H, Fogel M L. Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, 33: 1 102-1 115.
- [6] Voß M, Struck U. Stable nitrogen and carbon isotopes as indicator of eutrophication of the Oder river (Baltic sea) [J]. *Marine Chemistry*, 1997, 59(1-2): 35-49.
- [7] Cole M L, Valiela I, Kroeger K D, *et al.* Assessment of a  $\delta^{15}\text{N}$  isotopic method to indicate anthropogenic eutrophication in aquatic ecosystems [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33: 124-132.
- [8] Wu Y, Dittmar T, Ludwigowski K-U, *et al.* Tracing suspended organic nitrogen from Yangtze River catchments into the East China Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2007, 107: 367-377.
- [9] 吴莹, 张经, 张再峰, 等. 长江悬浮颗粒物中稳定碳、氮同位素的季节分布 [J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(5): 547-552.
- [10] 宋飞, 宋秀贤, 俞志明. 长江口海域表层水体颗粒物  $\delta^{15}\text{N}$  的分布特征 [J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38 (6): 524-528.
- [11] Zhang J, Wu Y, Jennerjahn T C, *et al.* Distribution of organic matter in the Changjiang (Yangtze River) estuary and their stable carbon and nitrogen isotopic ratios: implications for source discrimination and sedimentary dynamics [J]. *Marine Chemistry*, 2007, 106: 111-126.

- [12] 沈焕庭, 潘定安. 长江河口最大浑浊带 [M]. 北京: 海洋出版社, 2001. 39.
- [13] McKinney R A, Nelson W G, Wigand C, *et al.* Ribbed mussel nitrogen isotope signatures reflect nitrogen sources in coastal salt marshes [J]. **Ecological Applications**, 2001, **11**(1): 203-214.
- [14] Kwak T J, Zedler J B. Food web analysis of southern California coastal wetlands using multiple stable isotopes [J]. **Oecologia**, 1997, **110**(2): 262-277.
- [15] Graham M C, Eaves M A, Farmer J G, *et al.* A study of carbon and nitrogen stable isotope and elemental ratios as potential indicators of sources and fate of organic matter in sediment of the Forth Estuary, Scotland [J]. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 2001, **52**(3): 375-380.
- [16] Thornton S F, McManus J. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay estuary, Scotland [J]. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 1994, **38**(3): 219-233.
- [17] Mayer L M, Keil R G, Macko S A, *et al.* Importance of suspended particulate in riverine delivery of bioavailable nitrogen to coastal zones [J]. **Global Biogeochemical Cycles**, 1998, **12**(4): 573-579.
- [18] Peterson B J, Howarth R W, Garritt R H. Multiple stable isotopes used to trace the flow of organic matter in estuarine food webs [J]. **Science**, 1985, **227**: 1361-1363.
- [19] 林以安, 唐仁有, 李炎, 等. 长江口生源要素的生物地球化学特征与絮凝沉降的关系 [J]. **海洋学报**, 1995, **17**(5): 65-72.
- [20] Harmelin-Vivien M, Loizeau V, Mellon C, *et al.* Comparison of C and N stable isotope ratios between surface particulate organic matter and microphytoplankton in the Gulf of Lions (NW Mediterranean) [J]. **Continental Shelf Research**, 2008, **28**: 1911-1919.
- [21] Shi Junxian, Chen Z Y, Ning Xiuren, *et al.* Measurements of bacteria and ATP in the Changjiang Estuary and the adjacent East China Sea [A]. Yu Guohui, Martin J M, Zhou Jiayi. Biogeochemical study of the Changjiang estuary [C]. Beijing: China Ocean Press, 1990. 131-135.
- [22] Kanda J, Itoh T, Ishikawa D, *et al.* Environmental control of nitrate uptake in the East China Sea [J]. **Deep-Sea Research II**, 2003, **50**: 403-422.

## Distribution in the stable nitrogen isotope of the suspended particulate organic matter in the Yangtze River (Changjiang) estuary, China and its biogeochemistry implications

LIU Xi-juan<sup>1,2</sup>, YU Zhi-ming<sup>1</sup>, SONG Xi-xian<sup>1</sup>, CAO Xi-hua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Received: Jun., 1, 2009

**Key words:** suspended particulate matter; stable nitrogen isotope; biogeochemistry; the Yangtze River estuary

**Abstract:** In this paper,  $\delta^{15}\text{N}$  of suspended particulate matters (SPM) in surface water was studied during four seasons of 2006 in the Yangtze River estuary. Based on the variations of  $\delta^{15}\text{N}$  in different seasons and geographical regions, the biogeochemical processing of nitrogen transformation was studied and its environmental implications were also revealed. In this paper, the mechanism of nitrogen cycle was explored in the Yangtze River estuary. The results show that  $\delta^{15}\text{N}$  of SPM was in a wide range of 0.6‰ and 8.2‰, varying with seasons and geographic regions. The temporal and spatial variation reflected different influences of terrigenous inputs and nitrogen biogeochemical processing. In the inner estuary,  $\delta^{15}\text{N}$  was affected mainly by riverine inputs from the Yangtze River. In the turbidity maximum zone, SPOM was affected by microbial degradation obviously, indicating the control of the decomposition processing of SPOM in  $\delta^{15}\text{N}$  during four seasons. In the adjacent marine area, the influence of terrigenous inputs weakened and  $\delta^{15}\text{N}$  was controlled by inorganic nitrogen assimilation by phytoplankton and the decomposition of SPOM.

(本文编辑: 刘珊珊)