

晏茂军,董书航,钟晓松,等. 夏季南黄海颗粒氮同位素分布特征及影响因素研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(12): 14–25, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.12.002

Yan Maojun, Dong Shuhang, Zhong Xiaosong, et al. A study on particulate nitrogen isotope distribution, isotope characteristics and controlling factors in the southern Yellow Sea in summer[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(12): 14–25, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.12.002

# 夏季南黄海颗粒氮同位素分布特征及影响因素研究

晏茂军<sup>1</sup>, 董书航<sup>1</sup>, 钟晓松<sup>1</sup>, 宁晓燕<sup>2</sup>, 辛宇<sup>2\*</sup>

(1. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 黄海是人类活动影响显著的半封闭陆架边缘海, 在夏季存在特征鲜明的冷水团结构。为研究南黄海颗粒态氮的循环转化过程, 本文通过分析 2016 年夏季南黄海水体颗粒物和表层沉积物的碳、氮含量及同位素, 探讨南黄海近岸海域和冷水团海域颗粒物和表层沉积物氮含量、同位素的分布差异和影响因素。近岸海域颗粒氮 (Particulate Nitrogen, PN) 呈现出含量较高、氮同位素值 ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ ) 垂向差异较小、沉积物总氮 (Total Nitrogen, TN) 含量较低且氮同位素值 ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ ) 偏负的分布特征; 冷水团海域 PN 呈现出含量低、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$  垂向差异显著、沉积物 TN 含量高且  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  偏正的分布特征。通过海底边界剪切应力模拟、环境因子分析并结合颗粒物与沉积物  $\delta^{15}\text{N}$  示踪分析, 发现南黄海海域颗粒态氮及同位素分布主要受到水体/底边界动力过程影响, 陆源输入和矿化过程亦共同参与调控。

**关键词:** 南黄海; 颗粒氮; 沉积物; 氮同位素

中图分类号: P734.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)12-0014-12

## 1 引言

海洋水体颗粒氮虽然仅占海洋总氮库的 0.5%, 但具有易降解、循环速度快(1~2 周)的特点, 是海洋氮库的重要组成部分<sup>[1]</sup>。颗粒氮主要来源包括海洋浮游植物及死亡后碎屑、陆源输入、浮游动物/鱼类排泄物、大气沉降、生物固氮等<sup>[2]</sup>, 不同来源的颗粒氮同位素值存在显著差异<sup>[3-4]</sup>(图 1)。作为海洋颗粒氮的主要来源之一, 浮游植物在同化吸收硝酸盐过程中氮同位素会发生分馏<sup>[2]</sup>, 颗粒氮同位素相对硝酸盐同位素 ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$ ) 的分馏系数 ( $\epsilon$ ) 约为 5‰, 因此  $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$  的时空分布特征与浮游植物初级生产有一定的对应关系<sup>[5-7]</sup>。海洋颗粒氮一部分会被降解转化为无机态氮为浮游植物提供氮营养盐, 另一部分会经过一系列絮凝、吸附和解吸等最终沉降到底部形成沉积物总氮<sup>[8-9]</sup>。颗

粒氮在降解过程中, 会优先释放出  $^{14}\text{N}$  而剩余颗粒氮富集  $^{15}\text{N}$ <sup>[10-11]</sup>, 因此表层沉积物总氮同位素亦反映出颗粒氮的来源途径及转化过程<sup>[3, 9, 12]</sup>。海水-沉积物界面的再悬浮过程(图 1)进一步促进颗粒氮和表层沉积物总氮的降解和转化, 进而改变颗粒氮和表层沉积物总氮的氮同位素特征值<sup>[15-17]</sup>, 因此水体  $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$  和沉积物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  能够反映颗粒氮矿化过程。综上, 海洋颗粒氮和表层沉积物总氮同位素特征综合反映了颗粒氮的源-汇-循环过程<sup>[8-9]</sup>, 其时空分布和调控机制一直是海洋氮循环的重要研究方向并具有重要的科学意义<sup>[6, 18-20]</sup>。

黄海是一个半封闭性陆架浅海, 位于中国大陆与朝鲜半岛之间。黄海平均水深 44 m, 最大水深 140 m, 海底地势从东、西、北 3 个方向向中央和东南方向倾斜, 地形主要由黄海中部海槽、苏北舌状台地和朝鲜

收稿日期: 2019-04-12; 修订日期: 2019-07-22。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41576082); 青岛海洋科学与技术国家实验室“鳌山人才”计划项目(2015ASTP-OS08)。

作者简介: 晏茂军(1993—), 男, 河南省信阳市人, 主要从事海洋氮循环过程研究。E-mail: yanmaojun@sju.edu.cn

\* 通信作者: 辛宇, 讲师, 主要从事同位素示踪海洋氮循环过程研究。E-mail: xinyu312@ouc.edu.cn

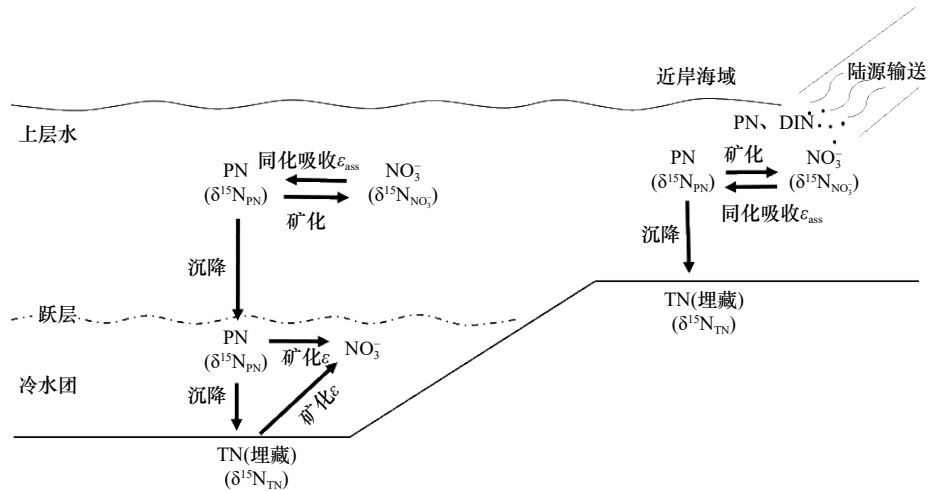


图1 近海水体颗粒氮主要循环过程<sup>[7, 13]</sup>(图中悬浮体迁移参考韦钦胜等<sup>[14]</sup>)

Fig. 1 Sketch of major cycling of marine particulate nitrogen at marginal sea<sup>[7, 13]</sup>(particulate matter migration refers to Wei et al.<sup>[14]</sup>)

沿岸台地等组成<sup>[21]</sup>。黄海主要受长江冲淡水、苏北沿岸流和黄海暖流等水系共同影响。特别在夏季,受季风及地形影响,黄海中部海域水体层化形成近底层特征低温的黄海冷水团<sup>[22-23]</sup>。黄海周围河流输送大量颗粒物,特别是含沙量极高的黄河,其中黄河15%的泥沙通过渤海海峡进入到黄海,山东半岛水下三角洲和南黄海的沉积物都是直接或间接来自于黄河<sup>[24-25]</sup>。表层沉积物粒度分析揭示了沉积物在水动力的存在下被搬运、聚集和沉降形成了中部泥质区<sup>[26-27]</sup>。

近些年随着全球变暖加剧,黄海沿岸海域海表温度增高显著<sup>[28]</sup>。由于大规模水产养殖和陆源污染物输送造成氮磷营养结构显著改变,黄海近岸水体富营养化现象严重<sup>[29]</sup>,赤潮、绿潮等生态灾害频发<sup>[30]</sup>,上述变化对黄海的氮循环过程影响显著<sup>[31-32]</sup>。目前对南黄海氮循环的研究主要围绕营养盐结构<sup>[29, 33-34]</sup>、悬浮颗粒物输送和沉积物迁移<sup>[35-37]</sup>等方面。在氮同位素示踪颗粒物循环转化方面研究鲜有报道。目前仅有刁明亚<sup>[38]</sup>对夏季南黄海两个断面(共10个站位)的颗粒物和浮游植物碳、氮同位素进行了分析,揭示了陆源长江冲淡水和黄海冷水团对颗粒有机物和浮游生物碳、氮同位素组成与分布的影响。但是仍然缺乏对南黄海颗粒氮的时空分布、调控机制的深入研究。

本文针对南黄海颗粒氮及其同位素分布特征和调控机制,通过测定夏季南黄海悬浮颗粒物和表层沉积物碳、氮同位素并结合环境因子分析,旨在:(1)准确刻画南黄海海域颗粒氮和表层沉积物总氮及其同位素的空间分布和变化特征;(2)探究南黄海典型区域(近岸和冷水团)颗粒氮转化和降解过程;(3)探讨颗粒氮降解和沉积物总氮再矿化的调控因素。

## 2 数据与方法

### 2.1 采样方法

通过搭载2016年夏季“国家自然科学基金委黄渤海共享航次”(2016年6月28日至7月6日),在南黄海海域采集水体样品、悬浮颗粒物和表层沉积物样品,采样站位分布于32°~36°N, 121°~124°E,共计42个站位(图2)。温度、盐度、深度数据由船载CTD(SeaBird 911,美国)测定,溶解氧和水质荧光强度由CTD加载溶解氧探头和荧光探头测定。

水体样品是由船载CTD(SeaBird 911,美国)Niskin采水器获取,经0.45 μm醋酸纤维膜过滤后储存于125 mL高密度聚乙烯瓶(Nalgene HDPE,美国Thermo公司)并-20℃保存至营养盐测定;另准确量取一定体积(0.2~2.0 L)海水经0.7 μm GF/F膜(Whatman,美国,马弗炉500℃烧5 h并在干燥器恒湿24 h后称重至使用)过滤取双样,放置于洁净铝箔中烘箱45℃干燥24 h后-20℃保存;表层沉积物样品由箱式采样器获取,取表层0~3 cm沉积物-20℃保存至测定。

### 2.2 分析方法

水体样品营养盐(硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐)通过营养盐自动分析仪(QuAAtro,德国Seal公司)测定,铵盐采用Holmes等<sup>[40]</sup>方法随船测定,精密度小于3%<sup>[41]</sup>。颗粒物样品差减称重得到悬浮颗粒物含量(Suspended Particulate Matter, SPM; 十万分之一电子天平, Sartorius, 德国); GF/F滤膜样品和冻干研磨后的表层沉积物样品用浓盐酸酸熏12 h除去无机碳测定颗粒碳、氮含量和同位素<sup>[42]</sup>。颗粒物和沉积物

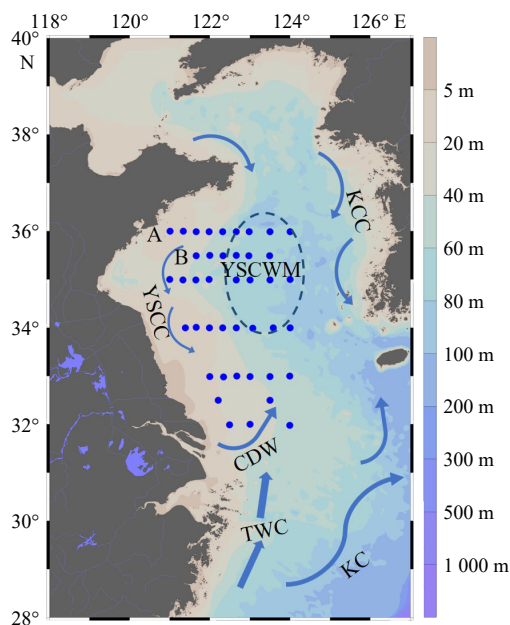


图2 南黄海采样站位分布

Fig. 2 Sampling stations in the southern Yellow Sea

蓝色圆点站位颗粒物、沉积物和水体样品全部采集,黑色圆点站位只采集悬浮颗粒物和水体样品;南黄海主要海流和水团(CDW:长江冲淡水, YSCC: 黄海沿岸流, KCC: 朝鲜沿岸流, TWC: 台湾暖流, KC: 黑潮, YSCWM: 黄海冷水团)<sup>[39]</sup>由蓝色箭头标识; A、B 为 2 个断面标识,色棒标识水深

Blue points stand for stations of water, particle matter and sediment sampling; black points stand for stations of water and particle matter sampling; main water masses include Changjiang Diluted Water (CDW), Yellow Sea Coastal Current (YSCC), Korean Coastal Current (KCC), Taiwan Warm Current (TWC), Kuroshio Current (KC) and Yellow Sea Cold Water Mass (YSCWM); A and B stand for two sections at 36°N and 35.5°N; color bar stands for the bottom depth

样品使用 Elementar 元素分析仪 (Elementar, 德国) 串接 IsoPrime 同位素质谱仪 (IsoPrime, 英国) 测定颗粒有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC)、颗粒氮和总有机碳 (Total Organic Carbon, TOC)、总氮, 及颗粒有机碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ )、氮同位素值和和总有机碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ )、氮同位素值。碳氮同位素标准是国际同位素标准咖啡因 (IAEA-600,  $\delta^{13}\text{C}=-27.77\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}=1.00\text{‰}$ ) 和是 USGS40 ( $\delta^{13}\text{C}=-26.39\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}=-4.50\text{‰}$ ), 碳氮含量标准是乙酰苯胺 (TC%=71.02%, TN%=10.36%) 和土壤标准 (GBW07314, 国家海洋局第二研究所)。  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  精密度分别为 0.2‰ 和 0.3‰。在后续分析讨论中对颗粒氮含量表达方式有两种, 其中 PN 代表颗粒氮在水体中的质量浓度 ( $\mu\text{g/L}$ ), PN% 代表颗粒氮占颗粒物质量的百分比 (%)。

本文所用海底边界剪切应力模型数值是在 Guo

等<sup>[43]</sup> 基于普林斯顿海洋模型 (Princeton Ocean Model) 通过配制嵌套方法在得到高水平分辨率 [(1/18)°] 的基础上, 包含海面 and 河流淡水输入以及横向的边界的潮汐力得到<sup>[44]</sup>。在全年的模型数据中取 7 月和 8 月的平均值作为夏季的海底边界剪切应力数值 ( $\tau$ , 单位  $\text{N/m}^2$ )。

### 3 结果

#### 3.1 悬浮颗粒 POC 和 PN 及其同位素分布

研究海域 POC 含量范围为 45~1 000  $\mu\text{g/L}$ 。表、底层 POC 均在长江口东北部有最高区, 在南黄海中部海域含量普遍较低。PN 分布趋势与 POC 相似, 表层含量范围为 9~193  $\mu\text{g/L}$ , 总体呈现近岸高、外海低的趋势, 最高值在 H30 站位。底层最高值在长江口北部 H33 站位和 H29 站位 (图 3)。

颗粒有机碳同位素值为  $-26.9\text{‰}$ ~ $-19.1\text{‰}$ , 平均值为  $-23.4\text{‰}$  ( $n=144$ )。  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$  表、底层分布趋势相似, 总体呈现近岸高、外海低的分布特征, 高值区在江苏外海和长江口海域, 低值区在南黄海中部海域。颗粒氮同位素范围为  $0.2\text{‰}$ ~ $7.4\text{‰}$ , 平均值为  $3.4\text{‰}$  ( $n=140$ ), 表、底层分布差异较大, 表层高值区在长江口附近, 低值区在南黄海中部海域。长江口向外海  $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$  呈现先降低后升高的趋势; 而底层最高值在南黄海中部, 向四周总体呈现递减趋势, 在苏北近岸和长江口附近又略微升高。

#### 3.2 南黄海表层沉积物碳、氮含量及同位素

南黄海表层沉积物 TOC 含量范围为 0.07%~1.31%, 平均为 0.56% ( $n=40$ )。表层沉积物 TN 含量范围为 0.01%~0.19%, 平均值为 0.08% ( $n=40$ )。TOC 与 TN 分布规律类似, 江苏沿岸和长江口附近较低, 向南黄海中部逐渐升高, 最低值和最高值分别在 H34 和 H06 站位。沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$  范围为  $-19.7\text{‰}$ ~ $-22.9\text{‰}$ , 平均值为  $-22.1\text{‰}$  ( $n=40$ ), 最高值位于长江口外海 H39 站位, 向南黄海中部和江苏近海方向逐渐降低。沉积物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  为  $3.2\text{‰}$ ~ $5.5\text{‰}$ , 平均值为  $4.6\text{‰} \pm 0.7\text{‰}$  ( $n=40$ ), 高值区位于南黄海中部, 向江苏近海和长江口方向逐渐降低, 在苏中近海和长口外海有低值区 (图 4)。

### 4 讨论

黄海在夏季具有鲜明的冷水团环境特征且初级生产力维持在较高水平 [以碳计为  $(316 \pm 277) \text{mg/m}^2$ <sup>[45]</sup>], 海洋 (微) 生物过程较为旺盛, 长江冲淡水影响显著, 因此夏季是研究黄海颗粒氮源、汇和循环转化过程

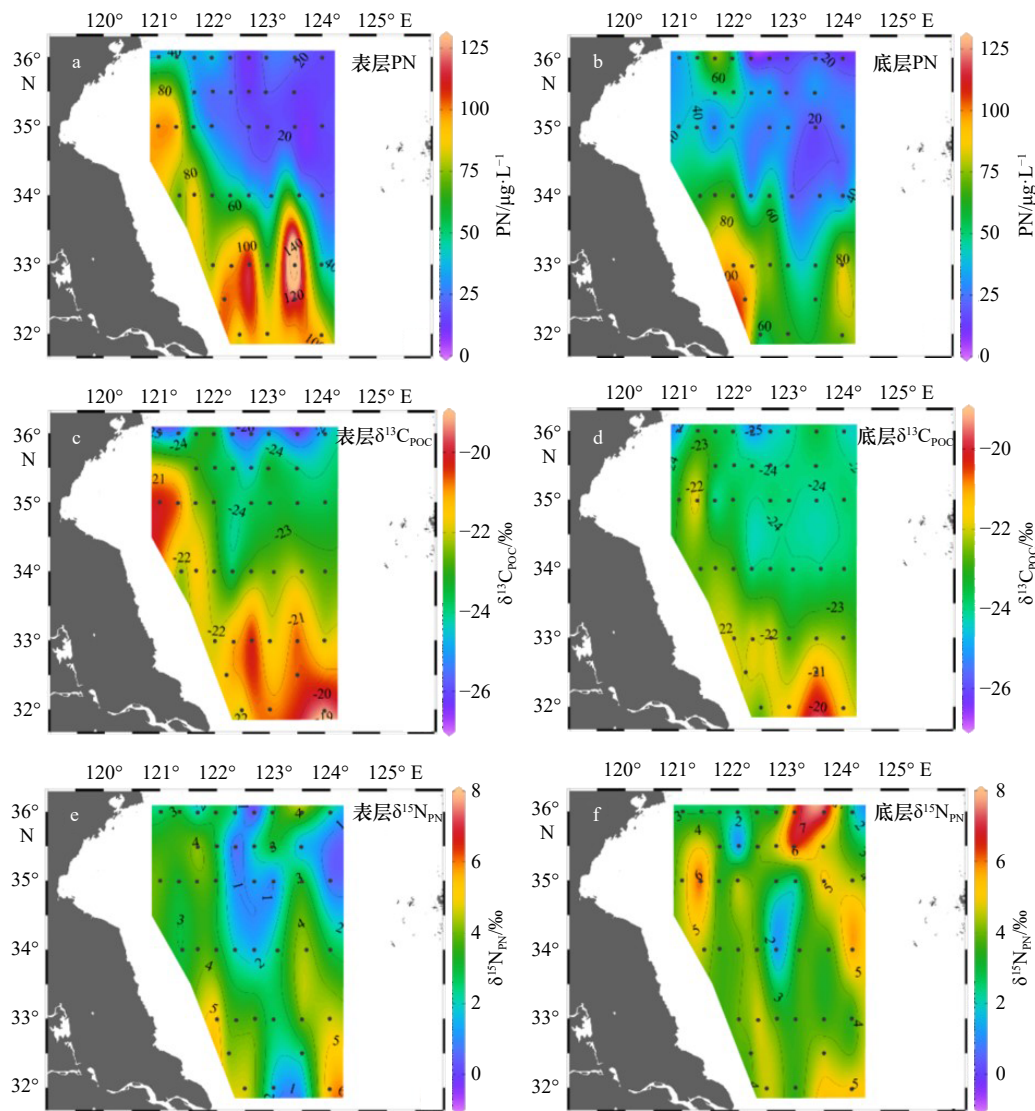


图3 南黄海表、底层颗粒物PN(a、b)及碳(c、d)、氮(e、f)同位素分布

Fig. 3 Spatial distribution of PN (a, b),  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$  (c, d) and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$  (e, f) at surface and bottom in the southern Yellow Sea

的最佳时期。针对于黄海颗粒氮同位素空间分布特征和调控机制, 本文首先对航次调查期间南黄海环境特征进行分析, 明确南黄海水团划分和环境因子空间分布特征; 其次结合环境因子分析结果对南黄海海域颗粒氮和氮同位素空间分布的影响因素开展讨论, 重点围绕氮同位素特征如何示踪主要调控过程; 最后结合底边界临界应力模拟数据和颗粒物与沉积物氮同位素对应关系, 分析探讨底边界动力过程对颗粒氮沉降和沉积物总氮再矿化的影响。

#### 4.1 夏季南黄海环境特征

##### 4.1.1 夏季南黄海水团特征分析

在调查站位中, A、B 两个断面较为完整地覆盖了从近岸到黄海中部冷水团的海域, 其断面温、盐剖面能够较好地反映出冷水团与近岸水体温、盐结构

差异。从图5可以看出, 在10~20 m的温跃层以下, 很明显地存在两个低于8℃的“冷核”, 表明调查海域已经形成了冷水团结构<sup>[46]</sup>。冷水团海域站位表底层温差为13.5~16.4℃, 平均值(14.6±0.9)℃(n=14), 相对以往研究结果偏高<sup>[28, 47]</sup>, 说明冷水团海域水体温跃层强度加强, 冷水团结构更加稳定。

##### 4.1.2 南黄海环境参数主成分分析

为分析各个站位的底部环境参数对悬浮颗粒物沉降及表层沉积物再悬浮的影响, 本文对各站位底层各项环境参数(水深、温度、盐度、浊度、溶解氧、荧光值、密度、底边界剪切应力、SPM、POC、PN、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 和5项营养盐)进行主成分分析(SPSS 22.0, 美国), 得到3个主成分可解释环境参数空间变化的80%。

以第一和第二主成分在每个环境参数主成分得

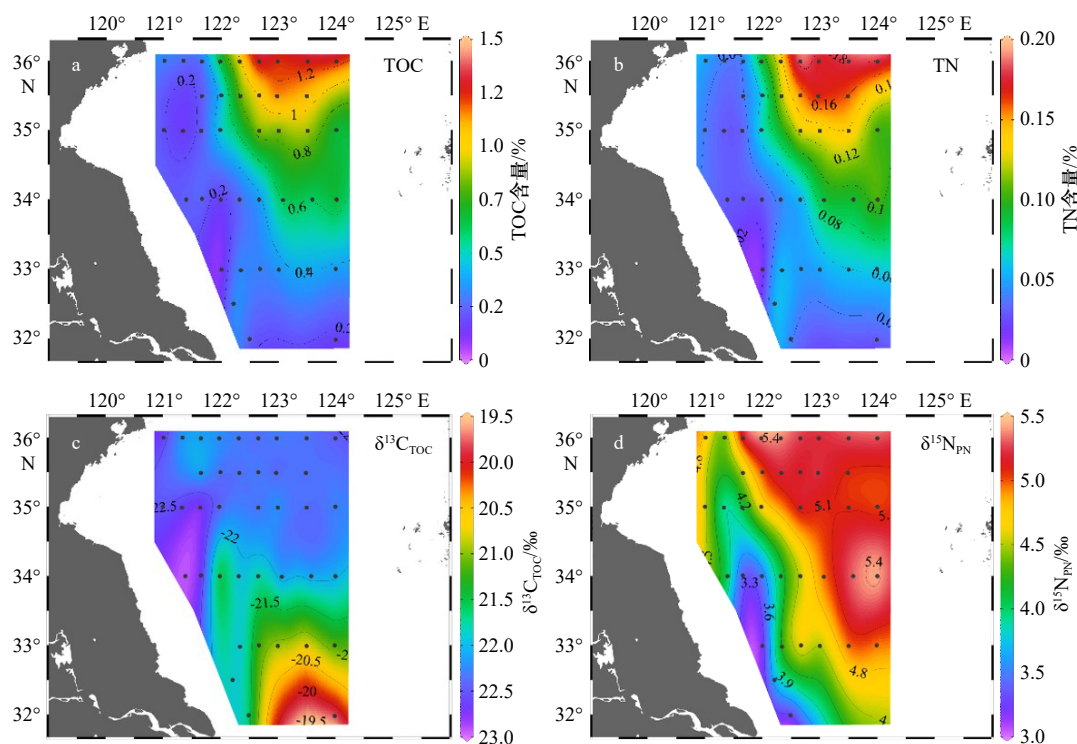


图 4 南海黄沉积物 TOC(a)、TN(b)含量及碳(c)、氮同位素(d)分布

Fig. 4 Spatial distribution of TOC (a), TN (b),  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$  (c) and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  (d) in sediments of the southern Yellow Sea

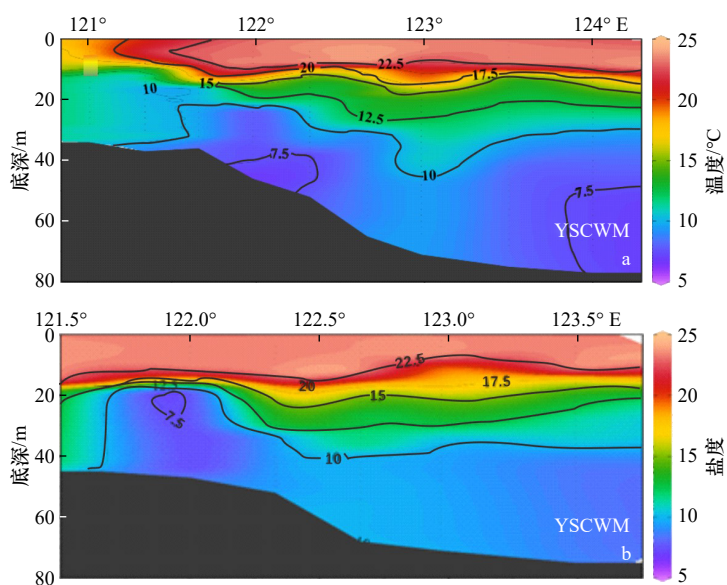


图 5 A、B 断面温度、盐度断面分布

Fig. 5 Vertical distribution of temperature in section S A (a) and B (b)

分为坐标轴作图并标识站点名称(图 6a)。其中第一、四象限诸点分布在长江口及江苏浅滩站位(图 6b 蓝色圆形站位),第二象限诸点都分布在南黄海中部(绿色三角站位),第三象限诸点分布在苏北沿岸以及山东半岛东南(黑色矩形站位)。因此调查站位可归类分为冷水团站位(绿色三角)和近岸站位(蓝色圆点和黑色矩形),旨在更加清晰地分析在不同环境特征下颗

粒物和沉积物中氮元素的循环和转化过程。

#### 4.2 水体 PN 和 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 分布特征及影响因素

水体表、底层 PN 水平分布均呈现出显著差异(图 3a, b)。研究海域近岸站位表、底层 PN 含量都明显高于冷水团特征站位。近岸海域表层水体颗粒物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$  均高于  $-23\text{‰}$ (图 3c),表明颗粒物主要来源是海洋初级生产<sup>[48]</sup>,则近岸表层  $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$  主要反映了同化

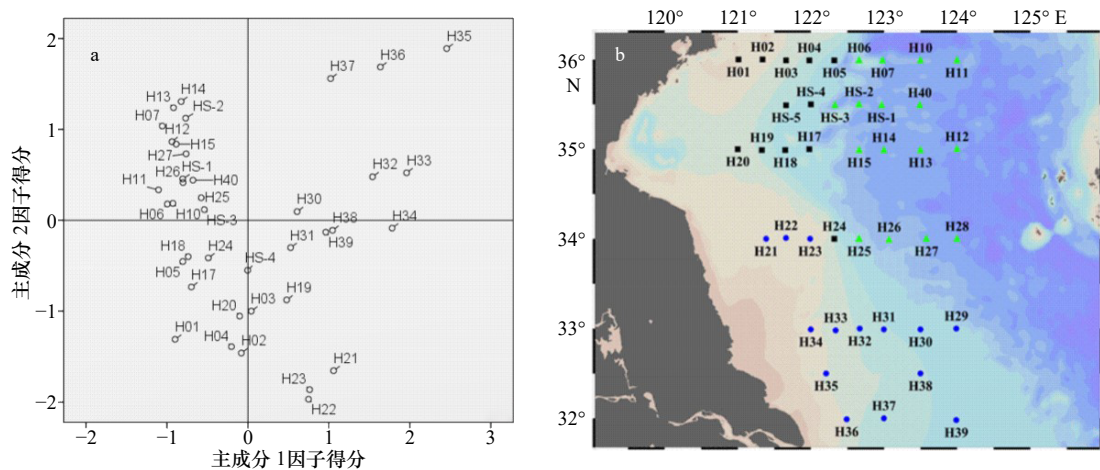


图6 南黄海底层环境参数主成分分析

Fig. 6 Results of principal component analysis of environment parameters at bottom layer (a) and stations categorized based on principal component analysis in the southern Yellow Sea

(a) 及划分水团(b)绿色三角代表冷水团特征站位, 黑色矩形和蓝色圆形代表近岸站位

Cold water masses stations are marked with green triangles, inshore stations are marked with blues circle and black squares

吸收氮源的氮同位素信号(图3e)。冷水团海域表层水体颗粒物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 均低于 $-23\text{‰}$ (图3c), 显示出部分陆源信号特征, 表层颗粒物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 向北逐渐偏负变化趋势同时暗示了颗粒物从黄河输送而来的可能性<sup>[49-50]</sup>, 因此冷水团海域表层颗粒物 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 相对近岸偏负这一特征可能与颗粒氮来源(陆源输送、大气沉降和微生物活动等)有关。研究海域水体底层颗粒物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 同样呈现近岸较高、冷水团海域低的分布特征(图3d),  $-20\text{‰}\sim-24\text{‰}$ 的分布范围反映出底层颗粒有机碳以海源为主要来源的物源特征。水体底层颗粒物 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 空间变化在近岸海域较小(图3f), 在冷水团海域则站位间变化较大。水体底层颗粒物 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 的空间变化差异说明了底层颗粒物 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 分布是受到源、汇及转化过程等多因素共同控制。

水体悬浮颗粒物碳、氮含量及其同位素垂向分布亦呈现出明显变化(图7a-f)。近岸站位SPM、POC和PN含量垂向分布呈现出的随水深增加(15~50m)而降低的变化趋势(图7a, b, e, 蓝色圆点和黑色矩形)以及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 范围 $-20\text{‰}\sim-24\text{‰}$ 一同说明近岸水体PN主要源于海洋初级生产<sup>[45]</sup>。近岸站位PN含量相对较高[( $65\pm 30$ ) $\mu\text{g/L}$ ,  $n=70$ ], 但PN%基本低于1%且随水深无显著变化趋势, 这可能是由于陆源输入或再悬浮造成颗粒物中包含较多无机物质从而降低了PN%<sup>[51]</sup>。近岸颗粒物 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 分布范围较窄, 为 $0.5\text{‰}\sim 6.5\text{‰}$ (平均 $3.7\text{‰}\pm 1.2\text{‰}$ ,  $n=70$ ), 反映出垂向混合的强烈造成水体颗粒氮及其同位素分布比较均匀。 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$

与 $\ln[\text{PN}\%]$ 关系不符合瑞利分馏模型( $R^2=0.003$ ,  $p>0.50$ ), 反映出降解过程信号不显著<sup>[7]</sup>, 表明矿化过程不是影响近岸颗粒氮垂向分布的主要过程。由于近岸陆源输入或底边界再悬浮过程扰乱了水体原位初级生产和矿化过程的信号, 因此无法从PN、PN[%]、POC、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 等的空间变化推断出近岸水体颗粒氮的主要转化过程。

冷水团站位水体SPM、POC、PN垂向变化相对近岸站位均较小(图7a, b, e, 绿色三角), 而PN%垂向变化较大(图7d, 绿色三角), 结合 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ 范围 $-23\text{‰}\sim-27\text{‰}$ 可以推测冷水团区域颗粒氮来源可能有陆源输入的贡献。已有研究表明, 冷水团中的颗粒会随时间而逐渐向更深处下沉<sup>[49]</sup>, 韦钦胜等<sup>[52]</sup>和蔡德陵等<sup>[53]</sup>对南黄海悬浮体迁移和沉积物来源研究也表明近岸颗粒物向南黄海输送是南黄海颗粒物的重要来源(图1所示)。颗粒氮 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 垂向变化范围较大, 随深度增加 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 呈现明显升高的趋势(图7f, 绿色三角), 反映出颗粒氮沉降深度增加导致颗粒氮降解增强, 释放 $^{14}\text{N}$ 从而使颗粒物 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 趋向偏正<sup>[11, 15]</sup>。因此颗粒氮 $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ 和 $\ln[\text{PN}\%]$ 之间观察到存在有微弱的相关关系( $R^2=0.07$ ,  $p<0.05$ ), 表明矿化过程对冷水团海域颗粒氮循环有一定的影响。

### 4.3 南黄海表层沉积物总氮及其同位素分布特征及影响因素

#### 4.3.1 南黄海沉积物TN及 $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ 分布特征

沉积物 $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ 影响因素主要是物源性质和埋藏环境<sup>[19, 54]</sup>。南黄海表层沉积物碳、氮物质的量的比

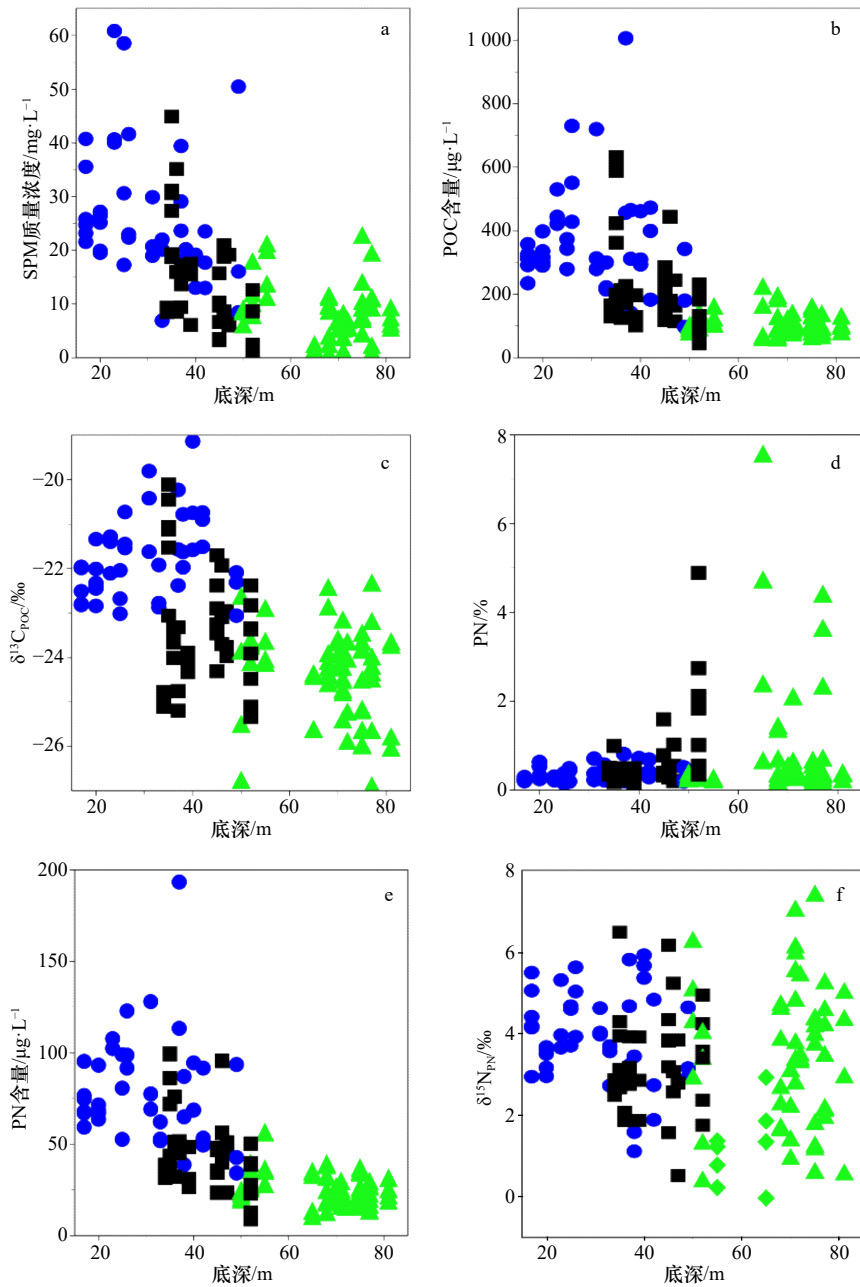


图7 调查站位水体 SPM 质量浓度(a)、POC(b)、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ (c)、PN%(d)、PN(e) 和  $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ (f) 随底深变化  
Fig. 7 Variation of SPM concentration(a), POC(b),  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ (c), PN%(d), PN(e) and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ (f) with bottom depth

绿色三角代表冷水团特征站位, 黑色矩形和蓝色圆形代表近岸站位

Cold water masses stations are marked with green triangles, inshore stations are marked with blue circles and black squares

(C/N) 为 7.21~10.87 (图 8a), 在长江口及黄海中部海域变化较小, 但是在近岸变化显著, 表明中部海域沉积物的来源/转化过程相对单一, 而近岸站位的来源比较复杂。陆、海源  $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$  特征值分别取  $-20\%$  和  $-26\%$  [48, 55], 根据二端元混合模型大致估算沉积物有机质海源比重 (图 8b)。从图上看苏北近海陆源输入比重最高, 这与以往研究结果一致 [56]。长江口外海  $123^\circ\text{E}$  以东海域海源比重较高, 可能与黄海暖流和台湾暖流的输入累积有关 [57]。沉积物有机质海源比重

在黄海冷水团海域无显著空间变化, 且陆、海源来源占比相当 [24]。

沉积物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  与  $\ln[\text{TN}\%]$  存在显著线性正相关 ( $R^2=0.68$ ,  $p<0.01$ ,  $n=38$ ), 即高氮含量对应高氮同位素值, 与矿化过程中瑞利分馏所导致的  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  与  $\ln[\text{TN}\%]$  负相关关系相反 [12, 19], 这说明表层沉积物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  分布的控制因子并不是矿化过程。韩天伟等 [58] 对南黄海海域表层沉积物粒径进行分析, 发现 TN 较低的近岸站位沉积物粒径较大, 而 TN 高的南黄海中部粒径较

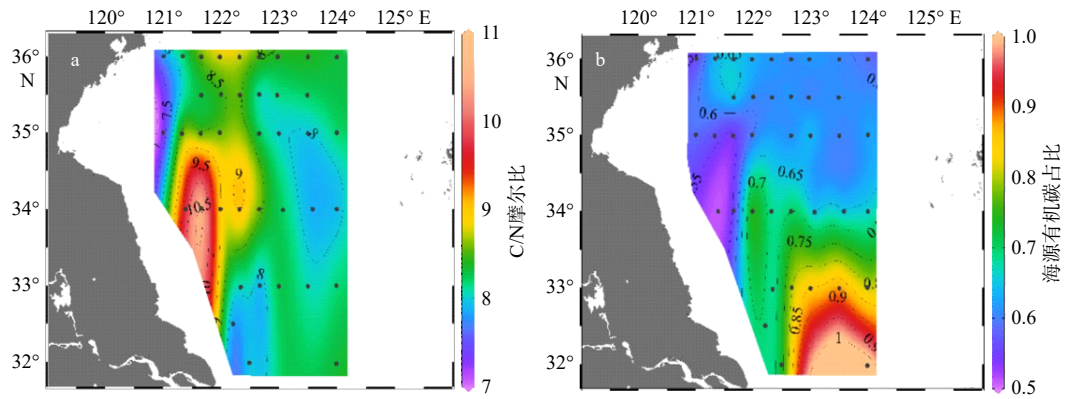


图8 表层沉积物碳氮比(a)、海源有机碳占比(b)分布

Fig. 8 Spatial distribution of sediment C/N ratio (a) and organic matter proportion of marine source (b) in surface sediments of the southern Yellow Sea

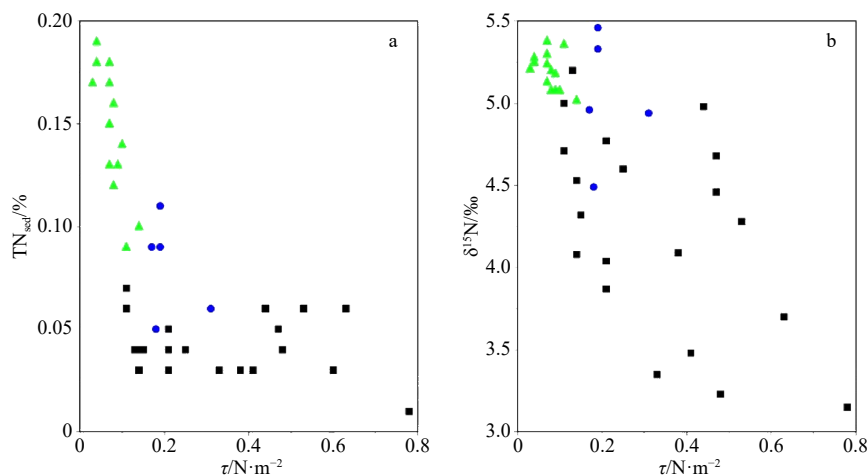
小,因而可以推断不同粒径代表的物源性质差异是造成沉积物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  与  $\ln[\text{TN}\%]$  正相关性的主要原因。

海底底边界动力过程是影响颗粒物迁移和沉积的主要因素<sup>[59]</sup>,因此本文采用模拟得到的海底临界剪切应力表征海底动力过程。结合  $\tau$  与 TN 和  $\delta^{15}\text{N}$  的关系(图 9a, b)可以看出在冷水团海域,随着  $\tau$  减小 ( $<0.2$ ) TN% 显著升高,表层沉积物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  站点间差异较小,沉积物主要源于粒径较小、含氮较高的单一来源细颗粒物沉降形成。在近岸海域,随着  $\tau$  的增大 ( $>0.2$ ),沉积物 TN% 仅为 0.05% 左右,推测近岸沉积物主要源于粒径较大、含氮较低的粗颗粒物沉降形成。由沉积物 C/N 和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$  看出近岸沉积物陆、海源比重站点间差异较大<sup>[60]</sup>,因而造成近岸沉积物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  相对外海偏负且变化范围较大这一空间分布趋势。总之,近岸沉积物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  的主要调控因子是陆/

海源输送和底边界动力过程;在冷水团海域,底边界动力过程是控制颗粒氮沉降进而影响  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  特征的主要因素。

#### 4.3.2 底边界动力过程对颗粒氮沉降及矿化的影响

表层海水颗粒氮主要源于海洋初级生产,而中、底层海水颗粒氮来源更加复杂且经历了矿化等转化过程。因此本文以沉积物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  与表层颗粒物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$  的偏差 ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{sed-sur}}$ ) 表征颗粒氮在水体中所经历的转化过程直至沉降埋藏到沉积物(图 10a)。 $\delta^{15}\text{N}_{\text{sed-sur}}$  在南黄海海域变化范围为  $-2.3\text{‰} \sim 5.3\text{‰}$  ( $1.8\text{‰} \pm 1.7\text{‰}$ ,  $n=39$ )。 $\delta^{15}\text{N}_{\text{sed-sur}}$  在长江口北部近岸海域较低至负值,向北部和南黄海中部逐渐增大,在南黄海中部普遍偏正。在冷水团海域  $\tau$  较低,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{sed-sur}}$  均是正值 ( $0.2\text{‰} \sim 5.3\text{‰}$ ),与  $\tau$  在  $0 \sim 0.2$  范围内没有明显的变化趋势(图 10b, 绿色三角),说明颗粒物从表层沉降到沉积

图9 南黄海沉积物  $\text{TN}_{\text{sed}}$  与底临界应力关系(a);南黄海沉积物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  与底临界应力关系(b)Fig. 9 Relationship between bottom critical shear stress ( $\tau$ ) and sedimentary TN% (a) and  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  (b) in sediments of the southern Yellow Sea

绿色三角代表冷水团站点,蓝色圆点和黑色矩形代表近岸站点

Cold watermasses stations are marked with green triangles, inshore stations are marked with black square and blue circles

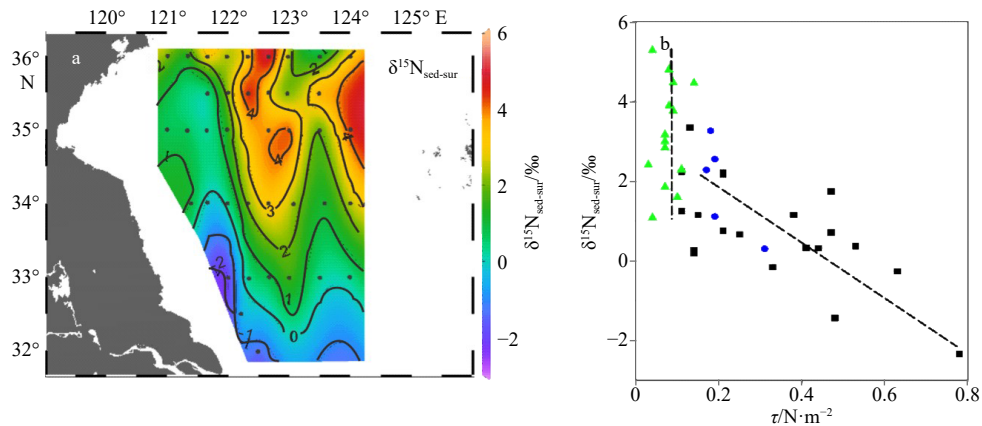


图 10 沉积物与表层颗粒物  $\delta^{15}\text{N}$  偏差值(a)及随底边界应力变化关系(b)

Fig. 10 Spatial distribution of  $\delta^{15}\text{N}$  deviation between sediments and surface particulate nitrogen (a) and relationship of  $\delta^{15}\text{N}$  deviation versus  $\tau$  (b)

绿色三角代表冷水团站位, 黑色矩形代表近岸站位

Cold watermasses stations are marked with green triangles, inshore stations are marked with black square and blue circles

物表层主要经历了矿化过程<sup>[19]</sup>。在近岸海域,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{sed-sur}}$  与  $\tau$  在 0.2~0.8 范围内呈现显著负相关关系 ( $R^2=0.51$ ,  $p<0.01$ , 图 10b 蓝色圆点及黑色矩形)。这说明一方面底边界剪切应力增大致使颗粒物更难沉降, 增加了颗粒物在水体中矿化时间, 因此颗粒物矿化程度更高,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$  也更偏正<sup>[19]</sup>; 另一方面原位生产的有机质颗粒相对粒径较小, 而  $\tau$  的增大不利于原位初级生产来源的颗粒物沉降, 所以近岸海域沉积物多以陆源输入的大粒径颗粒物为主, 因此沉积物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  相对偏负, 而沉积物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$  与水体颗粒物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$  差值  $\delta^{15}\text{N}_{\text{sed-sur}}$  则应随  $\tau$  增大而趋向负值<sup>[48]</sup>。总之, 以海底临界剪切应力表征底边界动力过程可以很好地解释南黄海水体颗粒物与沉积物之间空间对应关系的差异。

## 5 结论

颗粒氮作为重要的生源要素之一, 其在黄海的源、汇和转化过程是一个非常具有研究意义的科学问

题。本文通过采集和测定南黄海颗粒物和表层沉积物的碳、氮含量及同位素, 结合环境因子分析, 得出以下主要结论。南黄海悬浮颗粒氮及其同位素从近岸到外海空间分布差异显著, 在黄海冷水团区域颗粒物  $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$  垂向升高的分布特征是由冷水团层化形成的稳定水体结构所造成。表层沉积物  $\text{TN}_{\text{sed}}$  含量和  $\delta^{15}\text{N}_{\text{sed}}$  均呈现从近岸到外海逐渐升高的分布特征, 引入海底边界剪切应力可以较好地解释水体颗粒氮与沉积物总氮的对应关系。南黄海颗粒氮“源-汇”过程主要受水动力过程和海底边界动力过程调控, 在近岸站位沉积物并不是颗粒氮主要的“汇”; 在冷水团站位矿化过程和沉积物埋藏则是颗粒氮主要的“汇”。

**致谢:** 感谢国家自然科学基金委 2016 夏季黄渤海共享航次和“东方红 2”号科考船提供的采样机会, 感谢船上全体船员在采样过程中提供的帮助。

## 参考文献:

- [1] Gruber N. The Marine Nitrogen Cycle: Overview and Challenges[M]//Capone D G, Bronk D A, Mulholland M R, et al. Nitrogen in the Marine Environment. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2008: 1-50.
- [2] Montoya J P. Nitrogen isotope fractionation in the modern ocean: implications for the sedimentary record[M]//Zahn R, Pedersen T F, Kaminski M A, et al. Carbon Cycling in the Glacial Ocean: Constraints on the Ocean's Role in Global Change. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994: 259-279.
- [3] Montoya J P, Carpenter E J, Capone D G. Nitrogen fixation and nitrogen isotope abundances in zooplankton of the oligotrophic North Atlantic[J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(6): 1617-1628.
- [4] Wu Ying, Dittmar T, Ludwichowski K U, et al. Tracing suspended organic nitrogen from the Yangtze River catchment into the East China Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2007, 107(3): 367-377.
- [5] Waser N A D, Harrison P J, Nielsen B, et al. Nitrogen isotope fractionation during the uptake and assimilation of nitrate, nitrite, ammonium, and urea by a marine diatom[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(2): 215-224.

- [6] Lourey M J, Trull T W, Sigman D M. Sensitivity of  $\delta^{15}\text{N}$  of nitrate, surface suspended and deep sinking particulate nitrogen to seasonal nitrate depletion in the Southern Ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(3): 1081.
- [7] Sigman D M, Karsh K L, Casciotti K L. Nitrogen isotopes in the ocean[M]//Steele J H. *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2nd ed. Oxford, UK: Academic Press, 2009: 40–54.
- [8] Altabet M A, Deuser W G, Honjo S, et al. Seasonal and depth-related changes in the source of sinking particles in the North Atlantic[J]. *Nature*, 1991, 354(6349): 136–139.
- [9] Altabet M A, Francois R. Sedimentary nitrogen isotopic ratio as a recorder for surface ocean nitrate utilization[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(1): 103–116.
- [10] Saino T, Hattori A.  $^{15}\text{N}$  natural abundance in oceanic suspended particulate matter[J]. *Nature*, 1980, 283(5749): 752–754.
- [11] Altabet M A. Variations in nitrogen isotopic composition between sinking and suspended particles: implications for nitrogen cycling and particle transformation in the open ocean[J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1988, 35(4): 535–554.
- [12] Holmes M E, Eichner C, Struck U, et al. Reconstruction of surface ocean nitrate utilization using stable nitrogen isotopes in sinking particles and sediments[M]//Fischer G, Wefer G. *Use of Proxies in Paleoceanography*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999: 447–468.
- [13] Robinson R S, Kienast M, Luiza Albuquerque A, et al. A review of nitrogen isotopic alteration in marine sediments[J]. *Paleoceanography*, 2012, 27(4): PA4203.
- [14] 韦钦胜, 于志刚, 夏长水, 等. 夏季长江口外低氧区的动态特征分析[J]. *海洋学报*, 2011, 33(6): 100–109.  
Wei Qinsheng, Yu Zhigang, Xia Changshui, et al. A preliminary analysis on the dynamic characteristics of the hypoxic zone adjacent to the Changjiang Estuary in summer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 33(6): 100–109.
- [15] Blackburn T H. Release of nitrogen compounds following resuspension of sediment: model predictions[J]. *Journal of Marine Systems*, 1997, 11(3/4): 343–352.
- [16] Middelburg J J, Nieuwenhuize J. Carbon and nitrogen stable isotopes in suspended matter and sediments from the Schelde Estuary[J]. *Marine Chemistry*, 1998, 60(3/4): 217–225.
- [17] Lehmann M F, Bernasconi S M, Barbieri A, et al. Preservation of organic matter and alteration of its carbon and nitrogen isotope composition during simulated and in situ early sedimentary diagenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(20): 3573–3584.
- [18] Mariotti A, Lancelot C, Billen G. 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(3): 549–555.
- [19] 刘秀娟, 俞志明, 宋秀贤, 等. 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[J]. *海洋科学*, 2010, 34(1): 11–17.  
Liu Xiujuan, Yu Zhiming, Song Xiuxian, et al. Distribution in the stable nitrogen isotope of the suspended particulate organic matter in the Yangtze River (Changjiang) estuary, China and its biogeochemistry implications[J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(1): 11–17.
- [20] Liu Qianqian, Kandasamy S, Lin Baozhi, et al. Biogeochemical characteristics of suspended particulates at deep chlorophyll maximum layers in the East China Sea[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(7): 2091–2109.
- [21] 苏纪兰. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.  
Su Jilan. *Hydrology in China Coastal Sea*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005.
- [22] Naimie C E, Blain C A, Lynch D R. Seasonal mean circulation in the Yellow Sea — a model-generated climatology[J]. *Continental Shelf Research*, 2001, 21(6/7): 667–695.
- [23] Xu Lingling, Wu Dexing, Lin Xiaopei, et al. The study of the Yellow Sea warm current and its seasonal variability[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2009, 21(2): 159–165.
- [24] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1/4): 169–176.
- [25] Alexander C R, Demaster D J, Nittrouer C A. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 1991, 98(1): 51–72.
- [26] Shi Xuefa, Chen Chunfeng, Liu Yanguang, et al. Trend analysis of sediment grain size and sedimentary process in the central South Yellow Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(14): 1202–1207.
- [27] Cheng Peng, Gao Shu, Bokuniewicz H. Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60(2): 203–212.
- [28] Pei Yuhua, Liu Xiaohui, He Hailun. Interpreting the sea surface temperature warming trend in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(8): 1558–1568.
- [29] Wei Qinsheng, Yao Qingzhen, Wang Baodong, et al. Long-term variation of nutrients in the southern Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 111: 184–196.
- [30] Li Hongmei, Zhang Yongyu, Tang Hongjie, et al. Spatiotemporal variations of inorganic nutrients along the Jiangsu coast, China, and the occurrence of macroalgal blooms (green tides) in the southern Yellow Sea[J]. *Harmful Algae*, 2017, 63: 164–172.
- [31] Shi Wei, Wang Menghua. Green macroalgae blooms in the Yellow Sea during the spring and summer of 2008[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(C12): C12010.
- [32] Niu Lixia, Van Gelder P H A J M, Zhang Changkuan, et al. Physical control of phytoplankton bloom development in the coastal waters of

- Jiangsu (China)[J]. *Ecological Modelling*, 2016, 321: 75–83.
- [33] 王保栋, 战闰, 臧家业. 长江口及其邻近海域营养盐的分布特征和输送途径[J]. 海洋学报, 2002, 24(1): 53–58.  
Wang Baodong, Zhan Run, Zang Jiaye. Distributions and transportation of nutrients in Changjiang River Estuary and its adjacent sea areas[J]. *Haiyang Xuebao*, 2002, 24(1): 53–58.
- [34] Jin Jie, Liu Sumei, Ren Jingling, et al. Nutrient dynamics and coupling with phytoplankton species composition during the spring blooms in the Yellow Sea[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 97: 16–32.
- [35] Park Y, Choi J, Gao S. Spatial variation of suspended particulate matter in the Yellow Sea[J]. *Geo-Marine Letters*, 2001, 20(4): 196–200.
- [36] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局[J]. 海洋学报, 1992, 14(2): 81–90.  
Yang Zuosheng, Guo Zhigang, Wang Zhaoxiang, et al. Macroscopic pattern of the transport of suspension from the shelf of Yellow Sea and East China Sea to their eastern deep sea area[J]. *Haiyang Xuebao*, 1992, 14(2): 81–90.
- [37] Hu Limin, Shi Xuefa, Guo Zhigang, et al. Sources, dispersal and preservation of sedimentary organic matter in the Yellow Sea: the importance of depositional hydrodynamic forcing[J]. *Marine Geology*, 2013, 335: 52–63.
- [38] 刁明亚. 夏季南黄海海域颗粒有机物和浮游生物的碳、氮稳定同位素分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.  
Diao Mingya. Analysis of carbon and nitrogen stable isotope of particulate organic matters and plankton in South Yellow Sea in summer[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [39] Chen C T A. Chemical and physical fronts in the Bohai, Yellow and East China seas[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 78(3): 394–410.
- [40] Holmes R M, Aminot A, K erouel R, et al. A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, 56(10): 1801–1808.
- [41] Liu Sumei, Li Lingwei, Zhang Zhinan. Inventory of nutrients in the Bohai[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(16): 1790–1797.
- [42] Harris D, Horw ath W R, Van Kessel C. Acid fumigation of soils to remove carbonates prior to total organic carbon or carbon-13 isotopic analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(6): 1853–1856.
- [43] Guo Xinyu, Hukuda H, Miyazawa Y, et al. A triply nested ocean model for simulating the Kuroshio—Roles of horizontal resolution on JEBAR[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 33(1): 146–169.
- [44] Zhao L, Guo X. Influence of cross-shelf water transport on nutrients and phytoplankton in the East China Sea: a model study[J]. *Ocean Science*, 2011, 7(1): 27–43.
- [45] 张海波, 杨鲁宁, 王丽莎, 等. 2013年夏季黄、渤海颗粒有机碳分布及来源分析[J]. 海洋学报, 2016, 38(8): 24–35.  
Zhang Haibo, Yang Luning, Wang Lisha, et al. Distribution and source analyses of particulate organic carbon in the Yellow Sea and Bohai Sea during summer, 2013[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(8): 24–35.
- [46] 李昂, 于非, 刁新源, 等. 北黄海冷水团温度年际变化研究[J]. 海洋学报, 2015, 37(1): 30–42.  
Li Ang, Yu Fei, Diao Xinyuan, et al. Interannual variability of temperature of the northern Yellow Sea Cold Water Mass[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(1): 30–42.
- [47] 李昂. 黄海冷水团年际变化研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2016.  
Li Ang. The study on interannual variability of yellow sea cold water mass[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [48] Wu Y, Zhang J, Li D J, et al. Isotope variability of particulate organic matter at the PN section in the East China Sea[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 65(1): 31–49.
- [49] Wang Houjie, Wang Aimei, Bi Naishuang, et al. Seasonal distribution of suspended sediment in the Bohai Sea, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 17–32.
- [50] Qiao Lulu, Huang Lingling, Wang Zhen, et al. Flux and its seasonal variation of suspended particulate matter in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 22–34.
- [51] Gawade L, Krishna M S, Sarma V V S S, et al. Spatio-temporal variability in the sources of particulate organic carbon and nitrogen in a tropical Godavari estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 215: 20–29.
- [52] 韦钦胜, 王辉武, 葛人峰, 等. 南黄海悬浮体的垂直分布特性及其指示意义[J]. 地球科学进展, 2013, 28(3): 374–390.  
Wei Qinsheng, Wang Huiwu, Ge Renfeng, et al. Vertical distribution of suspended matter and implications in the Southern Yellow Sea[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(3): 374–390.
- [53] 蔡德陵, 石学法, 周卫健, 等. 南黄海悬浮体和沉积物的物质来源和运移: 来自碳稳定同位素组成的证据[J]. 科学通报, 2003, 48(S1): 21–29.  
Cai Deling, Shi Xuefa, Zhou Weijian, et al. Sources and transportation of suspended matter and sediment in the southern Yellow Sea: evidence from stable carbon isotopes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(S1): 21–29.
- [54] 刘兴健. 黄海和东海陆架西部表层沉积物中碳氮元素的分布特征与环境意义[D]. 南京: 南京大学, 2012.  
Liu Xinjian. Distribution and environmental significance of carbon and nitrogen of surface sediments in the western Yellow Sea and East China Sea shelf[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- [55] Lamb A L, Wilson G P, Leng M J. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using  $\delta^{13}\text{C}$  and C/N ratios in organic material[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 75(1/4): 29–57.

- [56] Xing Lei, Zhao Meixun, Gao Wenxian, et al. Multiple proxy estimates of source and spatial variation in organic matter in surface sediments from the southern Yellow Sea[J]. *Organic Geochemistry*, 2014, 76: 72–81.
- [57] 董爱国. 黄、东海海域沉积物的源汇效应及其环境意义[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.  
Dong Aiguo. Source, sink and its environmental record of sediments in Yellow Sea and East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [58] 韩天伟, 吕晓霞, 宋金明, 等. 南黄海表层沉积物中生源要素的分布规律及其环境意义[J]. 广西科学院学报, 2017, 33(2): 87–92, 101.  
Han Tianwei, Lv Xiaoxia, Song Jinming, et al. Distribution of biogenic elements and their environmental implications in the surface sediments of the South Yellow Sea[J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2017, 33(2): 87–92, 101.
- [59] Zeng Xiangming, He Ruoying, Xue Zuo, et al. River-derived sediment suspension and transport in the Bohai, Yellow, and East China Seas: a preliminary modeling study[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 111: 112–125.
- [60] Yoon S H, Kim J H, Yi H I, et al. Source, composition and reactivity of sedimentary organic carbon in the river-dominated marginal seas: a study of the eastern Yellow Sea (the northwestern Pacific)[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 125: 114–126.

## A study on particulate nitrogen isotope distribution, isotope characteristics and controlling factors in the southern Yellow Sea in summer

Yan Maojun<sup>1</sup>, Dong Shuhang<sup>1</sup>, Zhong Xiaosong<sup>1</sup>, Ning Xiaoyan<sup>2</sup>, Xin Yu<sup>2</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100 China; 2. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** Yellow Sea is a semi-enclosed marginal sea that is significantly impacted by human activities. One of the major characteristics of Yellow Sea is the long-term existence of intensive cold water mass in summer. In order to study the cycling of particulate nitrogen in summer Yellow Sea, we analyzed the organic carbon and nitrogen content and isotope of the suspended particulate matter and of the surface sediments in South Yellow Sea in summer, 2016. We focus on the spatial variances in particulate nitrogen content, isotope character and the controlling factors respectively in coastal waters and cold water masse realm. In the coastal waters, the particulate nitrogen (PN) are comparatively higher and the vertical variances of nitrogen isotope ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ ) are small, while total nitrogen content (TN) in coastal sediment are lower and the nitrogen isotope ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ ) are mostly negative. In central south Yellow Sea where cold water masses exists, the PN is characterized of low content, significant vertical variances in  $\delta^{15}\text{N}_{\text{PN}}$ , while TN in sediment are characterized of high content and positive  $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ . We further run bottom critical shear stress simulation and environmental factors analysis, and found out that the spatial variances of particulate nitrogen content and nitrogen isotopes in the South Yellow Sea was mainly controlled by the vertical mixing in water column, benthic boundary dynamic processes, and partially contributed by re-mineralization and terrestrial PN input.

**Key words:** southern Yellow Sea; particulate nitrogen; marine sediment; nitrogen isotope