

# 夏季黄东海硝酸盐垂向扩散通量的分析\*

吕雯瑾<sup>1</sup> 孙 群<sup>1</sup> 王思佳<sup>1</sup> 李伯志<sup>2</sup>

(1. 天津科技大学海洋与环境学院 天津 300457; 2. 青岛诺泰克测量设备有限公司 青岛 266071)

**摘要** 湍流扩散过程导致的硝酸盐垂向输运对海水表层的浮游植物生长和初级生产力的大小有着重要影响。本文基于 2018 年夏季黄、东海水文环境、硝酸盐浓度和湍动能耗散率的同步、原位数据, 分析了海域温度、盐度和硝酸盐的空间分布特征, 结果表明营养盐含量丰富的黄海冷水团、长江冲淡水、东海北部底层混合水与黑潮次表层水是影响研究海域硝酸盐分布的主要水团。利用垂向湍流扩散硝酸盐通量公式, 计算了三个选定断面上的硝酸盐垂向扩散通量, 其高值区与湍流扩散系数的高值区的位置基本一致。针对存在明显硝酸盐跃层的站位, 计算得到跨硝酸盐跃层的垂向通量  $F_{ND}$  的范围在  $-9.78—36.60\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  之间, 在黄海冷水团区, 夏季温跃层限制了该区营养盐向近表层的湍流垂向扩散; 东海北部底层混合水区, 湍流垂向扩散向上层补充了大量硝酸盐, 促进了跃层之上浮游植物的生长; 黑潮次表层水影响海区, 夏季中层水体混合较弱, 跨跃层的垂向通量也普遍偏低。开展硝酸盐垂向扩散通量的计算与分析, 对进一步明确营养盐的输运机制有着重要研究意义。

**关键词** 硝酸盐; 湍流扩散; 垂向扩散通量; 新生产力; 黄东海

中图分类号 P731.1 doi: 10.11693/hyhz20200100033

硝酸盐是海洋中浮游植物可利用的主要氮形态, 它的循环与补充对于初级生产有着重要作用。海洋中真光层内的浮游植物大量消耗硝酸盐, 而真光层之下, 分解作用产生的铵盐被氧化, 底层硝酸盐的浓度得以增加, 使硝酸盐的垂向分布表现为底层高表层低(Tyrrell, 1999; 沈国英等, 2010)。夏季, 温跃层限制了水体的垂向混合, 加剧了硝酸盐表底之间的浓度差异。然而, 在初级生产力水平较高的海域, 湍流垂向扩散导致的跨硝酸盐跃层的输运对夏季浮游植物的大量增殖有着重要意义。

已有研究表明影响硝酸盐垂向输运的物理过程, 包括对流混合、卷挟作用、上升流与湍流扩散等(Williams *et al.*, 2000; Martin *et al.*, 2010), 其中湍流扩散作为一种小尺度物理过程, 所带来的硝酸盐的垂向输运在夏季上层海洋的初级生产中扮演着不可或缺的角色, 在全球范围内, 硝酸盐垂向扩散通量的量级在  $10^{-4}—10^2\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  之间(Bourgault *et al.*, 2011;

Kaneko *et al.*, 2013)。海洋中动力环境的变化影响着通量量级的大小, 近岸的上升流区与锋区伴随着强湍流耗散的发生、地形的变化会带来非惯性内波的破碎、潮流与风增强了水体的混合程度, 这些受强动力过程影响的海域, 硝酸盐垂向扩散通量的量级明显高于其他海域, 对初级生产力的贡献率在 10%—50% 之间(Schafstall *et al.*, 2010; Kaneko *et al.*, 2013; Doubell *et al.*, 2018; Tanaka *et al.*, 2019)。

黄东海作为西北太平洋的边缘海, 初级生产活跃(郝镔, 2010), 硝酸盐来源多样(Zhang *et al.*, 2006)。黄东海硝酸盐的分布特征已有大量研究(Su, 1998; 王保栋, 2003; 叶然等, 2015), 总体表现为近岸高远岸低, 层化季节的远岸海域表层低底层高。黄海中部底层在层化作用下形成的冷水团是黄海天然的“氮库”(王保栋, 2000; 米铁柱等, 2012); 营养盐含量丰富的长江冲淡水与黑潮次表层水分别在表层和底层改变东海硝酸盐的垂向分布(宋金明等, 2017; 许灵静,

\* 国家重点研发计划项目, 2016YFA0601301 号; 国家自然科学基金, 41876018 号; 天津市自然科学基金, 19JCZDJC40600 号。吕雯瑾, 硕士研究生, E-mail: lvwenjin@foxmail.com

通信作者: 孙 群, 副研究员, E-mail: sunqun@tust.edu.cn

收稿日期: 2020-01-23, 收修改稿日期: 2020-06-11

2019)。围绕硝酸盐垂向输运,已有研究发现在黄海中部,夏季基于湍流卷挟的硝酸盐的贯跃层输运为 $0.21\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,强跃层的限制使硝酸盐的贯跃层输运量明显低于春秋两季(魏皓等,2002);在黄海冷水团边缘的锋区,基于上升流的溶解无机氮垂向通量为 $(1.4\pm 0.9)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,对该海域浮游植物的生长起到重要支撑作用(Wei *et al.*, 2016);在东海陆架边缘,受强混合的影响,黑潮锋区夏季跨跃层的硝酸盐垂向扩散通量为 $0.45\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,约占该海域夏季初级生产所需氮营养盐的10.80%(Liu *et al.*, 2013)。

目前对典型海域硝酸盐垂向扩散通量的研究,在研究方法上多基于TurboMAP、VMP或MSS所搭载的剪切探头所测得的高频湍流观测数据,结合营养盐自动分析仪对海水样品进行的硝酸盐浓度低频测定结果,影响了通量计算结果的精确度。针对黄东海海域,关于硝酸盐垂向通量的研究对湍流过程关注较少,且集中于黄海中部与东海边缘海域等有限区域,缺少对区域内硝酸盐垂向输运量的整体讨论。本文利用垂向微尺度剖面仪(Vertical Microstructure Profilers, VMP-200)和水下紫外分光硝酸盐分析仪(Submersible Ultraviolet Nitrate Analyzer, SUNA-V2)的湍动能散率与硝酸盐浓度的同步、原位观测数据,采用参数化方法计算了硝酸盐垂向扩散通量,在此基础上讨论了黄东海的水文动力环境对通量变化的影响,并对跨硝酸盐跃层的垂向通量所带来的新生产力进行了估算,为深入阐释黄东海的营养盐输运关键过程与浮游植物的生长规律提供了科学参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究海域

搭载航次为2018年6月25日至7月19日由东方红2号执行的夏季航次,本航次完成了黄东海海域50个站点的基本水文要素、硝酸盐浓度、湍动能散率的剖面观测。为研究受黄海冷水团、长江冲淡水、黑潮次表层水影响区域中垂向硝酸盐通量的特征,选择了三条典型断面,分别是C、F、W断面(图1)。C断面包括C1、C2、C3、C4站,位于 $34^\circ\text{N}$ ,从苏北浅滩向黄海中部扩展;F断面沿 $31.5^\circ\text{N}$ 从长江口向东延伸至外海,包括P1、F1、F2、F3、F4和F5站;W断面包括W1、W2、W3、W4站,从浙闽沿岸向东南至东海陆架100m水深处。

### 1.2 数据与处理

温度、盐度使用RBR maestro多参数剖面仪观测,

配备传感器可同步观测调查站位的温度、电导率、压力、叶绿素等物理生物参数,其中温度精度 $0.002^\circ\text{C}$ ,电导率精度 $0.003\text{mS}/\text{cm}$ ,采样频率为6Hz。

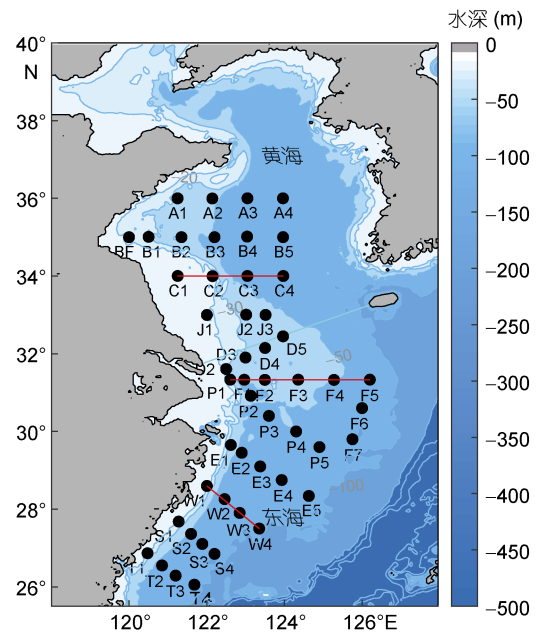


图1 研究海域的采样站位(黑色圆点)与断面(红色实线)位置图

Fig.1 The sampling stations (black dots) and selected sections (red lines) in study area

硝酸盐浓度( $C_N$ )数据采用SUNA-V2进行观测,采样频率为1Hz,精确度为 $\pm 2\mu\text{mol}/\text{L}$ 。航次开始前对SUNA-V2进行了校准,校准方法为使用去离子纯净水作为待测溶液,仪器预热后测量校准曲线,校准以测量去离子纯净水所得硝酸盐量值在 $\pm 2\mu\text{mol}/\text{L}$ 范围内为准。

对上述温度、盐度和 $C_N$ 数据预处理,剔除上4m层感温阶段数据,选取下行观测值,进行逆压订正和去除尖峰,并对数据做1m平均,得到所有采样站位上温度、盐度与 $C_N$ 的垂向空间分辨率为1m的剖面数据。

在仪器观测的同时,每个站位使用船载采水器(Sea-Bird water sampler)按标准层采取水样,并在跃层处加密,海水样品采集后立即用Nalgene过滤器和 $0.2\mu\text{m}$ 孔径的聚碳酸酯膜现场过滤,过滤后水样立即装入处理好的聚乙烯样品瓶中,并于 $-20^\circ\text{C}$ 冷冻保存。航次结束后,在实验室中使用QuAAtro营养盐自动分析仪采用连续流动分析方法对 $C_N$ 进行测定,检出限为 $0.05\mu\text{mol}/\text{L}$ ,测定误差小于3%。该实验室测定的 $C_N$ 与SUNA-V2观测值进行对比,并对后者进行

校准。通过对比分析(图 2), 两者相关系数为 0.96 (置信水平 99.9%, 置信区间为 0.95—0.97), 表明 SUNA-V2 的观测结果与实验室测定结果吻合度高, 并利用回归关系对所有 SUNA-V2 结果进行了订正。

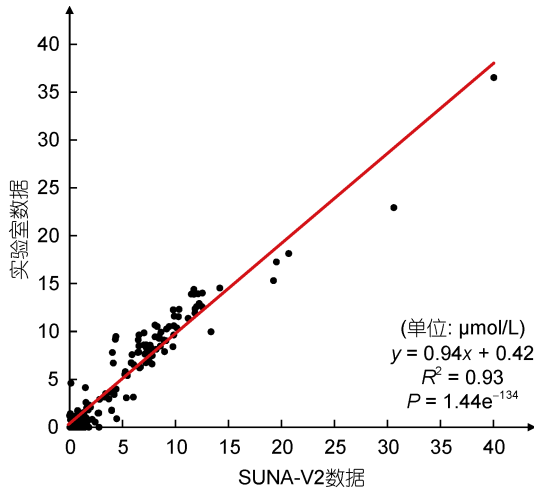


图 2 硝酸盐浓度(单位:  $\mu\text{mol/L}$ )的 SUNA-V2 数据与实验室数据的比较

Fig.2 Comparisons of nitrate concentration (unit:  $\mu\text{mol/L}$ ) between SUNA-V2 and laboratory measured data

根据 Osborn(1980)的湍能耗散法, 可通过观测湍动能耗散率得到湍流扩散系数  $K_\rho$ , 计算公式为:

$$K_\rho = \Gamma \frac{\varepsilon}{N^2}, \quad (1)$$

其中,  $\Gamma=0.2$  为混合效率,  $N^2$  为浮力频率,  $\varepsilon$  为湍动能耗散率。

湍动能耗散率  $\varepsilon$  由垂向微尺度剖面仪 VMP-200 观测数据计算得到, 根据 Taylor 冻结定理将观测的脉动流速转化为垂向流速剪切, 通过局地标准差的方法去除流速剪切数据奇异值, 并对实测剪切谱与 Nasmyth 谱进行迭代拟合确定积分区间, 通过积分剪切谱得到垂向分辨率为 1m 的  $\varepsilon$  剖面 (Moum *et al.*, 1995; Gregg, 1999)。为避免船只停泊产生湍流对数据的影响, 剔除上 10m 层内的  $\varepsilon$  数据。浮力频率  $N^2$  可由观测的温、盐数据计算密度分布, 进而计算得到。

### 1.3 计算方法

根据 Martin 等(2010), 硝酸盐垂向扩散通量  $F_N$  的计算公式为:

$$F_N = -K_\rho \frac{\partial C_N}{\partial z}, \quad (2)$$

其中,  $-\partial C_N / \partial z$  为硝酸盐浓度  $C_N$  的垂向梯度 ( $\text{mmol/m}^4$ )。当  $C_N$  上层低下层高时, 硝酸盐浓度梯度

大于 0,  $F_N$  为正值, 表示存在向上的硝酸盐运输。反之,  $C_N$  上层高下层低时, 硝酸盐浓度梯度小于 0,  $F_N$  为负值, 表示存在向下的硝酸盐运输。

根据硝酸盐垂向分布及其梯度分布, 本文定义硝酸盐跃层为硝酸盐浓度梯度超过  $0.3 \text{mmol/m}^4$  的水层 (Hales *et al.*, 2009)。跨硝酸盐跃层的垂向扩散通量  $F_{ND}$  可表示为:

$$F_{ND} = -\overline{K_\rho} \frac{\Delta C_N}{\Delta z} = -\overline{K_\rho} \frac{C_{N2} - C_{N1}}{z_2 - z_1}, \quad (3)$$

其中,  $C_{N1}$  和  $C_{N2}$  分别硝酸盐跃层上、下界处的硝酸盐浓度,  $z_1$  和  $z_2$  分别为硝酸盐跃层上、下界所在的深度。

为了避免高频采样导致的跃层上下边界处数据剧烈变化引起的计算误差, 上、下界的  $C_N$  取值采用跃层上界之上及下界之下厚度为 5m 水层中的  $C_N$  平均值代替边界值 (Randelhoff *et al.*, 2016)。

对于  $F_{ND}$  的计算结果, 根据 Redfield 比值 (C : N=106 : 16) 将该部分以氮计的跨硝酸盐跃层通量转化为以碳计的新生产力, 在估算该部分新生产力的过程中, 部分海域表层的  $C_N$  极低, 因此假设跨跃层的正向硝酸盐供应被上层的浮游植物瞬间消耗殆尽。

## 2 结果与讨论

### 2.1 黄东海温度、盐度和硝酸盐的分布特征

2.1.1 水平分布 黄、东海夏季近表层(4m层)和底层观测的海水温度、盐度和硝酸盐的水平分布结果如图 3 所示。

夏季, 近表层和底层温度都呈现南高北低的分布。近表层, 海水温度范围在  $20\text{—}28^\circ\text{C}$  之间, 南北温差为  $8^\circ\text{C}$ 。黄海西南部温度偏低, 且在苏北浅滩外侧 C2 站附近存在一闭合的冷水中心。受到向北发展的台湾暖流影响, 长江口外以南的东海近表层海水温度均高于  $26^\circ\text{C}$  (图 3a)。

底层温度范围在  $8\text{—}26^\circ\text{C}$  之间, 南北温差高达  $18^\circ\text{C}$  (图 3d)。黄海中部水温低于  $10^\circ\text{C}$ , 为典型的黄海冷水团区, 而苏北浅滩为水温高于  $20^\circ\text{C}$  的高温水区。沿苏北浅滩外侧向黄海中部的过渡海域, 等温线密集, 温度梯度大, 以 C2 站为中心, 利用其周围相邻四个站位的温度观测数据, 得到 C2 站位跨等温线方向的温度梯度为  $0.10^\circ\text{C/km}$ , 可知以 C2 为中心, 苏北浅滩外侧沿西北-东南向密集分布的等温线区存在潮汐锋 (周锋等, 2008; 程雪丽等, 2017)。东海中部陆架, 海水温度在  $20\text{—}24^\circ\text{C}$  之间, 东北部为温度低于  $16^\circ\text{C}$  的冷水区。近闽浙沿岸海域, 底层海水温度高于  $22^\circ\text{C}$ ,

应为浅水区的闽浙沿岸水。由该海区向外陆架方向, 出现一低温水区, 温度低于  $20^{\circ}\text{C}$ , 且该低温水向北发展到长江口外(P2 站位处)。根据底层盐度分布

(图 3e), 该海区盐度高于 34, 这主要是由于黑潮次表层水从底层向东海陆架入侵, 在该海区形成的低温高盐水。

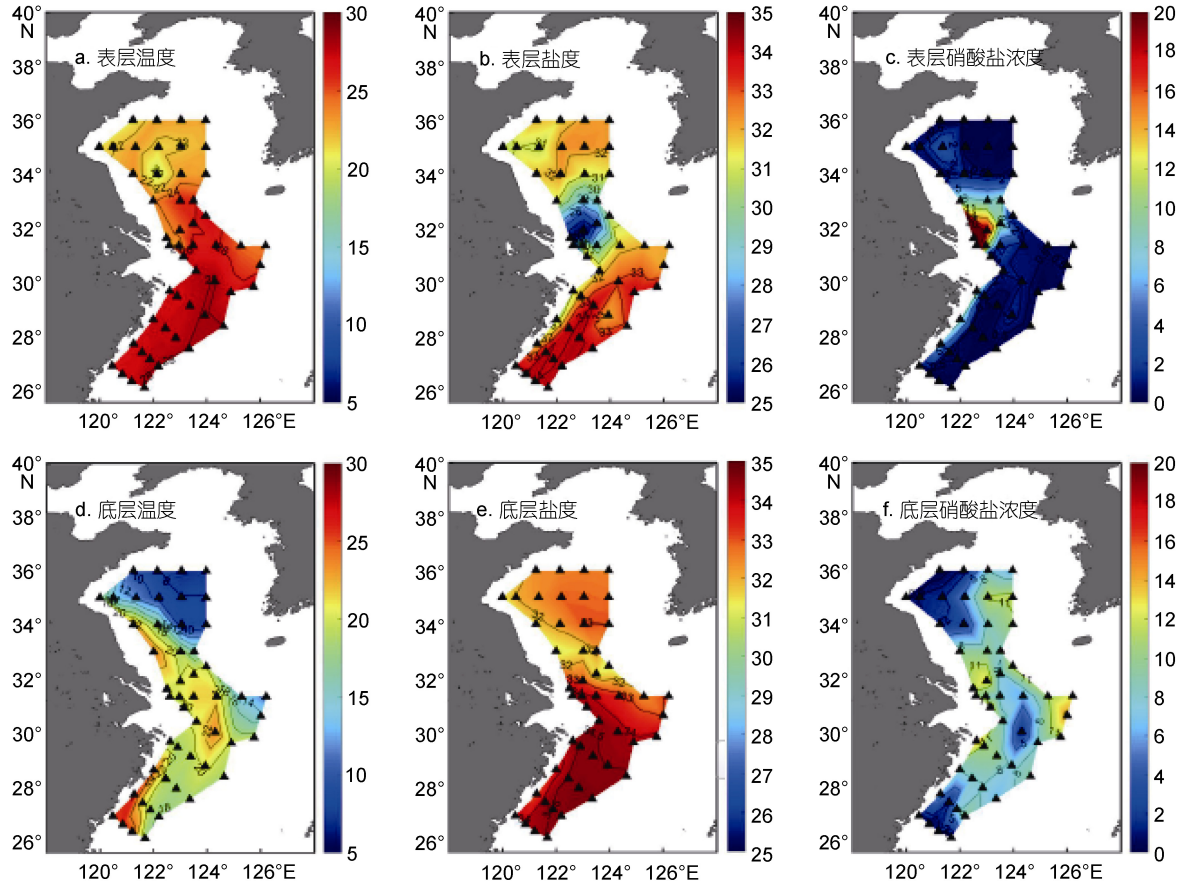


图 3 黄、东海上表层(4m)和底层的温度( $^{\circ}\text{C}$ )、盐度和硝酸盐浓度( $\mu\text{mol/L}$ )的水平分布

Fig.3 Horizontal distributions of temperature( $^{\circ}\text{C}$ ), salinity and nitrate concentration( $\mu\text{mol/L}$ ) in the upper surface layer (4m) and bottom layer in the Yellow Sea and the East China Sea

受陆源径流与外海水影响, 表层和底层的盐度分布特征不同。近表层(4m层)盐度明显分为三个区(图 3b), 一是南黄海中西部盐度偏低海域, 约为 31—32; 二是长江口外海及东北方向低盐的长江冲淡水, 中心盐度低于 26, 且冲淡水边缘存在强盐度锋; 三是东海中陆架盐度较高的台湾暖流水和外海黑潮表层水, 绝大部分海域盐度高于 33。底层盐度则以J断面为分界线, 分成南北两部分(图 3b), 北部是南黄海的低盐水, 盐度约为 32, 南部为长江口外海以南的高盐水, 盐度均高于 33。

硝酸盐的水平分布与黄、东海的水团分布较为一致。在近表层,  $C_N$ 分布仍可分为三个区(图 3c)。由于夏季浮游植物对硝酸盐大量消耗和寡营养盐的外海表层水的影响, 黄海和东海大部分海域近表层的 $C_N$

较低, 普遍低于  $2\mu\text{mol/L}$ 。受长江冲淡水的影响, 在长江口东北方向存在超过  $8\mu\text{mol/L}$ 的 $C_N$ 高值区。

底层的 $C_N$ 分布较复杂。在黄海,  $C_N$ 明显分为近岸低值区和黄海冷水团海域的高值区(高于  $5\mu\text{mol/L}$ ) (图 3f)。冬季混合均匀状态的冷水在黄海海槽中的滞留以及表层浮游植物死亡沉降后的分解是夏季黄海冷水团区域 $C_N$ 偏高的主要原因(王保栋, 1999; 孙湘平, 2008)。苏北浅滩(D3 站位)和东海外陆架(F6 站位)存在两处 $C_N$ 高值区, 中心浓度均超过  $11\mu\text{mol/L}$ , 而在两海区中间的东海陆架上有一闭合的 $C_N$ 低值区, 中心值低于  $5\mu\text{mol/L}$ , 位于P4 站位。该低值中心以南海域 $C_N$ 增高, 尤其在近岸侧,  $C_N$ 达到  $11\mu\text{mol/L}$ 。富营养盐的黑潮次表层水入侵是夏季东海陆架这一海区重要的硝酸盐来源(Chen *et al*, 1999; Wang *et al*, 2016; 左九龙, 2018)。

**2.1.2 垂向分布** 对温度、盐度、硝酸盐水平分布的分析结果表明, 在 2018 年夏季航次调查期间, 从北向南不同海区的水文特点各不相同, 存在的主要水团为占据黄海中部底层的黄海冷水团、在近上层从长江口外侧向东北方向扩展的长江冲淡水以及影响东海陆架底层的黑潮次表层水。考虑黄、东海海域不同水团对于硝酸盐分布的影响以及观测资料的完整性, 本文选取了跨苏北沿岸水与黄海冷水团的 34°N 的 C 断面、沿 31.5°N 从长江口外侧向东延伸至外

海的 F 断面、从闽浙沿岸向东南至东海陆架 100m 水深处的 W 断面, 分析并讨论了沿三个断面的温度、盐度、硝酸盐的垂向分布特征。

在 C 断面上(图 4a, 4d, 4g), 122°E 以西的近岸, 20—22°C 等温线与 32 等盐线呈纵向分布, 且温度、盐度与  $C_N$  表底值差异较小, 这主要是由于潮致混合使得海水垂向混合均匀所引起。122°—122.5°E 之间, 是近岸混合均匀区与远岸层化区之间的过渡海域, 即潮汐锋锋区(周锋等, 2008)。在 C2 站, 底层海水

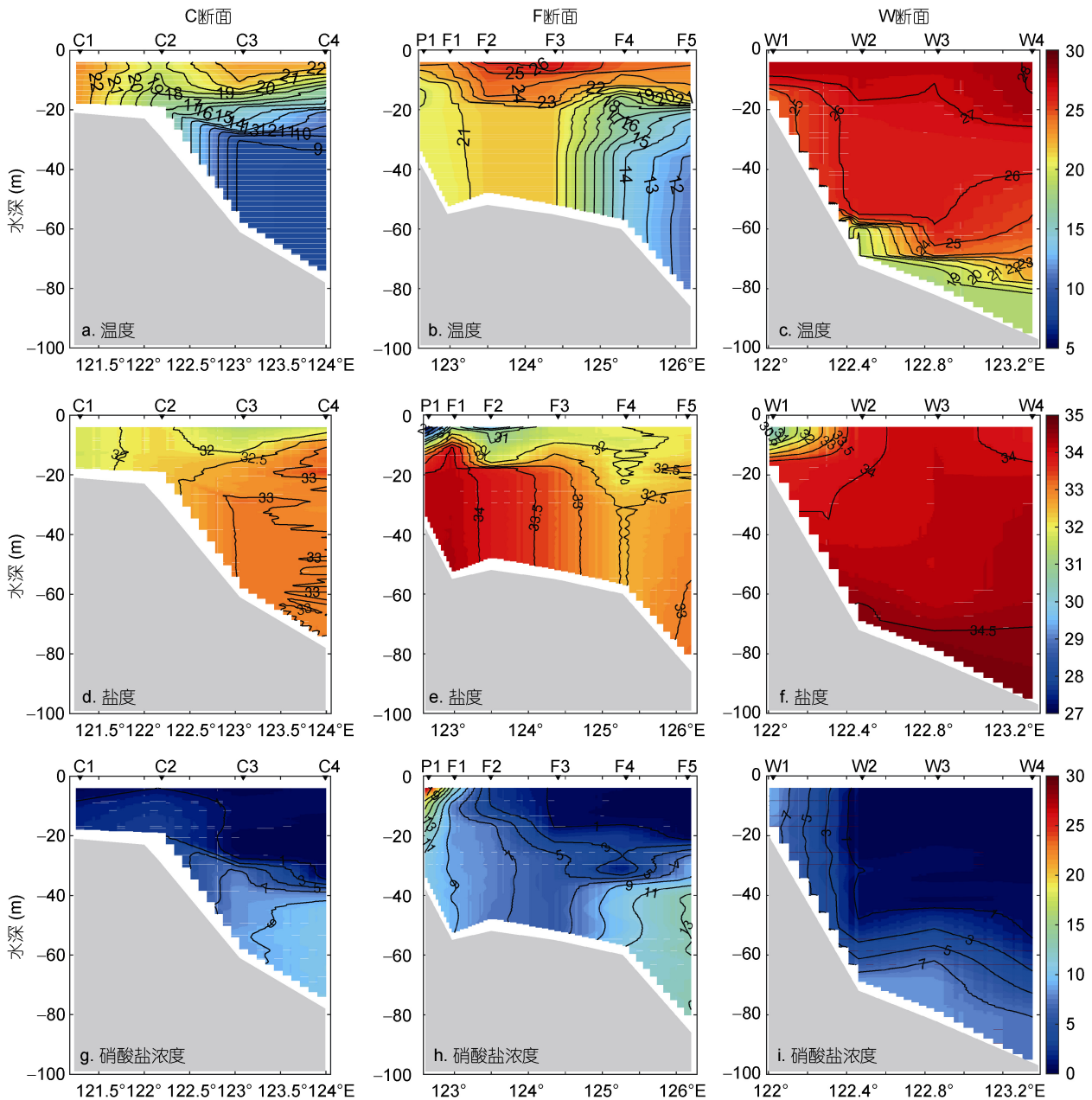


图 4 C、F、W 断面上温度(°C)、盐度和硝酸盐浓度(μmol/L)的垂向分布

Fig.4 Vertical distributions of temperature (°C), salinity and nitrate concentration (μmol/L) in sections C, F, and W

明显上涌,等温线上凸,存在明显的锋区冷水上翻的现象,于海底陆坡处形成一上升流,在上表层形成一冷水中心,海水温度较周围低 $2^{\circ}\text{C}$ 。 $122.5^{\circ}\text{E}$ 以东的黄海中部,深度在 $10\text{—}20\text{m}$ 之间的等温线密集,层化明显,存在显著的温跃层,其强度为 $0.52^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。 $30\text{m}$ 以深为水温小于 $10^{\circ}\text{C}$ 的黄海冷水团,冷水团区的盐度较高,约为 $33$ ;  $C_N$ 较高,均高于 $5\mu\text{mol}/\text{L}$ ,底层的 $C_N$ 高值区与上表层低于 $1\mu\text{mol}/\text{L}$ 的低值区在深度 $30\text{—}40\text{m}$ 之间存在较大的浓度梯度。

F断面受长江冲淡水 and 黑潮次表层水的共同影响,其温、盐和 $C_N$ 垂向分布大体可分为三个区域(如图4b, 4e, 4f)。近岸区(F1 站位以西),近表层温度较高,跃层位于 $10\text{m}$ 水深,跃层之下混合较强,温度均匀分布。但该区上层受长江冲淡水的影响,盐度小于 $30$ , P1 站位处 $C_N$ 最高达到 $27\mu\text{mol}/\text{L}$ ; 下层为由黑潮次表层水沿海底低谷带来的高盐水(图4e),且在F1 站位 $34$ 等盐度线向上明显隆起,形成上升流,将 $20\text{m}$ 深度处的高盐水向上输运至 $5\text{m}$ 深度处,且由于上表层低盐长江冲淡水的存在,在该区形成较强的盐度锋。同时,高盐水与冲淡水的混合所生成的羽状锋和上升流,有效地阻挡了冲淡水向东扩展(朱建荣等, 2003)。

向东为外海过渡区域(F2 站位至F4 站位),近表层温度高于 $26^{\circ}\text{C}$ ,温跃层深度较近岸区要深,约 $20\text{m}$ ; 盐度仍较低,应是冲淡水与黑潮表层水的混合水; $C_N$ 非常低,小于 $3\mu\text{mol}/\text{L}$ 。此外, $20\text{m}$ 以深的等温线和等盐线垂向呈均匀分布,导致跃层强度不大。最外侧海域(F5 站位),最显著的特点是底层存在一冷水区, $15\text{—}25\text{m}$ 层等温线密集,温跃层强度最高达到 $0.8^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,同时,底层冷水区也是大于 $9\mu\text{mol}/\text{L}$ 的 $C_N$ 的高值区(图4h),与上表层低值区之间硝酸盐浓度梯度大于 $0.3\text{mmol}/\text{m}^4$ 。苏育嵩等(1989)指出该低温中盐高营养盐底层水是冬季黄海沿岸水沿苏北浅滩南下向东海输送的低温水与外海高盐水混合变性所形成的,冬季的黄海沿岸水离岸东移后,春夏季在东海北部中部海区的底层依然保持低温的性质。该水团温度在 $9\text{—}12^{\circ}\text{C}$ 之间,盐度在 $32\text{—}34$ 之间。此处,我们称其为东海北部底层混合水(郭东杰等, 2019)。

在W断面上(图4c, 4f, 4i),近岸的W1 站,盐度较低,只有 $31$ ,  $C_N$ 高于 $7\mu\text{mol}/\text{L}$ ,夏季近岸低盐度高营养盐的特征可能与椒江的径流输入或冲淡水贴岸南下的分流有关(王保栋等, 2002)。在W2 站及以东, $50\text{m}$ 以浅水体,温度在 $26\text{—}29^{\circ}\text{C}$ 之间,盐度均大于 $34$ ,  $C_N$ 低于 $1\mu\text{mol}/\text{L}$ ,这种分布特征与高温高盐低营养盐的黑潮

表层水相一致。在底层,温度低于 $20^{\circ}\text{C}$ 、盐度大于 $34.5$ ,这是黑潮次表层水的典型特征(Zhang *et al*, 2007)。 $60\text{m}$ 以深存在大于 $7\mu\text{mol}/\text{L}$ 的 $C_N$ 高值区,与浅层低 $C_N$ 之间,存在大于 $0.3\text{mmol}/\text{m}^4$ 的硝酸盐浓度梯度。

## 2.2 湍扩散系数与硝酸盐垂向扩散通量

### 2.2.1 湍扩散系数的分布特点

根据公式(1)计算得到黄、东海各观测站位的湍扩散系数 $K_p$ ,其变化范围在 $10^{-7}\text{—}10^{-2}\text{m}^2/\text{s}$ 之间。受潮致混合影响,苏北浅滩近岸区湍流混合强烈, $K_p$ 大于 $3.16 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ,黄海冷水团区,跃层之下的水体状态稳定, $K_p$ 偏低。在长江口外,近河口位置的 $K_p$ 表层低底层较高,长江冲淡水边缘受羽状锋的影响,存在表层强混合区, $K_p$ 大于 $3.16 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ 。

图5给出三个断面上湍流耗散率 $\varepsilon$ 、浮力频率 $N^2$ 和湍扩散系数 $K_p$ 的分布。在C断面上,由近岸向远岸依次为垂向混合均匀的苏北沿岸水区和层化显著的黄海冷水团区, $N^2$ 的分布反映了这种分布特征,近岸 $N^2$ 偏小,层化较弱;黄海冷水团上表层(约 $20\text{m}$ 以浅)处较大,大于 $10^{-3}/\text{s}^2$ ,较前者大了一个量级,层化显著(图5d)。夏季该海域上层海水显著增温,海水密度减小,浮力频率向上增加,减弱了湍流垂向混合,与下层冷水之间形成较强的密度跃层(王俊杰, 2018)。 $\varepsilon$ 的高值区位于近岸、C2 站底层及C2—C4 站之间 $20\text{m}$ 深度处的密跃层下缘(图5a)。浅水区在潮致混合作用下, $\varepsilon$ 大于 $10^{-7}\text{W}/\text{kg}$ ;由于底摩擦效应,底边界层中的 $\varepsilon$ 大于 $10^{-8}\text{W}/\text{kg}$ ;而密跃层下缘 $20\text{m}$ 深度出现 $\varepsilon$ 大于 $10^{-7}\text{W}/\text{kg}$ 的分布,应与此处斜压流剪切效应有关。 $K_p$ 分布与 $\varepsilon$ 基本一致(图5g), $20\text{m}$ 处 $K_p$ 大于 $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ 的高值区受密度层化的限制,表现为较薄的一层。

在F断面上,近岸区 $12\text{m}$ 以浅 $N^2$ 大于 $0.32 \times 10^{-2}/\text{s}^2$ ,冲淡水带来强密度层化;在远岸的F4、F5 站, $N^2$ 大于 $10^{-3}/\text{s}^2$ 的强层化区位于 $10\text{—}23\text{m}$ 之间,水部分层主要受混合水的影响;在过渡区域的F2、F3 站,强层化区位于 $20\text{m}$ 水深以浅, $20\text{m}$ 以深 $N^2$ 小于 $10^{-4}/\text{s}^2$ ,混合均匀(图5e)。从 $\varepsilon$ 的垂向分布来看(图5b),F2、F3 站浅层,受潮汐锋的影响 $\varepsilon$ 大于 $10^{-6}\text{W}/\text{kg}$ ;在底层, $\varepsilon$ 大于 $10^{-7}\text{W}/\text{kg}$ 的高值受底摩擦的影响;远岸的F5 站, $\varepsilon$ 在 $22\text{—}28\text{m}$ 的密跃层下缘大于 $10^{-6}\text{W}/\text{kg}$ 。 $K_p$ 的高值区与 $\varepsilon$ 的高值区基本一致(图5h),过渡区域的F2、F3 站, $20\text{m}$ 以深层化弱混合强, $K_p$ 大于 $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ ;在远岸的F5 站,密跃层下缘 $N^2$ 小于 $10^{-3}/\text{s}^2$ ,层化偏弱, $K_p$ 大于 $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ ,混合较强。

W 断面上, W2 站以东受黑潮的影响, 60m 层之上为寡营养盐高盐的黑潮表层水、60m 层之下主要为富营养盐高盐的黑潮次表层水。W1 站的 7—17m 有  $N^2$  大于  $0.32 \times 10^{-2}/s^2$  的强密度层化; W2 站以东, 水体两次分层, 上密跃层位于 10—35m 之间,  $N^2$  大于  $10^{-4}/s^2$ , 主要受热量衰减与风混合的共同作用; 下密跃层位

于 55—85m 之间,  $N^2$  大于  $3.16 \times 10^{-4}m^2/s$ , 主要是黑潮次表层水入侵所导致(图 5f)。在  $\epsilon$  的垂向分布中(图 5c), 中层水体状态稳定,  $\epsilon$  普遍低于  $10^{-8}W/kg$ ,  $\epsilon$  的高值区位于表层、近岸和底层, 最高达到  $10^{-6}W/kg$ 。图 5i 中  $K_p$  的垂向分布表明, 高值区位于近岸、表层和底层, W2 站底层的  $K_p$  大于  $10^{-3}m^2/s$ 。

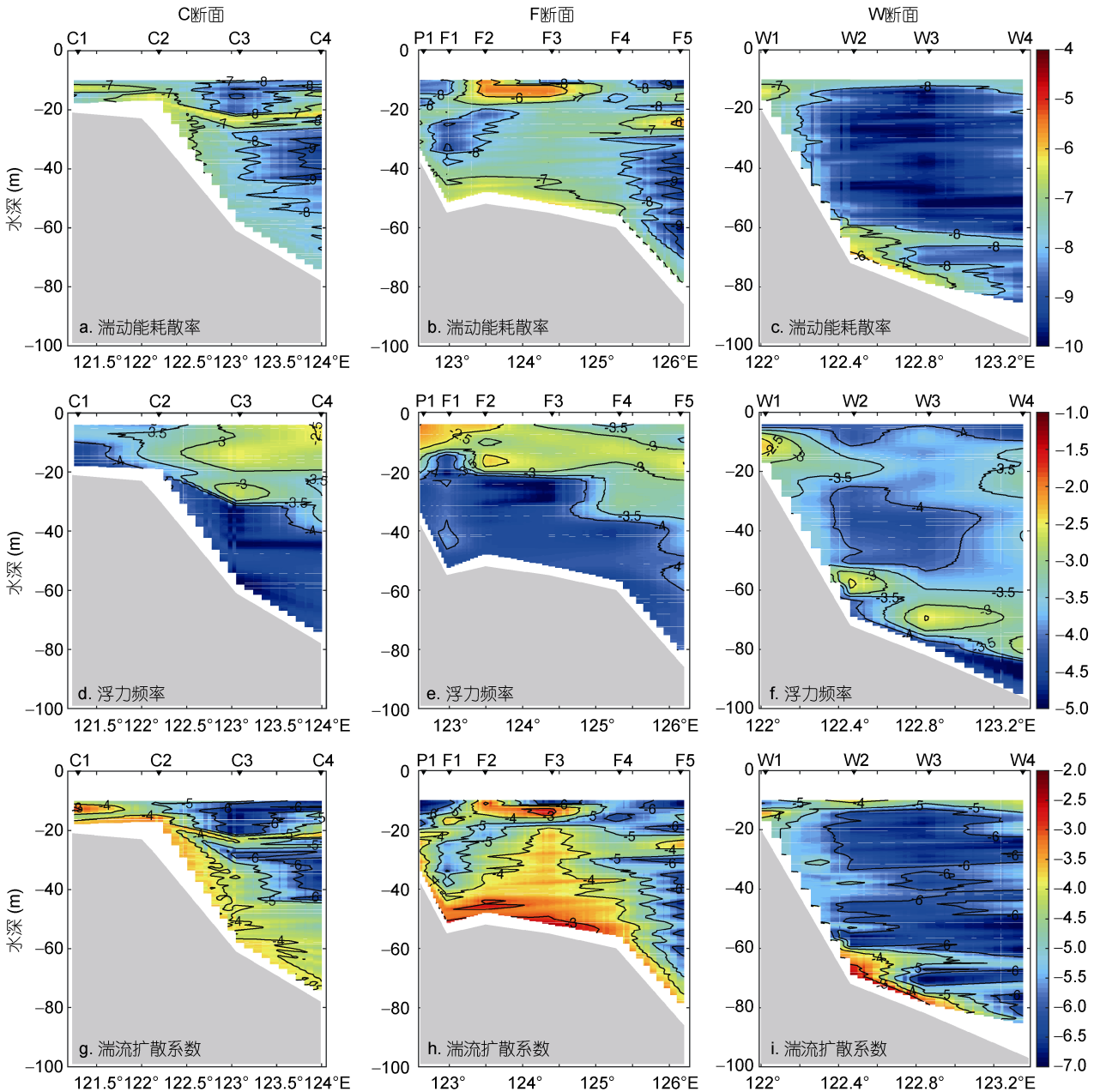


图 5 C、F、W 断面上湍动能耗散率  $\log_{10}\epsilon$  (单位: W/kg)(上)、浮力频率  $\log_{10}N^2$  (单位:  $/s^2$ )(中)和湍流扩散系数  $\log_{10}K_p$  (单位:  $m^2/s$ )(下)的分布

Fig.5 Distributions of turbulent energy dissipation rate  $\log_{10}\epsilon$  (unit: W/kg) (upper), Brunt-Vaisala frequency  $\log_{10}N^2$  (unit:  $/s^2$ ) (Middle) and turbulent diffusivity  $\log_{10}K_p$  (unit:  $m^2/s$ ) along C, F and W sections

**2.2.2 硝酸盐垂向扩散通量** 由公式(2)计算得到 C、F、W 断面上硝酸盐垂向扩散通量  $F_N$ , 结果如图 6。

在 C 断面上,  $F_N$  的高值区主要位于近岸浅水区, 近岸的水体混合程度较强, 硝酸盐的垂向输运量也偏高, C1 站 13—17m 层与 C2 站的 17—20m 层  $F_N$  大于  $1\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。  $F_N$  的高值区与  $K_\rho$  的高值区基本一致, 且与所在海域的强混合有关。

F 断面上水体的垂向交换最为活跃。近岸受冲淡水的影响, 硝酸盐输运方向向下。在潮汐锋影响下的 F2 站浅层,  $F_N$  大于  $5\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  的高值与  $K_\rho$  的高值相一致; F3 站浅层同样存在强  $K_\rho$ , 但浅层硝酸盐浓度

梯度极小,  $F_N$  大于  $5\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  的高值位于 20—30m 之间。远岸的 F4 与 F5 站, 在强湍扩散与较大硝酸盐浓度梯度的共同影响下, F4 站 38m 层  $F_N$  大于  $10\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、F5 站 22—28m 层  $F_N$  大于  $5\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

在 W 断面上, 近岸的 15m 浅层, 受沿岸冲淡水输入的影响,  $F_N$  最大值为  $-5\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ; 近岸外的陆架表层和 中层水体,  $F_N$  在  $-1—1\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  之间, 硝酸盐的垂向交换极弱;  $F_N$  高值区主要位于 W2 站 60—75m 的深层, 沿陆坡可以高达  $15\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ , 受黑潮次表层水的影响, 这一高值区的主要受底层  $K_\rho$  大于  $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$  的强混合的影响。

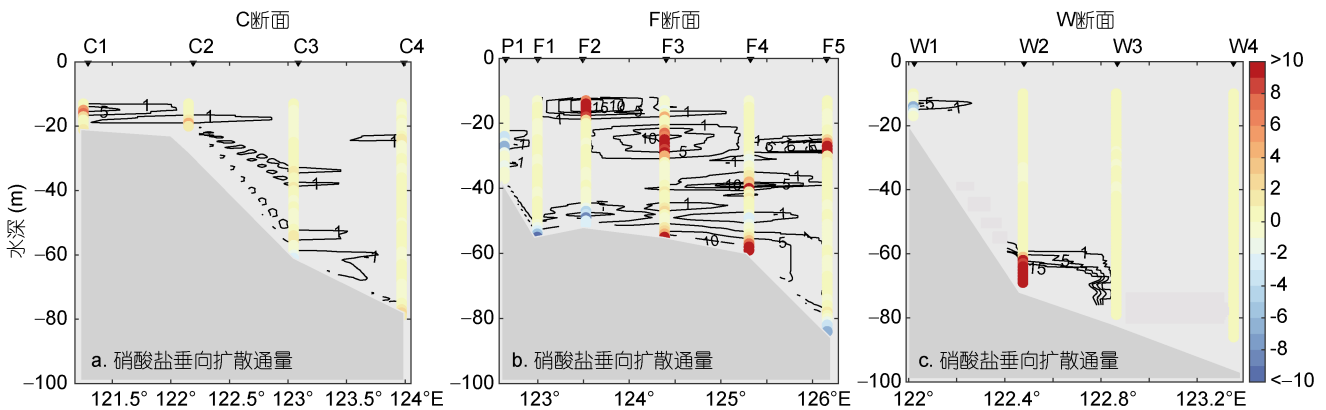


图 6 C、F、W 断面的硝酸盐垂向扩散通量  $F_N$  [ $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ] (等值线为基于插值结果的  $F_N$ )

Fig.6 Vertical turbulent nitrate fluxes [ $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ] in C, F and W sections

硝酸盐垂向扩散通量  $F_N$  的大小受湍扩散系数  $K_\rho$  与硝酸盐浓度梯度的共同影响, 在图 6 中,  $F_N$  的高值区与  $K_\rho$  的高值区基本一致, 这说明夏季黄海海域, 相较于硝酸盐浓度梯度的大小, 湍流混合的强度对  $F_N$  量级的影响更大。

**2.3 跨硝酸盐跃层的垂向扩散通量分布及其带来的新生产力估算**

**2.3.1 跨硝酸盐跃层的垂向扩散通量分布** 在夏季航次的 50 个采样站位中, 黄海沿岸、苏北浅滩与闽浙沿岸的部分站位(如图 7 灰点所示), 由于水深较浅, 潮致湍流混合较强,  $C_N$  垂向混合均匀, 根据硝酸盐跃层定义未出现硝酸盐跃层。存在硝酸盐跃层的观测站位有 35 个, 由公式(3)分别计算了硝酸盐跃层处的浓度梯度, 湍扩散系数  $K_\rho$  的平均值与跨硝酸盐跃层的垂向硝酸盐通量  $F_{ND}$ 。

跨硝酸盐跃层的硝酸盐浓度梯度在长江口附近受冲淡水影响以负值为主, 在沿冲淡水扩展方向的

D2 站, 浓度梯度较高, 达到  $-3.07\text{mmol}/\text{m}^4$ , 存在向下的硝酸盐交换, 表底之间的  $C_N$  差异极大(图 7a)。在黄海, B2 站采样期间受台风扰动的影响,  $C_N$  分布为表层略高于底层, 浓度梯度亦为负值; 黄海中部冷水区的硝酸盐浓度梯度在  $0.79—1.24\text{mmol}/\text{m}^4$  之间, B4、C3 站偏高。在东海陆架, 硝酸盐浓度梯度在  $0.4—0.8\text{mmol}/\text{m}^4$  之间, 高值站位于北部的 F2、F4 站与外海的 E5、F7 站。

整体上, 调查海域的  $F_{ND}$  在  $-9.78—36.60\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  (图 7c), 其大小与跃层处平均湍扩散系数的强弱(图 7b)密切相关。长江口附近的 D2、D3、P1 站与苏北浅滩外侧的 B2 站, 跨跃层硝酸盐输运方向向下, 在 D2 站受较大硝酸盐浓度梯度与强湍流混合的共同影响, 通量高达  $-9.78\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。高于  $3.16 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}^2$  的  $K_\rho$  高值区主要位于东海北部, 在 F2 站受锋面的作用, 跃层所在浅层扩散偏强, 为  $2.69 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}^2$ ,  $F_{ND}$  高达  $20.26\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ; 在东海的 W2 站, 黑潮次表层水与



黑潮表层水的交界在 50—66m 之间存在硝酸盐跃层, 跃层所在位置受底摩擦的影响, 平均湍扩散系数高达  $1.02 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}^2$ , 所带来的  $F_{\text{ND}}$  为  $36.60 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ; 此外, 黄海中部 A4 站, 跃层处平均湍扩散系数也偏高, 为  $3.63 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}^2$ ,  $F_{\text{ND}}$  为  $4.02 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

2.3.2 不同水团处  $F_{\text{ND}}$  及其所带来的新生产力 同一水团具有相对均匀的理化特征, 温度、盐度与硝酸

盐浓度的分布也表现出相对的一致性。夏季, 影响黄东海海域硝酸盐分布的主要水团包括黄海冷水团、长江冲淡水、东海北部底层混合水与黑潮次表层水。本文选取各水团覆盖的观测站位, 对四个主要水团处硝酸盐跃层范围及厚度,  $F_{\text{ND}}$  及由湍流扩散产生的跨硝酸盐跃层通量对上层海洋新生产力变化的估算, 结果如表 1 所示。

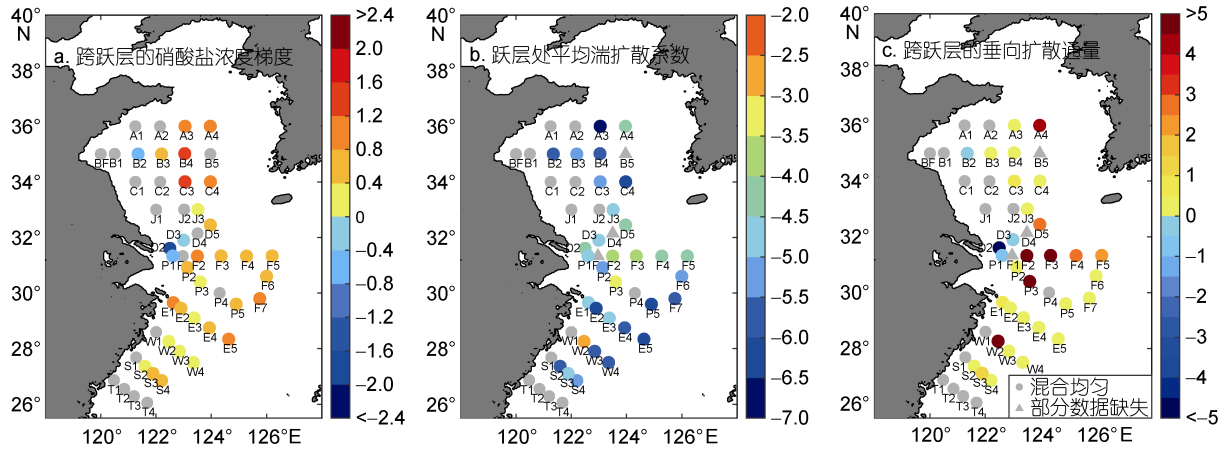


图 7 黄东海跨硝酸盐跃层的硝酸盐浓度梯度(a, 单位:  $\text{mmol}/\text{m}^4$ )、平均湍流扩散系数(b, 单位:  $\text{m}^2/\text{s}$ )与跨硝酸盐跃层的垂向扩散通量  $F_{\text{ND}}$  [c, 单位:  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ] 分布  
 Fig.7 Distributions of nitrate gradient(a, unit:  $\text{mmol}/\text{m}^4$ ), average turbulent diffusivity(b, unit:  $\text{m}^2/\text{s}$ ) and  $F_{\text{ND}}$  [c, unit:  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ] in the YS and the ECS  
 注: 黄海和东海陆架取跨硝酸盐跃层, 长江口取 10m 层至硝酸盐跃层底部, 灰色三角形代表站位跃层所在位置缺少 VMP 数据

表 1 四个主要水团的  $F_{\text{ND}}$  及其带来的新生产力  
 Tab.1  $F_{\text{ND}}$  and its related new production in four main water masses

水团	黄海冷水团	长江冲淡水	东海北部底层混合水	黑潮次表层水
站位	A3、A4、B3、B4、C3、C4	D2、D3、P1	F3、F4、F5、F6	F7、S2、S3、S4、W2、W3、W4、E 断面、P2、P3、P5
硝酸盐跃层的位置范围与平均厚度(m)	29—45/6.83	4—22/17	17—37/14.25	4—76/12.4
$F_{\text{ND}}$ 范围[ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]	0.02—2.90	-9.78—0.02	0.43—8.37	0.02—36.60
$F_{\text{ND}}$ 平均值与标准差 [mmol/( $\text{m}^2 \cdot \text{d}$ )]	0.75±1.11	-1.95±1.86	4.12±3.19	2.98±9.08
平均新生产力[ $\text{mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]	59.63	--	327.54	236.91

由表 1 可知, 东海北部底层混合水区,  $F_{\text{ND}}$  为  $4.12 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 湍流扩散所带来的硝酸盐跨跃层输运量明显高于黄海冷水团与黑潮次表层水区。在黑潮次表层水影响的区域,  $F_{\text{ND}}$  的标准差高达  $\pm 9.08$ , 高低值之间相差 3 个量级, 在图 7c 中, 黑潮次表层水影响区域的计算结果表明, 大部分站位的  $F_{\text{ND}}$  在  $0—0.5 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  之间, 仅在 E1、W2、P3 站存在大于  $0.5 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  的高值。高值区出现的原因与硝酸盐跃层的位置有关, 在近岸的 E1 站, 跃层位于

4—19m 之间, 受到表层风强迫的影响湍流偏强,  $F_{\text{ND}}$  偏高; 而在 W2 与 P3 站, 跃层位置明显偏深, 在底摩擦的作用下  $F_{\text{ND}}$  也较高。在该海域的其他站位, 硝酸盐跃层所在的陆架中部水体, 湍流混合极弱,  $F_{\text{ND}}$  表现为低于  $0.5 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。考虑到黑潮次表层水影响海域标准差过大, 基于所有站位的平均值明显偏高, 跨硝酸盐跃层垂向通量总体偏小。

图 8 比较了不同水团处的硝酸盐跃层所在位置, 密度层化的强弱, 垂向水体  $K_p$  的大小, 以及叶绿素

浓度水平。硝酸盐跃层所在的中层水体, 东海北部底层混合水 NECSBMW 的  $K_p$  明显大于黄海冷水团与黑潮次表层水,  $F_{ND}$  的平均值也高达  $4.12\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ , 该海域湍流扩散导致的跨硝酸盐跃层的垂向输运为上层海洋补充了大量营养盐, 叶绿素的次表层高值区(Secondary Chl *a* Maximum, SCM)出现在硝酸盐跃层上部的 17—35m 水深之间, 对应硝酸盐跃层的上部, 平均叶绿素浓度的高值大于  $3\text{mg}/\text{m}^3$ 。在东海北部底层混合水区, 湍流扩散所带来的硝酸盐跨跃层输运对于跃层之上浮游植物的生长十分重要。

黄海冷水团区 YSCWM 与黑潮次表层水区 KSSW,  $K_p$  的高值区均位于 10m 附近的浅层、和受底摩擦影响的深层。在黄海冷水团区,  $K_p$  的高值区与硝酸盐跃层位置不重合, 因此平均  $F_{ND}$  偏低, SCM 位于密跃层与硝酸盐跃层之间, 平均叶绿素浓度的高值约为  $2\text{mg}/\text{m}^3$ 。在黑潮次表层水区, 中层水体的  $N^2$  整体较高, 层化偏强, 混合极弱,  $K_p$  普遍小于  $10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 。硝酸盐跃层的位置差别较大, 跃层浅的 E1 站与跃层较深的 W2 站、P3 站对应表底的强混合区,  $F_{ND}$  也较高, 其余站位的  $F_{ND}$  普遍偏低, 平均叶绿素浓度的高值为  $1.5\text{mg}/\text{m}^3$ 。

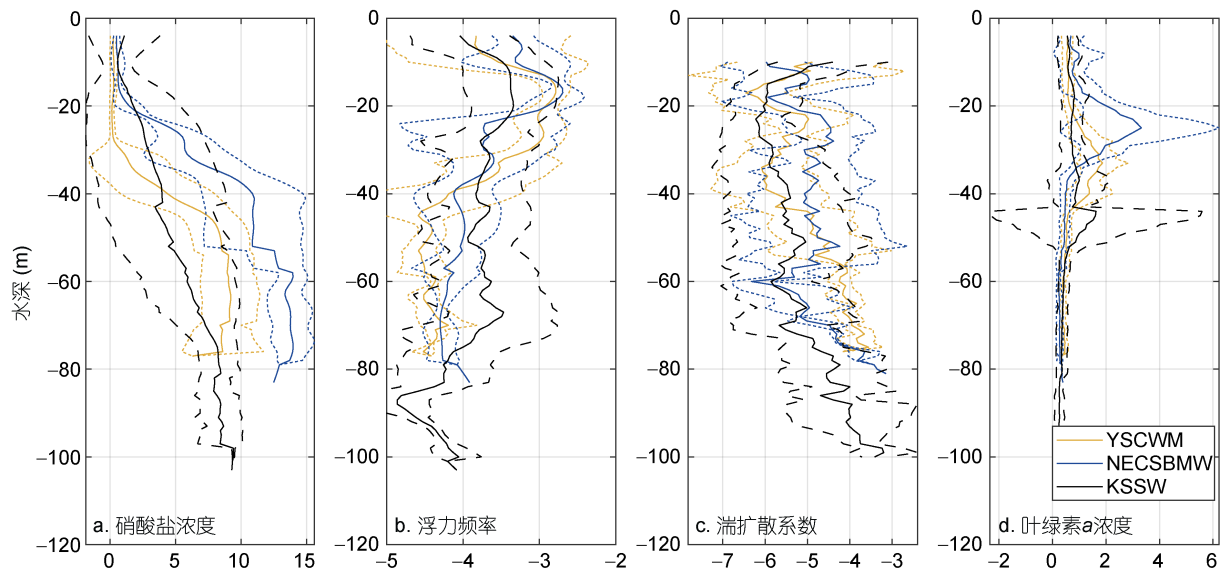


图 8 夏季黄海冷水团、东海北部底层混合水与黑潮次表层水影响区域硝酸盐浓度(a, 单位:  $\mu\text{mol}/\text{L}$ )、浮力频率(b, 单位:  $1/\text{s}^2$ )、湍流扩散系数(c, 单位:  $\text{m}^2/\text{s}$ )与叶绿素 *a* 浓度(d, 单位:  $\text{mg}/\text{m}^3$ )的垂向平均剖面(两种虚线均为标准差)

Fig.8 Averagely vertical profile of nitrate concentration (a, unit:  $\mu\text{mol}/\text{L}$ ), Brunt-Väisälä frequency (b, unit:  $1/\text{s}^2$ ), turbulent diffusivity(c, unit:  $\text{m}^2/\text{s}$ ) and chlorophyll *a* (d, unit:  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) in the YSCWM, NECSBMW and KSSW in summer. (The dotted line represents standard deviation)

### 3 结论

本研究基于 2018 年夏季黄、东海现场调查数据, 讨论了黄、东海海域温度、盐度、硝酸盐的水平分布和垂向分布特征, 发现营养盐含量丰富的黄海冷水团、长江冲淡水、东海北部底层混合水与黑潮次表层水是影响黄、东海硝酸盐分布的主要水团。计算了研究海域中 C、F、W 断面上硝酸盐垂向扩散通量  $F_N$ ,  $F_N$  的高值区与湍流扩散系数的高值区的位置基本一致, 湍流的强度是垂向硝酸盐通量量级的主要影响因素。

基于湍流扩散, 跨硝酸盐跃层的垂向扩散通量  $F_{ND}$  的范围在  $-9.78—36.60\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  之间。针对研究海域主要水团, 选择各水团内理化特征相对均

一的位置, 计算了跨硝酸盐跃层的平均硝酸盐垂向扩散通量  $F_{ND}$ 。夏季长江口向下的输运量平均为  $-1.95\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ; 在黄海冷水团区域, 平均  $F_{ND}$  为  $0.75\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ , 所带来的新生产力估算为  $59.63\text{mg C}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ; 在东海北部底层混合水区, 平均  $F_{ND}$  为  $4.12\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ , 所带来的新生产力估算为  $327.54\text{mg C}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ , 湍流扩散带来的硝酸盐跨跃层输运促进了跃层之上浮游植物的生长; 在黑潮次表层水区, 水深的变化范围大, 硝酸盐跃层的范围在 4—76m 之间, 受表层风强迫和底层底摩擦的影响混合较强的 E1 站、W2 站与 P3 站,  $F_{ND}$  明显偏高, 而在黑潮次表层水区的其他站点, 跃层所在的中层水体混合偏弱,  $F_{ND}$  整体偏小在  $0—0.5\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  之间。

致谢 中国海洋大学的辛宇教授、钟晓松同学提供了硝酸盐浓度的实验室测定数据作为 SUNA-V2 的对比资料,“东方红 2 号”调查船全体人员为调查工作提供了大量帮助和支持,谨致谢忱。

### 参 考 文 献

- 王保栋, 1999. 南黄海营养盐的垂直分布特性及其垂向输运规律. *海洋环境科学*, 18(1): 13—18
- 王保栋, 2000. 黄海冷水域生源要素的变化特征及相互关系. *海洋学报*, 22(6): 47—54
- 王保栋, 2003. 黄海和东海营养盐分布及其对浮游植物的限制. *应用生态学报*, 14(7): 1122—1126
- 王保栋, 战 闰, 藏家业, 2002. 长江口及其邻近海域营养盐的分布特征和输送途径. *海洋学报*, 24(1): 53—58
- 王俊杰, 于志刚, 韦钦胜等, 2018. 2017 年春、夏季南黄海西部营养盐的分布特征及其与浒苔暴发的关系. *海洋与湖沼*, 49(5): 1045—1053
- 左九龙, 2018. 黑潮向东海营养物质输送及其控制因素解析. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所)博士学位论文, 93—96
- 叶 然, 刘艳云, 崔永平等, 2015. 东海营养盐结构的时空分布及其对浮游植物的限制. *海洋与湖沼*, 46(2): 311—320
- 朱建荣, 丁平兴, 胡敦欣, 2003. 2000 年 8 月长江口外海区冲淡水羽状锋的观测. *海洋与湖沼*, 34(3): 249—255
- 米铁柱, 姚庆祯, 孟 佳等, 2012. 2011 年春、夏季黄海、东海营养盐分布特征研究. *海洋与湖沼*, 43(3): 678—688
- 许灵静, 2019. 长江口及其邻近海域黑潮次表层水的入侵机制及其生态效应. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所)博士学位论文, 4—6
- 孙湘平, 2008. 中国近海区域海洋. 北京: 海洋出版社, 286
- 苏育嵩, 李凤岐, 马鹤来等, 1989. 东海北部区域底层冷水团的形成及其季节变化. *青岛海洋大学学报*, 19(1): 1—14
- 沈国英, 黄凌风, 郭 丰等, 2010. 海洋生态学. 3 版. 北京: 科学出版社, 188—189
- 宋金明, 袁华茂, 2017. 黑潮与邻近东海生源要素的交换及其生态环境效应. *海洋与湖沼*, 48(6): 1169—1177
- 周 锋, 黄大吉, 万瑞景等, 2008. 南黄海西北部夏季潮锋的观测和分析. *海洋学报*, 30(3): 9—15
- 郝 镞, 2010. 中国近海叶绿素和初级生产力的时空分布特征和环境调控机制研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 73—74
- 郭东杰, 张 芳, 王朋鹏等, 2019. 2019 年 5 月黄海及东海北部大型水母分布特征. *海洋与湖沼*, 50(6): 1292—1301
- 程雪丽, 孙 群, 王玉衡等, 2017. 苏北浅滩外侧潮汐锋的季节变化及结构分析. *海洋科学*, 41(12): 1—8
- 魏 皓, 王 磊, 林以安等, 2002. 黄海中部营养盐的跃层层运输. *海洋科学进展*, 20(3): 15—20
- Bourgault D, Hamel C, Cyr F *et al*, 2011. Turbulent nitrate fluxes in the Amundsen Gulf during ice-covered conditions. *Geophysical Research Letters*, 38(15): L15602
- Chen C T A, Wang S L, 1999. Carbon, alkalinity and nutrient budgets on the East China Sea continental shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C9): 20675—20686
- Doubell M J, Spencer D, Van Ruth P D *et al*, 2018. Observations of vertical turbulent nitrate flux during summer in the Great Australian Bight. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 157—158: 27—35
- Gregg M C, 1999. Uncertainties and limitations in measuring  $\epsilon$  and  $\chi_T$ . *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(11): 1483—1490
- Hales B, Hebert D, Marra J, 2009. Turbulent supply of nutrients to phytoplankton at the New England shelf break front. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C5): C05010
- Kaneko H, Yasuda I, Komatsu K *et al*, 2013. Observations of vertical turbulent nitrate flux across the Kuroshio. *Geophysical Research Letters*, 40(12): 3123—3127
- Liu X, Furuya K, Shiozaki T *et al*, 2013. Variability in nitrogen sources for new production in the vicinity of the shelf edge of the East China Sea in summer. *Continental Shelf Research*, 61—62: 23—30
- Martin P A, Lucas I M, Painter S C *et al*, 2010. The supply of nutrients due to vertical turbulent mixing: A study at the Porcupine Abyssal Plain study site in the northeast Atlantic. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57(15): 1293—1302
- Moum J N, Gregg M C, Lien R C *et al*, 1995. Comparison of turbulence kinetic energy dissipation rate estimates from two ocean microstructure profilers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 12(2): 346—366
- Osborn T R, 1980. Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements. *Journal of Physical Oceanography*, 10(1): 83—89
- Randelhoff A, Ilker F, Arild S *et al*, 2016. Vertical fluxes of nitrate in the seasonal nitracline of the Atlantic sector of the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(7): 5282—5295
- Schafstall J, Dengler M, Brandt P *et al*, 2010. Tidal - induced mixing and diapycnal nutrient fluxes in the Mauritanian upwelling region. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C10): C10014
- Su J L, 1998. Circulation dynamics of the China Seas North 18°N. In: Robinson A R, Brink K H eds. *The Sea*. New York: John Wiley, 11: 483—505
- Tanaka T, Hasegawa D, Yasuda I *et al*, 2019. Enhanced vertical turbulent nitrate flux in the Kuroshio across the Izu Ridge. *Journal of Oceanography*, 75(2): 195—203
- Tyrrell T, 1999. The relative influences of nitrogen and phosphorus on oceanic primary production. *Nature*, 400(6744): 525—531
- Wang W T, Yu Z M, Song X X *et al*, 2016. The effect of Kuroshio Current on nitrate dynamics in the southern East China Sea revealed by nitrate isotopic composition. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(9): 7073—7087
- Wei Q S, Yu Z G, Wang B D *et al*, 2016. Coupling of the spatial-temporal distributions of nutrients and physical conditions in the southern Yellow Sea. *Journal of Marine Systems*, 156: 30—45
- Williams R G, McLaren A J, Follows M J, 2000. Estimating the convective supply of nitrate and implied variability in export production over the North Atlantic. *Global Biogeochemical*

- Cycles, 14(4): 1299—1313
- Zhang J, Su J L, 2006. Nutrient dynamics of the China Seas: The Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and South China Sea. In: *The Sea*. Cambridge: Harvard University Press, 637—671
- Zhang J, Liu S M, Re J L *et al*, 2007. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf. *Progress in Oceanography*, 74(4): 449—478

## SUMMER VERTICAL TURBULENT NITRATE FLUX IN THE YELLOW SEA AND THE EAST CHINA SEA

LYU Wen-Jin<sup>1</sup>, SUN Qun<sup>1</sup>, WANG Si-Jia<sup>1</sup>, LI Bo-Zhi<sup>2</sup>

(1. *College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;*  
2. *Qingdao NORTEK measuring equipment co. LTD, Qingdao 266071, China*)

**Abstract** Nitrate vertical transport caused by turbulent diffusion has an important effect on phytoplankton growth and primary productivity of the upper ocean. Based on the synchronously in-situ observation data of hydrologic feature, nitrate concentration, and the turbulent dissipation rate in summer 2018 in the Yellow Sea (YS) and the East China Sea (ECS), the distributions of temperature, salinity, and nitrate concentration were analyzed. Results show that the main water masses affecting the distribution were eutrophic Yellow Sea Cold Water Mass (YSCWM), the Changjiang Diluted Water (CDW), the Northern East China Sea Bottom Mixed Water (NECSBMW) and the Kuroshio Sub-Surface Water (KSSW). The vertical nitrate fluxes in three selected sections were calculated by using the vertical turbulent diffusion formula; the positions of large fluxes were consistent largely with the large turbulence diffusivity. In the presence of nitracline, the vertical turbulent nitrate flux ( $F_{ND}$ ) across the nitracline ranged from  $-9.78$  to  $36.60\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ . In the area influenced by YSCWM, the summer thermocline restricted the vertical turbulent diffusion of nutrients to the surface layer. In the NECSBMW area, the vertical turbulent diffusion supplied a large amount of nitrate to the upper layer and promoted the growth of phytoplankton. In the KSSW area, the mixing of middle-layer water was weak, and the  $F_{ND}$  was low. The calculation and analysis of the summer vertical turbulent nitrate flux is of great significance to further clarify the transport mechanism of nutrients.

**Key words** nitrate; turbulence diffusivity; vertical turbulent nitrate flux; new production; the Yellow Sea and the East China Sea