

东海黑潮及其上游硝酸盐输送年际变化的模拟研究

林志坚^{1,2}, 王晓春², 吴琮²

(1. 江西省农业气象中心, 江西 南昌 330046; 2. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 利用一个太平洋区域分辨率为 12.5 km 的 ROMS-CoSiNE 海洋物理-生态耦合模式 1997—2016 年的积分结果, 对东海黑潮硝酸盐输送的年际变化进行分析。结果显示: 东海黑潮的硝酸盐输送存在约 3 a 与 7 a 的年际变化周期, 且在 100~400 m 深的次表层与 400~800 m 深的中层水中变化较为显著。东海黑潮上游海水中, 南海水及直接汇入东海黑潮的西太平洋海水对黑潮硝酸盐的年际输送变化具有重要影响。其中, 南海水主要影响东海黑潮中层水的硝酸盐输送, 而西太平洋海水对东海黑潮次表层水硝酸盐的输送影响较为显著。

关键词: 东海; 黑潮; 硝酸盐输送; 年际变化

中图分类号: P731.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)02-0060-13

1 引言

黑潮是世界著名的西边界强流^[1-2], 其携带的营养盐是东海营养盐的主要来源之一^[3-6]。研究表明, 黑潮营养盐的输送具有明显的季节变化与年际变化, 且年际变化更为显著^[3]。但对于不同层次黑潮营养盐输送的年际变化研究还较为缺乏。根据不同深度东海黑潮水特性, 可将其分为 100 m 之上的表层水, 100~400 m 的次表层水, 400~800 m 的中层水以及 800 m 以下的深层水^[7-8]。其中, 输入东海陆架的营养盐集中于次表层与中层^[8]。不同层次东海黑潮营养盐的输送量与各层海水的来源有关, 特别是黑潮中层水, 其来源包括南海中层水, 东菲律宾海中层水以及北太平洋中层水等富含营养盐的海水^[9], 它们都能为东海黑潮提供大量营养盐^[3, 10-11], 进而影响东海内部的营养盐分布。

Guo 等^[3]的研究指出, 来自南海, 北太平洋副热带以及北太平洋高纬区域的中层水都可能引起东海黑潮营养盐输送的年际变化。但 Chen^[12]的研究

发现, 输入东海黑潮中层水的营养盐主要源于经吕宋海峡后汇入黑潮的南海中层水。Mensah 等^[11]则指出, 东海黑潮中层水主要源于北太平洋中层水, 而南海中层水并不能持续向黑潮输送。因此目前关于黑潮来源海水对东海黑潮营养盐输送的影响仍不是很清楚。此外, 源于赤道南北两侧 20°~25°之间向西输送的东太平洋水也是东海黑潮次表层水的主要来源之一^[7, 13]。在地形效应、风场及涡旋等动力因素影响下, 东海黑潮中层水也会随上升流到达次表层, 形成黑潮入侵东海的主体^[14-15]。因此东海黑潮次表层营养盐通量变化也是本研究关注重点。由于目前缺乏东海黑潮及其上游营养盐输送的观测资料, 无法直接利用其了解年际尺度上不同来源海水对东海黑潮各层次营养盐输送的影响, 所以本文将通过海洋-生态耦合模式的长期积分探究上述问题。此外, 黑潮水中硝酸盐与其它营养盐的比例较为稳定^[3], 所以本文以硝酸盐为例, 研究东海黑潮营养盐输送的年际变化特征。

收稿日期: 2019-03-13; 修回日期: 2019-07-15。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1401600); 国家海洋公益性行业科研专项(201505003-05); 国家 2015 年江苏双创团队项目。

作者简介: 林志坚(1993-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事数值模拟工作。E-mail: 20161217314@nuist.edu.cn

通讯作者: 王晓春(1966-), 男, 教授, 博士, 主要从事大尺度海气相互作用、海洋模式研发及应用。E-mail: xcwang@nuist.edu.cn

2 模式设置与验证

2.1 模式设置

本文采用的海洋物理-生态耦合模式包含物理模块与生态模块。其物理模块基于区域海洋模式系统 (Regional Ocean Modeling System, ROMS)^[16]。生态部分基于 Chai 等^[17]建立的 Carbon, Silicate,

Nitrogen Ecosystem (CoSiNE)模式,其包含4种营养盐(硝酸盐,磷酸盐,硅酸盐以及氨盐),两种浮游植物(小型浮游植物与硅藻),两种浮游动物(微型浮游动物与中型浮游动物),两种碎屑物质(碎屑氮与碎屑硅),总二氧化碳以及总碱度等生态变量。目前,该耦合模式已被应用于多个区域的海洋生态研究^[18-19]。

本文所采用的ROMS-CoSiNE建立在太平洋区域($99^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{W}$, $45^{\circ}\text{S}\sim 65^{\circ}\text{N}$),水平分辨率为12.5 km (见图1),垂直方向采用随底坐标,共30层^[20]。模式

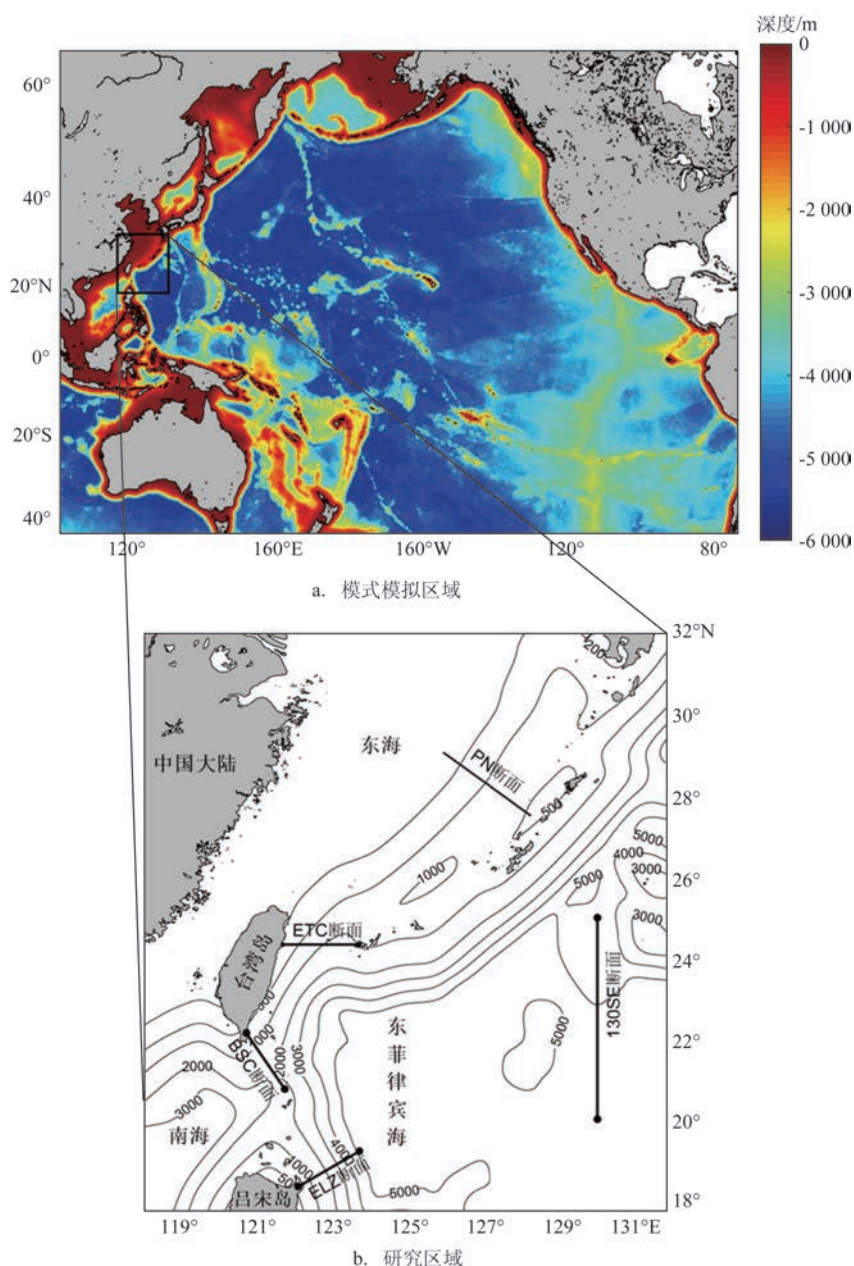


图1 模式模拟区域和研究区域(PN断面:东海黑潮输送典型断面,本文中用于评估模式模拟结果;ETC:东台湾通道断面,表征东海黑潮输送;BSC:巴士海峡断面;ELZ:吕宋岛东部断面;130SE:130°E断面)

边界场与初始场的温度,盐度以及营养盐等数据来源于WOA 2005(World Ocean Atlas 2005)数据集。气候态驱动场来源于CODAS(Common Oceanographic Data Access System,海洋数据分级处理系统)资料。模式积分10 a达到稳定后,再利用逐日的NCEP(National Centers for Environmental Prediction,美国国家环境预报中心)再分析资料作为强迫场积分^[21],最终得到1997年1月—2016年12月的月平均输出结果进行分析。

2.2 模拟验证

为检验模式对东海黑潮水文特征及营养盐输送的模拟能力,本文选取日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)1997—2009年PN断面(见图1b)的观测资料对模拟结果进行评估。图2对比了PN断面多年平均流速,硝酸盐浓度及硝酸盐通量,其中硝酸盐通量为流速与浓度的乘积。如图所示,模式可基本反映东海黑潮表层流速大并随水深减小;硝酸盐浓度随水深不断增加;最大硝酸盐通

量出现在断面中部约350 m深度等特征。但模式模拟的东海黑潮流速与硝酸盐通量大值区相比观测结果向岸一侧偏离,可能造成东海黑潮向岸的输送量偏大。对垂直于断面的流速与硝酸盐通量进行面积分得到总流量与硝酸盐总输送量。如图3所示,模式1997—2009年通过PN断面的总流量与硝酸盐总输送量的多年平均结果与观测数据接近,特别在2003年后,二者的变化基本一致。因此模式能够较好再现东海黑潮水文特征与硝酸盐输送的年际变化。

3 结果

3.1 东海黑潮硝酸盐输送及其来源分析

台湾东部海域是东海黑潮的源头,因此本文选取东台湾通道断面(East Taiwan Channel, ETC)作为东海黑潮流量及硝酸盐输送的典型断面^[22]。此外,由于深层水对东海黑潮营养盐输送贡献较弱^[8],所

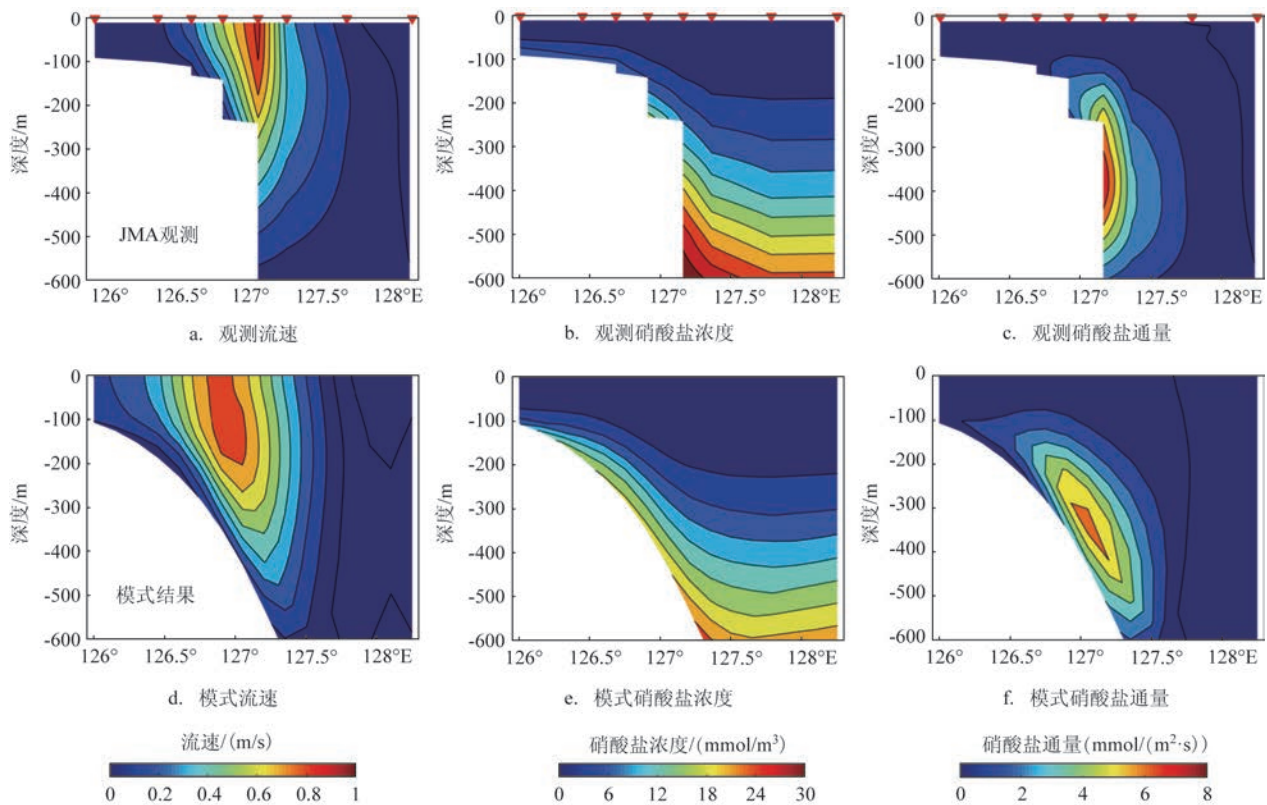


图2 1997—2009年PN断面水文特征和营养盐输送的JMA观测资料和模式结果分布(硝酸盐通量为流速乘以硝酸盐浓度,JMA流速则根据实测温度与盐度计算得到)

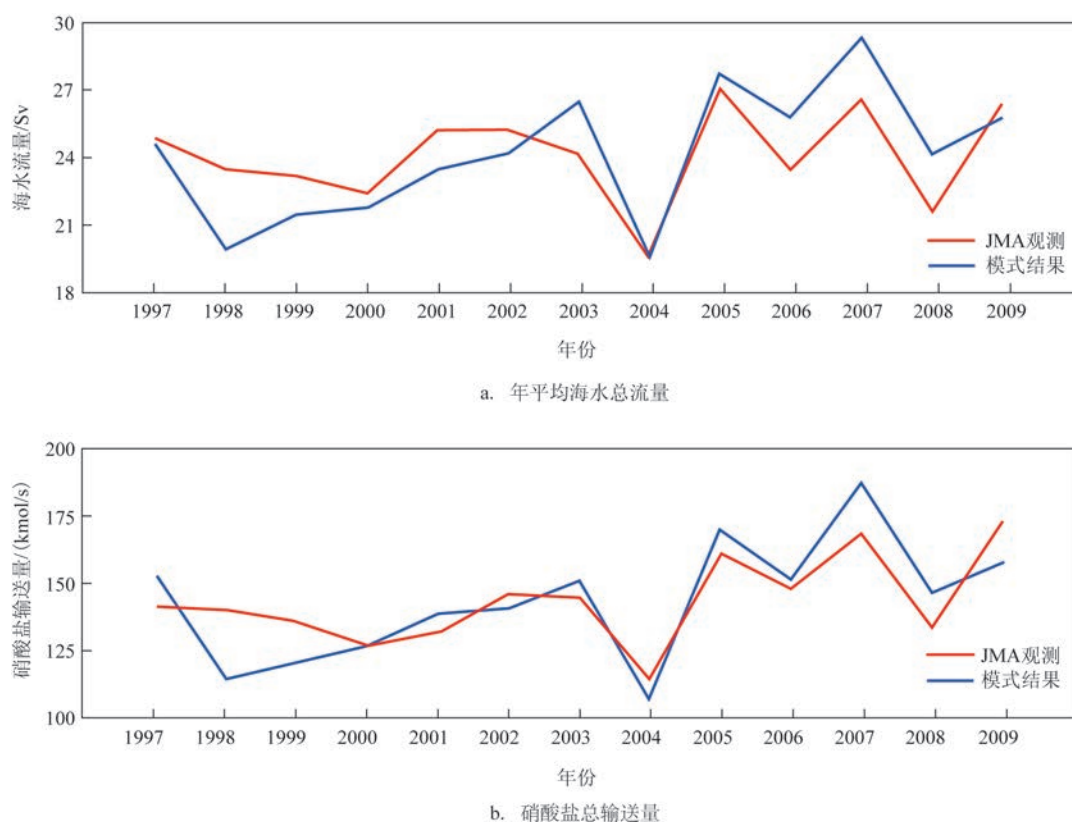


图3 1997—2009年JMA观测与模式模拟通过PN断面的年平均海水总流量与硝酸盐总输送量

以本文着重分析800 m以上硝酸盐输送变化。为了解东海黑潮硝酸盐的来源,图4展示台湾东部及其上游海域800 m以上硝酸盐及海水输送分布,由图可知,二者的输送路径(见图4a、4b)基本一致。在ETC上游,主要有来自东西两个方向的海水为其提供营养盐。在ETC西南侧是来自巴士海峡的海水,追溯其上游可以发现其混合了南海水和热带黑潮水。而热带黑潮水包含由低纬度自南向北和由东向西而来的太平洋水,它们先在东菲律宾海汇合,经吕宋海峡与南海水混合后,再经巴士海峡到达ETC^[23-24]。在ETC东侧,是直接汇入东海黑潮的太平洋水^[7],其可能包含由副热带环流输送而来的高纬度北太平洋水与低纬度东太平洋水^[3, 25]。

为量化东海黑潮上游的硝酸盐输送,取吕宋岛东部断面(East Luzon Section, ELZ),巴士海峡断面(Bashi Channel Section, BSC)及130°E断面(130°E Section, 130SE)作为东海黑潮上游典型断面,并计算上述各断面0~800 m的海水流量及硝酸盐总输送量。其中,通过ELZ的海水是热带黑潮主体部

分^[23]; BSC是黑潮入侵南海后流向东海的典型断面^[23],其海水在ELZ的基础上增加了南海水^[26]; 130SE是西太平洋黑潮次表层水源区直接向东海黑潮输送的典型断面^[25]。如图4c所示,800 m之上,东海黑潮流量与硝酸盐总输送量分别达到23.72 Sv与157.43 kmol/s。通过ELZ的流量与硝酸盐总输送量则分别为20.75 Sv与140.59 kmol/s,其值略小于通过ETC的流量与硝酸盐总输送量。通过BSC的流量及硝酸盐总输送量分别为17.32 Sv与112.69 kmol/s,该量值小于通过ETC与ELZ的对应输送量。而通过130SE的流量与硝酸盐总输送量分别为15.79 Sv, 150.69 kmol/s,其值与ETC接近。

为进一步显示不同来源海水对东海黑潮硝酸盐输送的影响,利用上游各断面硝酸盐总输送量的月平均时间序列同ETC上各点硝酸盐通量作相关分析。由于黑潮的流速大约为3~10 km/h^[27],因此BSC与ELZ的硝酸盐输送量可与ETC硝酸盐通量做同期相关。对于130SE,前人研究表明需要60~90 d左右将海水输送至台湾东部^[15],但经计算得知

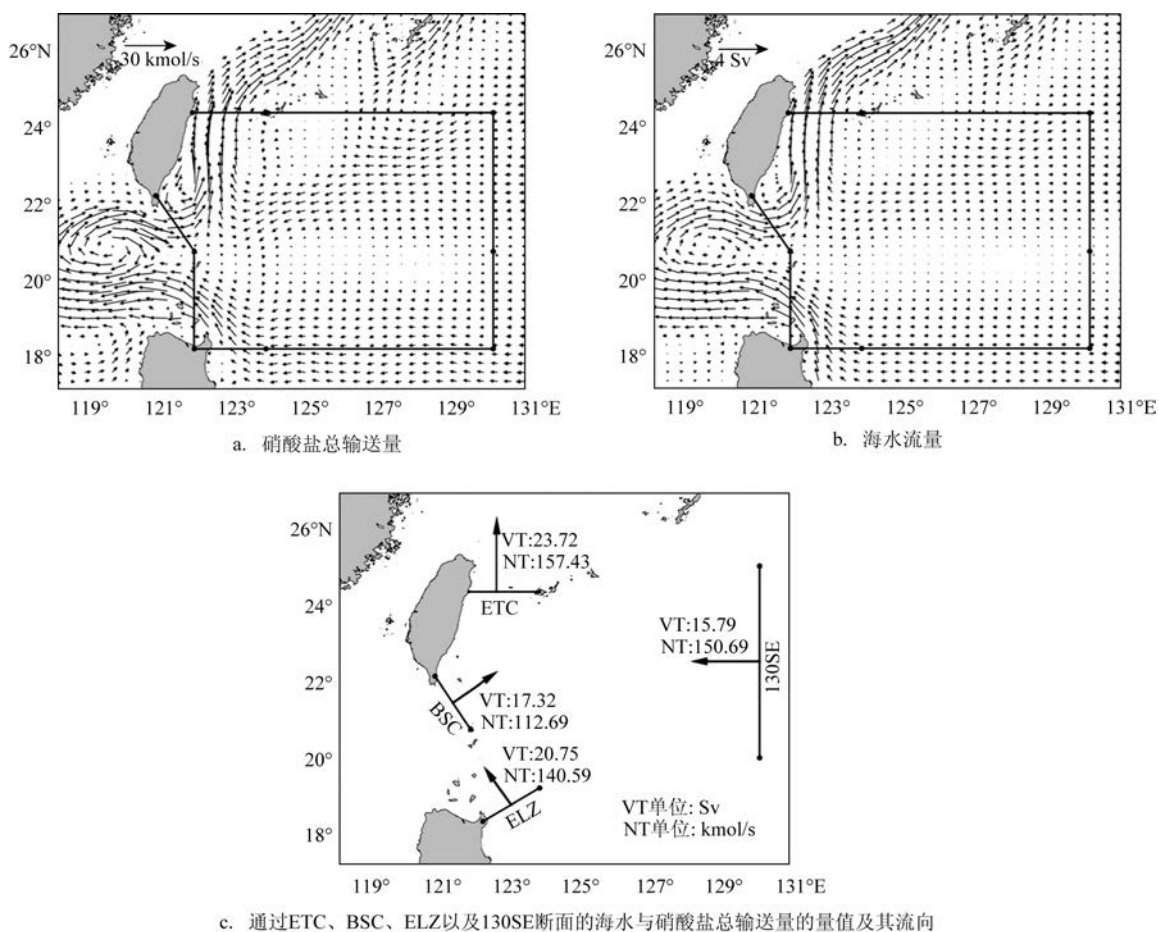


图4 东海黑潮及其上游海域0~800 m海水流量及硝酸盐总输送量

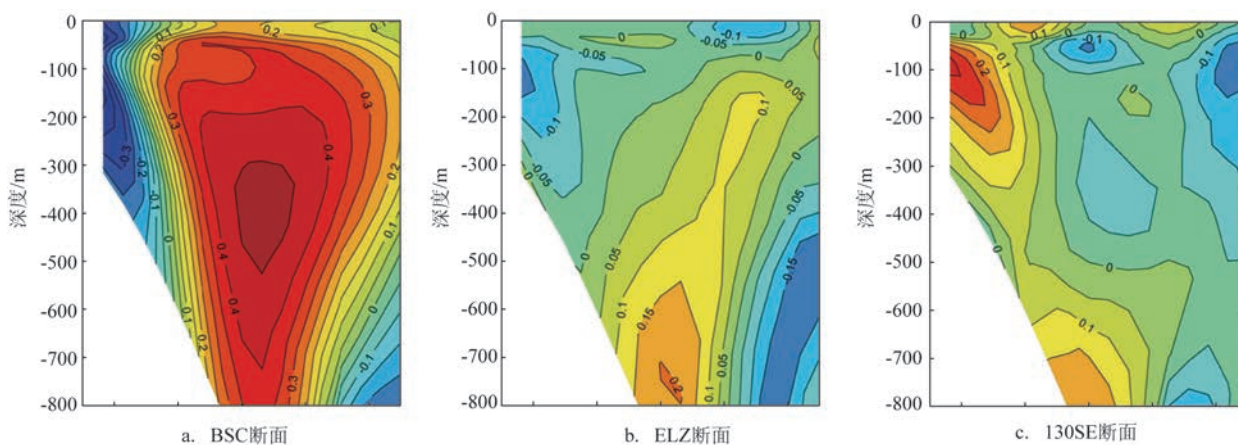


图5 ETC上硝酸盐通量与通过不同断面的硝酸盐总输送量的相关系数分布

通过130SE与ETC的硝酸盐输送量的相关系数在超前0~3个月之间的差别不大(未显示),因此本文将直接采用同期相关进行分析。如图5a所示,在

ETC上,其硝酸盐通量同通过BSC的硝酸盐输送主要呈正相关,但在断面西侧近岸部分呈明显负相关。此外,最大正相关出现在断面中部400 m水深,

说明来自BSC的硝酸盐可能对东海黑潮次表层与中层水的硝酸盐通量具有重要作用。不同于BSC, ELZ与ETC硝酸盐通量的相关性在次表层中明显减弱,说明热带黑潮水对东海黑潮次表层水的硝酸盐输送影响不大,同时也从侧面说明南海水对东海黑潮次表层水的硝酸盐输送具有更为重要影响。对于130SE,其与ETC上硝酸盐通量的正相关出现在断面西侧次表层及断面中部700 m以下的水中,该结果说明直接汇入东海黑潮的西太平洋水也可能对东海黑潮次表层与中层水的硝酸盐输送具有重要影响。

图6展示1997—2016年ETC及其上游各断面的平均硝酸盐通量分布。如图所示,ETC、BSC以及ELZ的最大硝酸盐通量都出现在200~400 m之间,而130SE的最大值出现在600~800 m之间,该结果证实东海黑潮及其上游硝酸盐输送集中于次表层与中层水。此外,图6a显示,ETC西侧的硝酸盐输送大于东侧,最大通量约 $5.5 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,该结果与Chen等^[22]的结果相近($4.2 \sim 7.9 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

结合图5可知,来自南海次表层或中层水可能对东海黑潮硝酸盐大值区具有重要影响。对于上游各断面,BSC(见图6b)和ELZ(见图6c)的通量分布与ETC类似。而130SE的海水层化明显,且断面北部(21.5°N 以北)次表层及中层的硝酸盐通量大于其南部(21.5°N 以南)。因此,130SE北部的硝酸盐通量变化可能对东海黑潮的影响可能更大。

3.2 东海黑潮及其上游硝酸盐输送的年际变化

为揭示东海黑潮及其来源硝酸盐输送量的年际变化,按照Soeyanto等^[15]的定义,将上述断面的硝酸盐通量及总输送量的月平均结果先去除季节循环及线性趋势后,再作13个月滑动平均得到它们的年际变化序列。

首先利用标准差得到各断面硝酸盐通量的年际变化特征(见图7)。ETC的硝酸盐通量的年际变化标准差存在两个核心区(见图7a),分别位于断面西侧200 m及中部800 m深度,说明东海黑潮硝酸盐通量在次表层及中层都存在显著的年际变化。

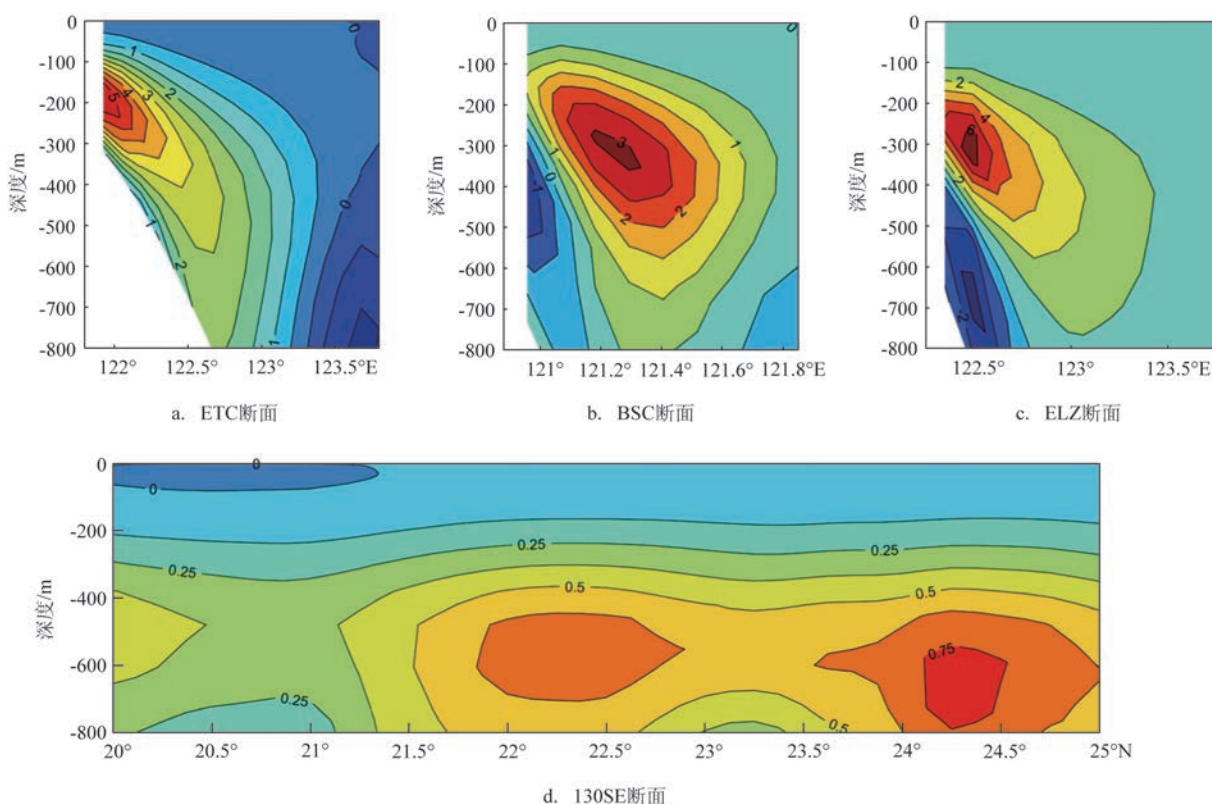


图6 1997—2016年不同断面的平均硝酸盐通量分布(单位: $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,各断面正值为向东海黑潮输送方向,见图3c箭头所示)

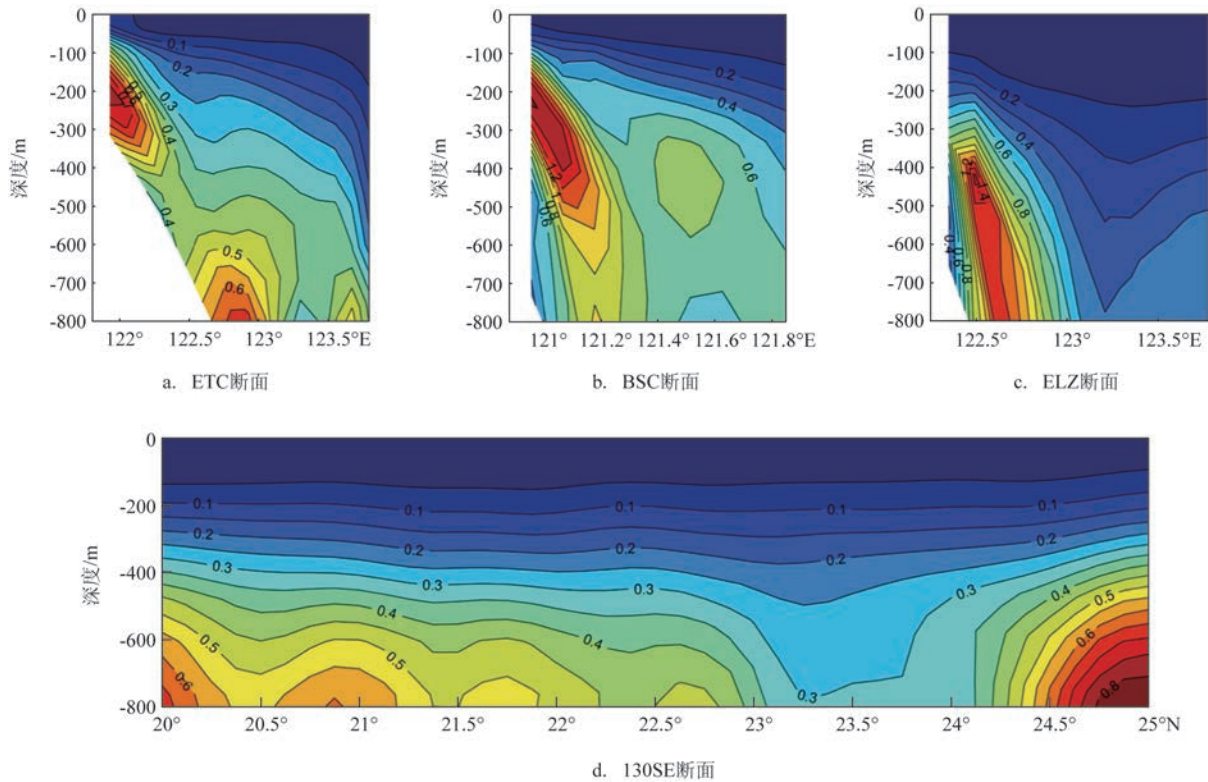


图7 不同断面硝酸盐通量年际变化的标准差分布(单位: $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

此外,BSC(见图7b)与ELZ(见图7c)西侧的硝酸盐通量变化也都大于东侧,但BSC的标准差大值区(200~400 m)比ELZ(400~800 m)更浅,说明上述两个断面对东海黑潮硝酸盐通量的影响深度可能不同。对于130SE(见图6d),其400 m以上的次表层中,标准差等值线基本平行于水深,但在400 m以下,断面24.5°N以北部分变化最强,而在23°~24°N部分,通量的变化弱于断面同深度其它部分。

图8展示了通过ETC、BSC、ELZ以及130SE硝酸盐总输送量的年际变化序列及对应功率谱曲线。ETC的硝酸盐输送具有显著的年际变化趋势(见图8a),其标准差为29.49 kmol/s ,超过总标准差(原始月平均序列)的一半(51.55 kmol/s)。功率谱分析也显示ETC的硝酸盐总输送量存在约3 a与7 a的年际变化周期(见图8b),其与东海黑潮海水流量的年际变化周期相似^[28]。通过ELZ的硝酸盐输送周期同ETC最为相近(见图8f),说明热带黑潮硝酸盐向东海输送过程中,其年际变化周期没有改变,原因可能是黑潮硝酸盐输送主要受流速而非硝酸盐浓度变化的控制^[3]。此外,图8c、8e与8g显示,BSC、ELZ以及

130SE的硝酸盐总输送量同样具有显著的年际变化,它们的年际变化标准差分别为44.83 kmol/s 、44.16 kmol/s 和43.46 kmol/s ,约占各自总标准差的一半(91.21 kmol/s 、95.19 kmol/s 和86.43 kmol/s)。功率谱分析显示BSC的硝酸盐总输送量也存在约3 a的年际变化周期(见图8d),而130SE的硝酸盐总输送量则具有约2 a、4.5 a和6.5 a 3个年际变化周期(见图8h)。

3.3 东海黑潮与其上游硝酸盐输送的年际变化关系

前文分析显示,东海黑潮及其来源硝酸盐输送都具有显著的年际变化,下面进一步探究年际尺度上它们之间的关系。图9显示ETC上硝酸盐通量与上游各断面硝酸盐总输送量年际变化的相关系数分布。相比图5,年际尺度上,东海黑潮与上游各断面硝酸盐总输送量的相关性都明显增强。BSC的硝酸盐输送对东海黑潮的影响还是主要体现在ETC的次表层与中层(见图9a)。同时,在断面西侧硝酸盐通量大值区依然呈负相关分布。相似情况也出现在图9b,说明热带黑潮水与南海水的硝酸盐

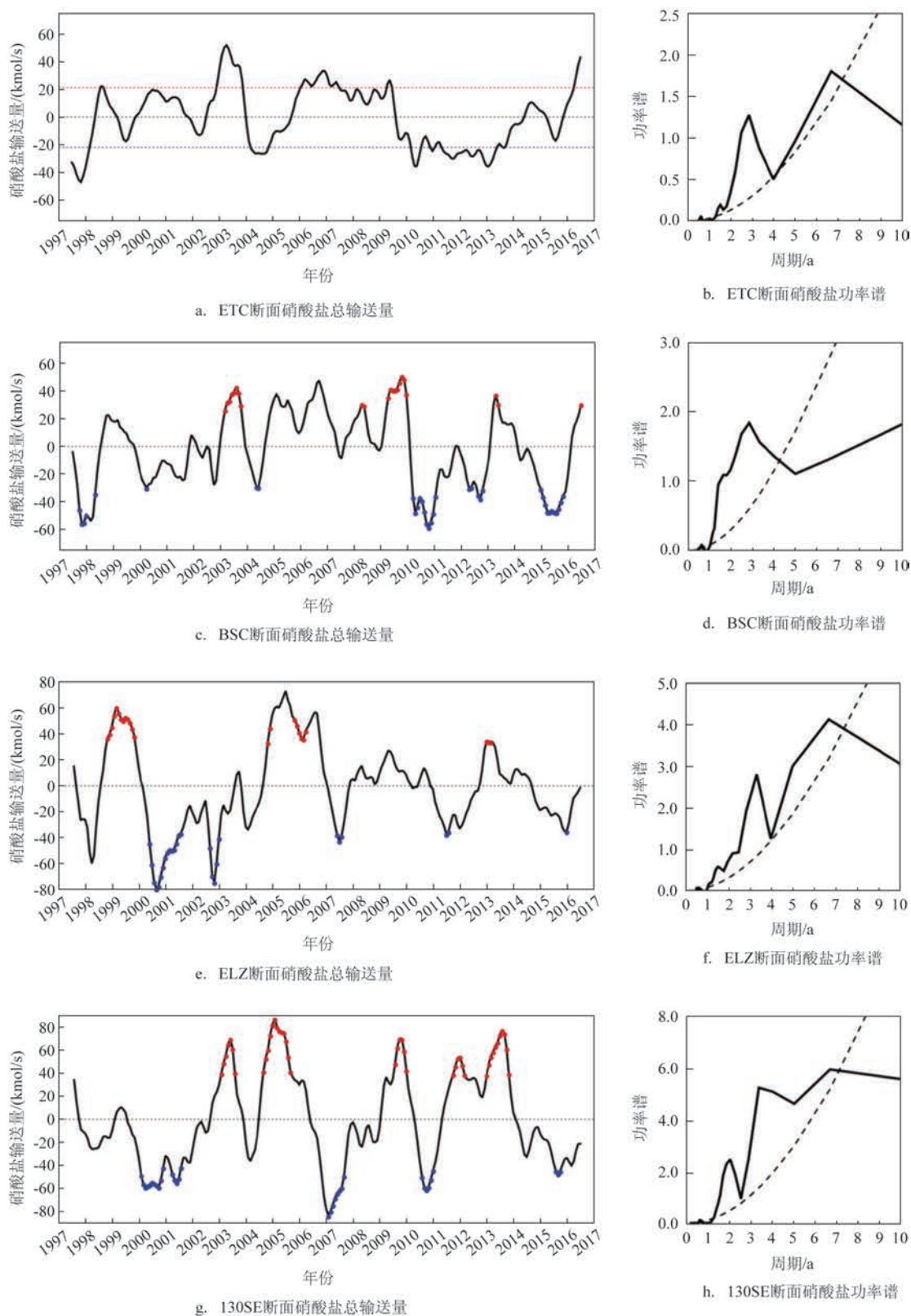


图8 通过不同断面硝酸盐总输送量的年际变化时间序列及对应功率谱曲线

(图a中红色虚线为年际尺度上硝酸盐总输送平均值加一个标准差,蓝色虚线为平均值减一个标准差。图c、e、g的红色点为不同断面的硝酸盐总输送量大于其平均值加一个标准差的月份,蓝色点是小于其平均值减一个标准差的月份。图b、d、f、h中虚线为75%置信度线)

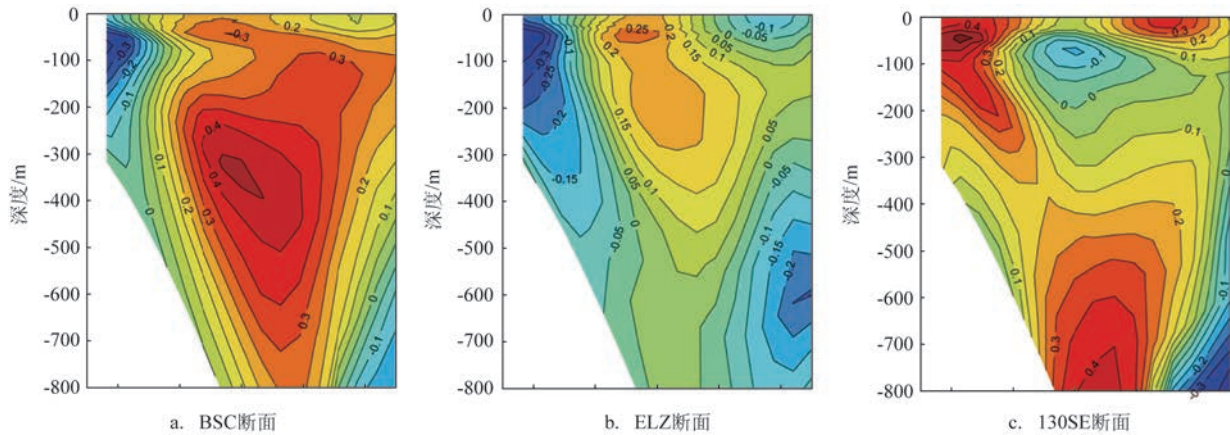


图9 年际尺度上ETC上各点硝酸盐通量与上游通过不同断面硝酸盐总输送量的相关系数分布

输送增强都能引起东海黑潮近岸侧硝酸盐输送减弱。此外,相比图5b,年际尺度上,热带黑潮水的硝酸盐输送对东海黑潮表层与次表层的通量影响更大,而对中层水影响减弱。130SE硝酸盐输送对东海黑潮硝酸盐通量的影响也明显增强,特别在ETC硝酸盐通量大值区。说明年际尺度上,由西太平洋直接汇入东海黑潮的海水可能对黑潮近岸一侧硝酸盐输送的变化有更为重要的作用。

为进一步验证上述结论,图10展示年际尺度上ETC硝酸盐高低输送时期,其与上游各断面硝酸盐通量的距平合成图。其中高输送为ETC硝酸盐总输送量高于自身平均加一个标准差的月份(见图8a中高于红色虚线的月份),低输送时期为总输送量低于自身平均减一个标准差的月份(见图8a中低于蓝色虚线的月份)。如图10a,通过ETC的硝酸盐输送较强时,断面中部600~800 m的硝酸盐通量增加最为显著,最大增加量超过 $0.50 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,但在近岸侧200 m水深增加较少,说明东海黑潮硝酸盐总输送量的增加主要表现为中层通量的增加,而次表层增加较少。与之对应,BSC的硝酸盐通量在600~800 m水深也出现增加(见图10b)。同时,由于ELZ硝酸盐通量在中层水中减小(见图10c),因此南海中层水的混入能引起东海硝酸盐通量增加,该结果与Chen^[12]的结论一致。此外,130SE的中层水中存在两个硝酸盐通量增加核心,其增量都超过 $0.2 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (见图10d),说明来自130SE的中层水可能是引起东海黑潮ETC硝酸盐通量增加的原因之一,而增加的硝酸盐来源于断面 21.5°N 以南

与 $23.25^\circ \sim 24.25^\circ\text{N}$ 之间400 m之下的海水。

当通过ETC的硝酸盐输送较弱时,断面近岸次表层与中层水都存在通量减少核心区(见图10e),其减少量都超过 $0.4 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,且中层减少范围更大,说明东海黑潮硝酸盐输送的增加与减弱主要为中层通量的变化。与ETC类似,BSC的硝酸盐通量也有两个减小核心区(见图10f),且最大减少量与ETC相当,不过,BSC次表层减少量大于中层。结合前文可知,BSC的硝酸盐通量变化对东海黑潮硝酸盐输送的影响最为显著。图10g显示,ELZ硝酸盐通量总体呈负距平,但变化量远小于其平均通量(见图6c)。结合前文,可以认为ELZ对东海黑潮硝酸盐输送影响较小。图10h显示,130SE存在两个硝酸盐通量减少核心与3个增加核心,且最大减少出现在断面北侧(24°N 附近)的600~800 m深度中。结合图10d,130SE上与黑潮硝酸盐输送增加和减少同期变化区域主要为 $23.25^\circ \sim 24.25^\circ\text{N}$ 部分,因此该部分输送的西太平洋海水相比断面其他部分对东海黑潮硝酸盐输送更为重要。

下面进一步分析东海黑潮硝酸盐通量对上游各断面硝酸盐输送年际变化的响应。与图10相似,图11为年际尺度上,上游各断面硝酸盐高低输送时期ETC硝酸盐通量的距平合成图。各断面高低输送时期的选取方法与图10类似,同时为消除上游断面的相互影响,去除了各断面同期强弱输送月份,其结果在图8c、8e与8g中显示(图8c、8e和8g的红色点为3个断面的高输送月份,蓝色点为低输送月份)。当BSC的硝酸盐输送较强时,ETC中层水中的通量明显

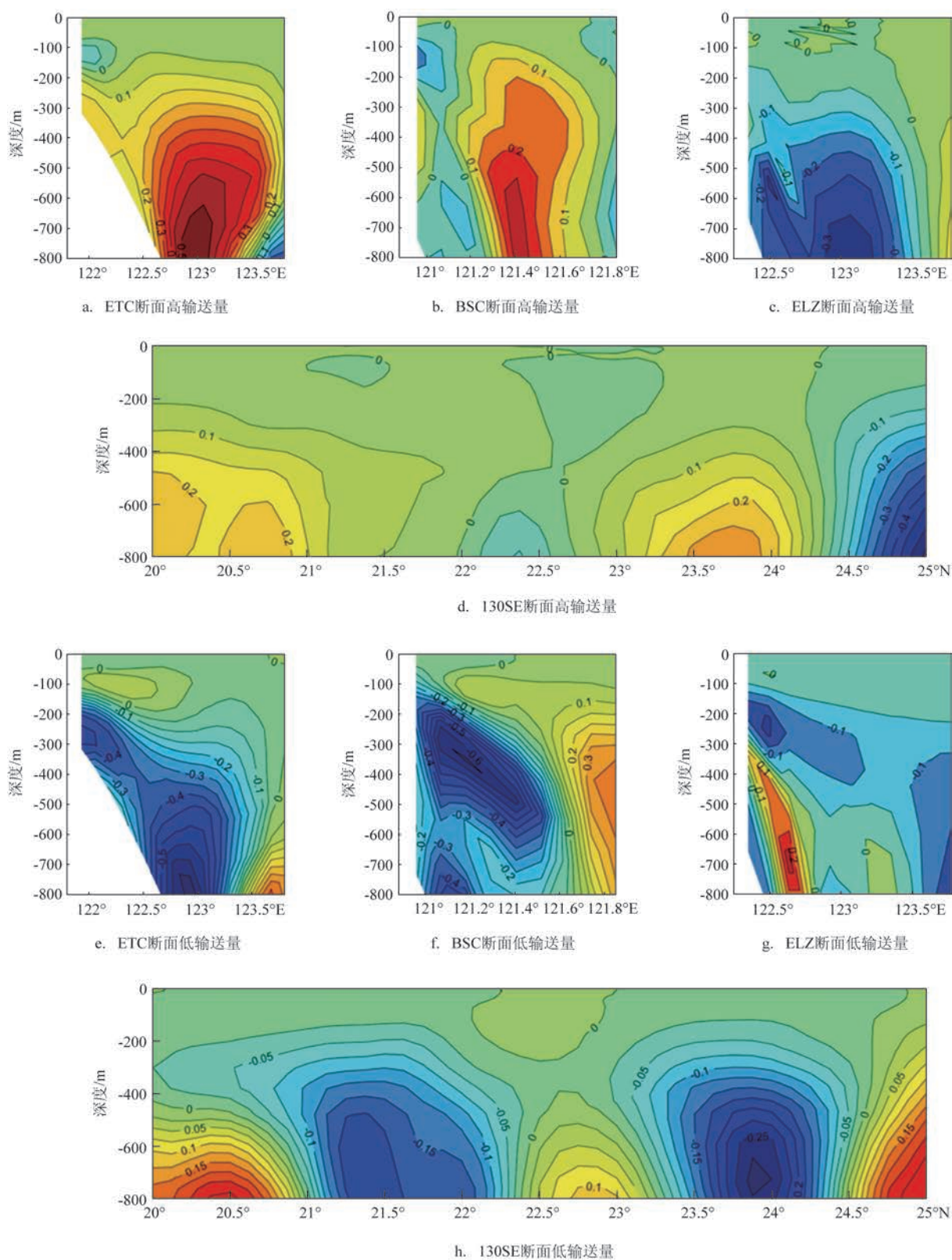


图10 年际尺度上通过ETC的硝酸盐高输送量与低输送量时不同断面的硝酸盐通量距平成图
(单位: $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

增加,最大值约为 $0.6 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。但在近岸侧的次表层明显减弱,最大减少超过 $0.7 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (见图 11a)。当BSC的硝酸盐输送较弱时,ETC中层通量明显减弱(见图 11d),只是相比图 11a,其减弱核心更深且向西移动。结合图 10b、10f、11a和 11d可以发现,BSC的硝酸盐输送变化主要能引起东海黑潮中层水硝酸盐通量变化,原因可能是富含营养盐的南海中层水加入^[12]。此外,由于东海黑潮硝酸盐总输送量变化主要体现在中层水中通量变化,因此该结果证实,BSC硝酸盐输送变化对东海黑潮的影响最为显著。但是,BSC对东海黑潮次表层硝酸盐通量的影响较为复杂,原因可能是BSC的次表层水来源较为复杂,且不同水源的相对贡献变化较大^[11]。对于ELZ,不论其强弱输送(见图 11b、11e),在ETC西侧都显示硝酸盐通量的增加。结合前文,不难看出

出ELZ的硝酸盐输送对东海黑潮硝酸盐输送的年际变化影响较小。对于130SE,其硝酸盐强输送(见图 11c)与弱输送(见图 11f)时,ETC硝酸盐通量距平呈相反分布,即高输送时,ETC近岸侧200 m与800 m水深都存在硝酸盐通量的增加核心区,而在低输送时对应位置为减少核心区。两个核心区同ETC硝酸盐通量年际变化的显著位置一致(见图 11a),也与图 8中两个相关系数大值区相近。不同的是,高输送时,次表层硝酸盐通量的最大增量(约 $0.60 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)大于中层(约 $0.30 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),但在低输送时,两个核心区的硝酸盐通量减少量相近(约 $0.20 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。上述结果表明,年际尺度上,130SE的硝酸盐总输送量变化对东海黑潮次表层与中层的硝酸盐通量变化都有影响,且在高输送时对次表层作用更强。该特征形成原因在于,通

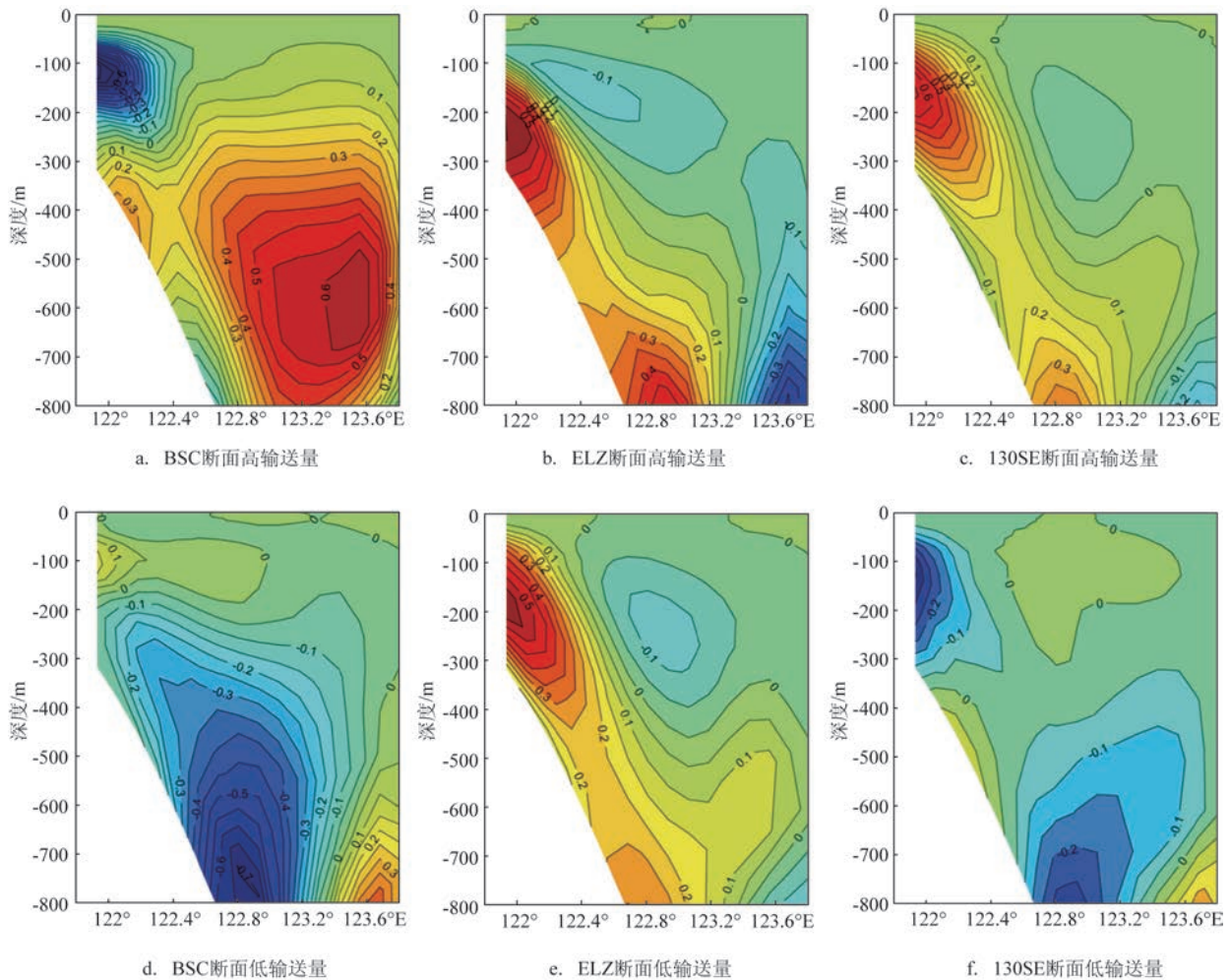


图 11 通过不同断面的硝酸盐高低输送时ETC硝酸盐通量年际变化的距平合成图(单位: $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

过130SE的海水包含东太平洋水及北太平洋水^[25],在厄尔尼诺(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)、北太平洋年代际涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)等年际,年代际气候事件影响下,北半球副热带环流发生变化,进而影响这两种海水输送^[29-30],最终引起东海黑潮次表层与中层的硝酸盐通量发生变化。不过,130SE的硝酸盐输送小于BSC对东海黑潮中层硝酸盐通量的影响。

4 结果

本文利用ROMS-CoSiNE北太平洋海洋物理-生态耦合模式分析年际尺度上东海黑潮硝酸盐输送的变化,得到以下结论:

(1)东海黑潮硝酸盐的主要来源包括经巴士海峡汇入东海黑潮的南海水、热带黑潮水以及直接汇入东海黑潮的西太平洋海水;

(2)东海黑潮及其上游的硝酸盐输送都具有显著的年际变化,且在100~400 m的次表层与400~800 m的中层水中变化更为显著。东海黑潮的硝酸盐输送具有3 a与7 a两个年际变化周期。此外,年际尺度上,ETC、BSC以及ELZ硝酸盐通量变化都为西侧(近岸)强于东侧(离岸)。沿130SE,次表层硝酸盐通量变化基本一致,但在中层水中,23°~24°N的变化弱于同深度其它部分;

(3)热带黑潮水对东海黑潮硝酸盐输送的影响较弱,但在混合南海水后,对东海黑潮的影响明显增强。通过分析发现,南海水的加入能够引起东海黑潮中层水硝酸盐通量显著变化,但对次表层的影响较为复杂;另外,直接汇入黑潮的西太平洋海水对东海黑潮次表层与中层的硝酸盐输送都有一定影响,但对次表层的影响更为显著。

东海黑潮营养盐的输送对东海营养盐的分布及生态系统具有重要影响。年际尺度上,不同来源海水对东海黑潮营养盐输送影响程度的理解,可为东海营养盐的变化机理和预报提供理论依据。不过,本文的分析主要基于海洋物理-生态耦合模式的输出结果,还需要更多观测资料进行验证。

参考文献:

- [1] 管秉贤. 黑潮——一支世界著名的大洋强流[J]. 海洋科学, 1978, (2): 1-6.
- [2] 管秉贤. 我们对黑潮研究的若干初步结果[J]. 海洋科学, 1980, (4): 34-37.
- [3] Guo X Y, Zhu X H, Wu Q S, et al. The Kuroshio nutrient stream and its temporal variation in the East China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C1): C01026.
- [4] Zhang J, Liu S M, Ren J L, et al. 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[J]. Progress in Oceanography, 2007, 74(4): 449-478.
- [5] 卢汐, 宋金明, 袁华茂, 等. 黑潮与毗邻陆架海域的碳交换[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 214-225.
- [6] 董书航, 刘素美, 任景玲, 等. 春季东海营养盐跨陆架输运通量的初步估算[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(3): 385-391.
- [7] 伍伯瑜. 黑潮流系——II 黑潮流系的水文特征[J]. 海洋通报, 1985, (6): 59-66.
- [8] 左九龙. 黑潮向东海营养物质输送及其控制因素解析[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2018.
- [9] You Y Z, Sugimoto N, Fukasawa M, et al. Transport of North Pacific Intermediate Water across Japanese WOCE sections[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2003, 108(C6): 3196.
- [10] Chen C T A. The Kuroshio intermediate water is the major source of nutrients on the East China Sea continental shelf[J]. Oceanologica Acta, 1996, 19(5): 523-527.
- [11] Mensah V, Jan S, Chang M H, et al. Intraseasonal to seasonal variability of the intermediate waters along the Kuroshio path east of Taiwan[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(8): 5473-5489.
- [12] Chen C T A. Distributions of nutrients in the East China Sea and the South China Sea connection[J]. Journal of Oceanography, 2008, 64(5): 737-751.
- [13] 张启龙, 王凡, 赵卫龙, 等. 舟山渔场及其邻近海域水团的季节特征[J]. 海洋学报, 2007, 29(5): 1-9.
- [14] Hsueh Y, Wang J, Chern C S. The intrusion of the Kuroshio across the continental shelf northeast of Taiwan[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1992, 97(C9): 14323-14330.
- [15] Soeyanto E, Guo X Y, Ono J, et al. Interannual variations of Kuroshio transport in the East China Sea and its relation to the Pacific Decadal Oscillation and mesoscale eddies[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(6): 3595-3616.
- [16] Song Y H, Haidvogel D. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system[J]. Journal of Computational Physics, 1994, 115(1): 228-244.
- [17] Chai F, Jiang M S, Chao Y, et al. Modeling responses of diatom productivity and biogenic silica export to iron enrichment in the equatorial Pacific Ocean[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2007, 21(3): GB3S90.
- [18] Chai F, Liu G M, Xue H J, et al. Seasonal and interannual variability of carbon cycle in South China Sea: A three-

- dimensional physical-biogeochemical modeling study[J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65(5): 703-720.
- [19] Liu G M, Chai F. Seasonal and interannual variation of physical and biological processes during 1994-2001 in the Sea of Japan/East Sea: A three-dimensional physical-biogeochemical modeling study[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 78(2): 265-277.
- [20] Wang X C, Chao Y. Simulated sea surface salinity variability in the tropical Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(2): L02302.
- [21] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-472.
- [22] Chen C C, Jan S, Kuo T H, et al. Nutrient flux and transport by the Kuroshio east of Taiwan[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 167: 43-54.
- [23] 李立, 苏纪兰, 许建平. 南海的黑潮分离流环[J]. *热带海洋*, 1997, 16(2): 42-57.
- [24] 袁耀初, 苏纪兰. 1995年以来我国对黑潮及琉球海流的研究[J]. *科学通报*, 2000, 45(22): 2353-2356.
- [25] You Y Z. The pathway and circulation of North Pacific Intermediate Water[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(24): 2291.
- [26] Chen A C T, Wang S L, Wang B J, et al. Nutrient budgets for the South China Sea basin[J]. *Marine Chemistry*, 2001, 75(4): 281-300.
- [27] 马超. 黑潮变化及其对台湾海峡流动的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [28] 黄大吉, 樊孝鹏, 许东峰. 台湾以东黑潮流量的变化[C]//2003年中国物理海洋学进展与展望战略学术研讨会论文集. 青岛: 国家自然科学基金委员会, 2003.
- [29] 张艳慧. 热带西太平洋次表层水和中层水分布特征及其年代变化[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2008.
- [30] Felis T, Suzuki A, Kuhnert H, et al. Subtropical coral reveals abrupt early-twentieth-century freshening in the western North Pacific Ocean[J]. *Geology*, 2009, 37(6): 527-530.

Numerical study on the interannual variation of the nitrate transport by the kuroshio in the East China Sea

LIN Zhi-jian^{1,2}, WANG Xiao-chun², WU Qiong²

(1. Jiangxi Agricultural Meteorological Center, Nanchang 330046 China; 2. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 China)

Abstract: Based on the simulation results of a three-dimensional physical-biological coupled model (ROMS-CoSiNE) for the Pacific Ocean from year 1997 to 2016, we investigate the interannual variation of nitrate transport by the Kuroshio in the East China Sea. It is found that the nitrate transport shows significant interannual variation with the periods of about 3 and 7 years, and shows significant variation in the Kuroshio subsurface water (100~400 m) and Kuroshio intermediate water (400~800 m). The water from the South China Sea and the west Pacific Ocean play an important role on the interannual variation of the nitrate transport by the Kuroshio in the East China Sea. The South China Sea water influences the nitrate transport in the Kuroshio intermediate water, while the West Pacific Ocean Water affects the nitrate transport in the Kuroshio subsurface water.

Key words: East China Sea; kuroshio; nitrate transport; interannual variation