不同温室气体排放背景下东海冬季跨陆架碳输运通量

袁东亮^{1,2,3*}, 郝佳佳^{1,2}, 李健乐^{4,5}, 何蕾^{4,5}

1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 青岛 266071;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋动力过程与气候变化实验室, 青岛 266235;
3. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;
4. 中山大学海洋科学学院, 广州 510006;
5. 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 广州 510006

* E-mail: dyuan@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-10-19; 收修改稿日期: 2017-11-14; 接受日期: 2018-01-03; 网络版发表日期: 2018-03-15

全球变化研究国家重大科学研究计划项目(编号: 2012CB956001)、中国科学院海洋专项项目(编号: XDA11010205、XDA11010304)、国家自然科学基金创新群体项目(批准号: 41421005)、国家自然科学基金面上基金项目(批准号: 41576016)、重点国际合作基金项目(编号: 41720104008)、青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技计划项目(编号: 2016ASKJ04)、海洋局专项项目(编号: GASI-03-01-01-05)和山东省联合基金项目(编号: 2014GJJS0101、U1406401)资助

摘要 基于马普耦合模式, 结合现场水文观测资料, 估算了东海冬季跨陆架环流的流量及其向深海大洋的碳输送量. 由于黄东海冬季的跨陆架环流强度远大于其他季节, 且进入黑潮次表层, 因此, 黄东海跨陆架埋碳过程主要发生在冬季. 分析结果表明, 黄东海存在明显的跨陆架输运, 其中跨越台湾岛至济州岛一线陆架边缘向外海的年平均水体输送量为 3.92Sv ($1\text{Sv}=10^6\text{m}^3\text{s}^{-1}$), 净输送量为向外海 0.82Sv , 与台湾海峡和济州海峡流量之差相当. 冬季, 跨陆架向外海的溶解无机碳(DIC)、溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)的净输运量分别为98、12和0.1百万吨. 在全球温室气体减排(RCP4.5)和持续增加(RCP8.5)背景下, 该跨陆架输运有不断增强的趋势, 其中冬季跨越台湾岛至济州岛一线陆架边缘向外海的流量从2006~2099年分别增加了0.54和0.65Sv, 增幅分别达15.3%和19.6%. 受其影响, 冬季跨陆架向外海的DIC、DOC和POC的输运量增加幅度在15.4~25.2%. 本文首次评估了全球变暖背景下的东海冬季跨陆架碳输运量, 揭示了跨陆架输运在中国近海碳循环中的重要作用.

关键词 跨陆架碳输运, 全球变暖, RCP 8.5, RCP4.5

1 引言

中国东部近海有着全球最宽广的陆架边缘海之一, 受着全球最强的季风系统——东亚季风的强迫, 还

受到来自全球最强的洋流之一——黑潮的影响, 接收着来自世界上最大流量之一的长江和最大沉积物输运之一的黄河的径流, 其环流动力学系统十分复杂, 生态环境学效应十分突出, 是亚洲大陆向西太平洋进行物

中文引用格式: 袁东亮, 郝佳佳, 李健乐, 何蕾. 2018. 不同温室气体排放背景下东海冬季跨陆架碳输运通量. 中国科学: 地球科学, 48: 683–691, doi: 10.1360/N072017-00353

英文引用格式: Yuan D L, Hao J J, Li J L, He L. 2018. Cross-shelf carbon transport under different greenhouse gas emission scenarios in the East China Sea during winter. Science China Earth Sciences, 61: 659–667, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9164-9>

质运输的重要海域之一。其中黄、东海海盆尺度跨陆架环流及其与黑潮交换的路径、动力机制及通量等科学问题, 对于全球大洋物质和能量平衡和区域环境变化等具有重要意义。

自中华人民共和国成立以来, 由于主权和观测的便利, 黄东海西部海域是中国海洋科学家的传统研究领域。限于历史资料和经济条件的不足, 过去主要关注陆架环流的各个分支, 对黄东海整体与黑潮的交换研究还不够深入(Nitani, 1972; Beardsley等, 1985; Hu, 1994; Guan, 1994; Su, 1998; Lin等, 2001)。近些年来, 随着多参量卫星遥感资料的不断发展, 一些突出的海洋学现象在黄东海海域被发现和揭示了出来。比较有代表性的是黄东海冬季的跨陆架环流系统(Yuan等, 2008)。研究表明中国西南黄海的近岸海水冬季通过苏北沿岸流的跨陆架运动被输运到黑潮流经海域, 这一跨陆架海流路径在卫星水色和海表温度分布上表现的十分清晰, 在历史温盐资料中也有表现, 其离岸流动部分被Yuan和Hsueh(2010)命名为东海海流。与跨陆架的东海海流相对运动的是冬季逆风的黄海暖流和台湾暖流, 两者将外陆架水带到近岸海区, 从而形成黄东海整个陆架范围的大规模海水交换系统。历史上冬季来自老黄河口的浊流羽锋面在以前的研究中曾经有过报道(如Milliman等, 1985), 但是这一现象所代表的跨陆架环流系统及其输运通量, 在以前的研究中较少论及。

冬季黄东海陆架海水的温度远远低于黑潮的表层水温, 因此跨陆架的东海海流通过潜沉运动, 将高密度的陆架水输运到黑潮次表层约100~200m以深的海域(Tsunogai等, 1999), 并随着黑潮进入全球大洋环流。伴随着东海海流的潜沉, 大量颗粒和溶解有机碳(POC、DOC)以及溶解无机碳(DIC)被带入黑潮次表层, 这些碳通量需要经过平均约100年以后才能再重新回到海洋表层(Munk, 1966), 因此, 这种跨陆架的潜沉过程代表着一类碳物质向深海运输的过程, 我们称之为跨陆架埋碳过程。

陆架向深海大洋的碳输送关系到陆架边缘海对陆源碳颗粒和大气CO₂的埋藏能力, 是全球碳循环研究必须解决的一个重要科学问题, 也是近些年来新兴的研究热点。Dai等(2009)和Wu等(2015)结合2009~2011年总有机碳(TOC)实测资料, 估算了南海吕宋海峡与北太平洋之间碳通量的季节变化, 表明在中层存在由南海向北太平洋的碳输运。肖合辉等(2015)和Qiao等

(2016)结合数值模拟和断面观测资料, 分别计算了冬夏季东中国海主要断面的悬浮体通量。Zhou等(2015)使用数值模拟, 计算了跨100m等深线的水体交换量。Zhang等(2017)基于数值模拟结果, 分析了跨50和100m等深线向外海的流量及其季节变化。以上是对跨陆架流量及其变化的研究, 缺乏碳输运通量的估计, 后者需要结合实测的水体碳含量, 包括水体溶解无机碳(DIC)、溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)等在内的资料进行计算。2015年1月中国科学院海洋研究所在全球变化研究国家重大科学研究计划项目“全球变暖下的海洋响应及其对东亚气候和近海储碳的影响”的资助下开展了黄、东海物质输运专题调查, 获得了丰富的海洋多要素观测资料, 为估算跨陆架向深海大洋的碳输送通量提供了条件。

研究表明, 黄、东海跨陆架物质输运主要通过三条路径(Yuan和Hsueh, 2010; 乔璐璐等, 2017): 东海海流作用下向济州岛西南的搬运、浙闽沿海穿刺锋面集合输运和台湾暖流向东分支作用下的跨陆架输运。本文将主要侧重于计算跨越陆架边缘台湾岛至济州岛观测断面(TWCJ)(图1)的冬季向外海的碳输运通量。基于现场观测的水体悬浮物、DIC、POC和DOC资料, 结合数值模拟结果, 估算东海冬季向深海大洋的碳输送通量及其在全球变暖背景下的变化趋势, 为评估中国近海储碳潜力提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 数值模拟

本文利用德国马普气象研究所(Max-Planck-Institute for Meteorology)海洋大气耦合模式ECHAM5/MPIOM模式, 在不同温室气体特征浓度路径造成的辐射强迫下(表1中RCP4.5和RCP8.5)(Representative Concentration Pathways)最新计算的海洋数据(2006~2009年), 分析黄东海跨陆架输运通量及其长期变化, 再结合现场观测的水体碳含量数据, 评估不同温室气体排放背景下的东海跨陆架碳输运通量的变化趋势。大气模式ECHAM5在不同温室气体特征浓度路径(RCP4.5和RCP8.5)造成的辐射强迫下输出强迫场(主要是风场)给MPI-OM, 模式通过风驱动的环境变化来体现RCP4.5和RCP8.5情景。MPIOM模式是曲线正交C网格, Z坐标海洋模式, 水平分辨率为0.1°, 垂向分为40

图 1 RCP4.5多年平均(2006~2016年)1月份表层和中间层流场及温度分布
蓝色矢量箭头表示速度大于 0.4 m s^{-1} 的区域

表 1 不同特征浓度路径辐射强迫介绍^{a)}

名称	具体含义	相对1986~2005年平均 升高温度($^{\circ}\text{C}$)	
		2046~2065	2081~2099
RCP4.5	到21世纪中叶, 辐射强迫 稳定至 4.5 W m^{-2} , CO_2 浓度达到650ppm	1.4	1.8
RCP8.5	到21世纪末, 辐射强迫持 续升高至 8.5 W m^{-2} , CO_2 浓度达到1370ppm	2	3.7

a) 据van Vuuren等(2011)和IPCC(2013)

层, 其中上100m每层间隔为10m, 详细的模式介绍可以参考Aldrian等(2005). 多年平均流场及主要通道的输运量显示模式结果较好的再现了黄东海的主要环流特征(图1和2).

2016年4月, 170多个国家共同签署气候变化问题《巴黎协定》, 承诺将全球气温升高幅度控制在 2°C 的范围之内, 理想目标是控制在 1.5°C . 由表1可以看到, 在RCP4.5和RCP8.5辐射强迫下, 到2065年全球气温分别升高约 1.4°C 和 2°C . 因此, 通过分析不同辐射强迫下黄、东海跨陆架碳输运的变化, 可以评估中国近海的储碳能力, 为将来中国的碳排放谈判提供科学依据.

2.2 观测资料

根据黄东海有机碳夏储冬输的机制, 在全球变化

图 2 东海海域水深地形(等值线)及跨越各主要通道、TWCJ断面和200m等深线的多年平均流量(2006~2016)及其标准差

红色数字、箭头和线段表示向近海的流量; 蓝色表示向深海的流量; 黑色表示净流量; 五角星为观测站位; 米字星代表沿等深线的计算格点, 每10个做一标记, 单位: Sv. TWCJ断面: 自台湾至济州岛的闭合断面

研究国家重大科学研究计划项目“全球变暖下的海洋响应及其对东亚气候和近海储碳的影响”的支持下, 中国科学院海洋研究所开展了为期1个月的冬季黄、东海物质输运专题调查(2014年12月29日至2015年1月27

日). 完成了89个站位, 其中包括沿东海陆架坡折区的加密观测断面(图2), 其垂向取样深度为3、10、20、30、50、75、100m以及底深, 获取了水样样品、总悬浮物(TSM)浓度、柱状沉积物和温盐流等丰富的多海洋要素第一手观测资料. DIC、DOC、POC样品根据JGOFS(Joint Global Ocean Flux Study)协议进行采样和测试(Knap等, 1996). 本文利用该数据和数值模拟的海流结果, 估算跨TWCJ断面向深海大洋的碳输送量. 图2显示, 本次专题调查在台湾岛东北部和济州岛西南部缺失观测, 我们参考以往研究结果(Hung等, 2000; 程君等, 2012; 商荣宁等, 2012; Bian等, 2013; 卢汐等, 2015), 将冬季的历史观测结果补充到这两个海域(表2), 观测资料的垂直分布详见图3.

2.3 计算方法

首先将原始曲线正交C网格下的模式速度数据平

均到温度网格点上, 然后再转换到右手水平正交坐标系下. 依据模式地形, 提取沿TWCJ断面和200m等深线上的模式数据, 将等深线上的速度场分解为沿等深线方向和垂直于等深线方向.

向近海(IVT)和向深海(OVT)流量具体计算公式为

$$\begin{aligned} \text{IVT} &= \iint V_n^+ d/dz, \\ \text{OVT} &= \iint V_n^- d/dz. \end{aligned} \tag{1}$$

式中, V_n 为垂直于等深线方向的速度分量, 其中+和-分别表示向近海和深海方向, d/d 为沿等深线方向的格点间距, dz 为垂向格点间距. 净通量为IVT和OVT之和.

由于“陆架泵”(Tsunogai等, 1999)碳埋藏过程主要发生于冬季, 因此本文将计算冬季(12~2月)跨陆架碳运输量, 代表全年的跨陆架埋碳的主要输运量. 我们将观测点的水体碳含量线性插值到TWCJ断面格点上, 记为 C , 其与体积通量的乘积即为碳通量: $\iint V_n C d/dz$.

表 2 济州岛西南及台湾岛东北部观测资料来源

名称	济州岛西南		台湾岛东北	
POC	2007年1月23日至2月13日	程君等, 2012	1994年11月6日至12日	Hung等, 2000
DOC	2007年1月23日至2月13日	商荣宁等, 2012	1994年11月6日至12日	Hung等, 2000
DIC	本文航次数据临近站位		2014年11月6日至12月8日	卢汐等, 2015
TSM	2011年12月20日至2012年1月12日	Bian等, 2013	2011年12月20日至2012年1月12日	Bian等, 2013

图 3 冬季跨越东海TWCJ断面颗粒有机碳(POC)、溶解有机碳(DOC)、溶解无机碳(DIC)和总悬浮物(TSM)浓度分布
数据来源为本文航次观测数据和历史观测数据(表2)的融合

3 结果与讨论

3.1 多年平均流场及体积通量

图1为RCP4.5模拟的多年平均(2006~2016年)1月份表层和中层流场(代表远离上、下Ekman层的内区地转流)及温度分布. 流场和温度分布清晰的显示出冬季黄东海跨陆架环流系统: 西南黄海的近岸海水通过苏北沿岸流的跨陆架运动被输运到黑潮流经海域; 与跨陆架的东海海流相对运动的是逆风的黄海暖流和台湾暖流, 两者将外陆架水带到近岸海区, 形成黄东海整个陆架范围的大规模海水交换系统. 在冬季东北风的驱动下, 黄东海75m以浅的陆架区, 表层流主要表现为向岸方向的Ekman流, 中层流主要表现为离岸方向的地转流形态.

为了评估模式模拟的跨陆架水通量状况, 图2给出了RCP4.5多年平均(2006~2016)跨陆架主要通道的体积通量. 跨TWCJ, 200m等深线及主要通道的流量模拟结果符合以往的观测结果(Isobe, 2008)和模式研究(Zhou等, 2015; Zhang等, 2017). 可以看到跨越TWCJ断面和200m等深线的年平均流量具有明显不同的特征. 跨越陆架边缘TWCJ断面向外海的年均输送量为 3.92Sv ($1\text{Sv}=10^6\text{m}^3\text{ s}^{-1}$), 净输送量为 0.82Sv , 其中包含台湾海峡 1.14Sv (向北)和济州海峡 0.25Sv (向东)的流量. 而跨越200m等深线为向近海的净输送量, 其值约为 1.04Sv , 与跨TWCJ断面净流量和济州海峡向东流量在100~200m等深线之间幅聚, 共同构成了对马海峡的净流量(2.1Sv). 与净流量相比, 向近海和向深海的实际流量比前者大一个量级. 跨越TWCJ断面向近海的流量约为 3.1Sv , 主要发生在台湾东北部等深线向近海伸展的区段, 而向深海的流量为 3.92Sv , 主要发生在等深线向外海弯折的区域. 跨越200m等深线向近海的入侵主要发生在台湾东北部.

3.2 冬季跨陆架碳输运通量

观测资料表明, 黄东海物质浓度随深度和地理位置变化显著. 例如水体悬浮物浓度具有表层低、深层高的特征, 在水平分布上, 在秋冬季, 苏北沿岸流携带高浓度悬浮体向东南方向延伸, 可以跨越50m等深线到达济州岛西南部, 是黄东海跨陆架水交换的主要通道之一(Yuan等, 2008). 因此, 沿陆架坡折线虽然水体体积守恒, 但由于沿等深线的水体物质浓度不同, 实际

物质通量也不同. 图3为冬季跨越东海TWCJ断面POC、DOC、DIC和TSM浓度分布. 可以看到跨陆架向深海的海流(图2中蓝色线段, 第30~70个格点), 将近海高浓度的物质跨越TWCJ断面输送至深海, 而黑潮及黄海暖流的入侵区域, 物质浓度较低. 特别地, 图3显示第60~70个格点在深层存在高物质浓度核心, 它们来源于黄海西南部的老黄河口, 由东海海流输送至济州岛东南部深海, 是跨陆架物质运输的重要通道之一(Yuan和Hsueh, 2010).

图4为RCP4.5多年平均(2006~2016年)冬季跨陆架体积通量和碳输运, 由于跨陆架埋碳过程主要发生在冬季, 因此, 冬季的跨陆架输运通量代表黄东海跨陆架埋碳输运的主要年输运量(Saito和Yang, 1995; 胡敦欣和杨作升, 2001; Iseki等, 2003). 整体上看, 冬季自东海陆架区存在向深海的净碳通量, 其中DIC最高, 为98百万吨; DOC次之, 为12百万吨; POC为0.1百万吨. 其中DOC大部分为惰性碳(RDOC), 它们被输运到黑潮次表层, 并最终形成深海惰性有机碳库的一部分(Jiao等, 2010, 2011). Deng等(2006)利用PN断面秋冬季资料估算出近底层向外海的POC、DOC、DIC输送量分别为0.25, 15~28和35百万吨, 与本文计算量值相当. 方精云等(2007)通过计算指出1981~2000年中国陆地植被碳汇约为 $0.096\sim0.106\text{Pg C a}^{-1}$ ($1\text{Pg C}=10^{15}\text{g C}$), 即约为0.96~1.06亿吨每年. 本文的计算结果表明, 东海冬季跨陆架向深海的有机碳净通量约为中国陆地植被碳汇量的12%, 显示黄东海跨陆架输运在中国碳循环中的重要作用.

颗粒有机碳(POC)是生物食物链中一个重要的物质基础, 同时它还是海水中碳固化和迁移输出的主要形式, 它的垂直分布与水体中的总悬浮物浓度密切相关. 研究结果显示(张岩松等, 2004, 2006), 在黄东海地区近底层悬浮物中POC含量十分相近, 东海在1.0~3.0%. 图4显示冬季东海悬浮物存在向深海跨陆架的净通量, 约为6百万吨. 依据悬浮物中POC含量的比例, 我们估算得出悬浮体中跨陆架POC通量约为0.06~0.18百万吨, 这一量值和通过水样中POC浓度计算的通量值相当, 显示了计算结果的一致性.

3.3 冬季跨陆架碳输运的长期变化

在全球变暖背景下, 跨陆架输运有不断增强的趋势, RCP4.5和RCP8.5模拟结果分别显示, 冬季跨越

图4 冬季(2006~2016多年平均)跨越东海TWCJ断面水通量(Sv)和碳通量(百万吨)

红色数字、箭头和线段表示向近海的通量,蓝色表示向深海的通量,黑色表示净通量,五角星为观测站位

TWCJ断面向深海输送流量均呈现增加趋势(图5),从2006~2099年,向深海输送量的增加趋势分别为每百年0.54和0.65Sv,其中RCP8.5模拟的跨陆架输运大于RCP4.5的结果,说明伴随着持续增暖是增强的跨陆架输运。与跨TWCJ断面输运相比,冬季跨越200m等深线向深海的流量呈现相反的趋势,RCP4.5和RCP8.5模拟趋势每百年分别降低了0.17和0.24Sv。这是因为跨200m等深线净输运量为向近海方向,结果显示向近海的输运量为增长的趋势(图略)。100和200m等深线之间水量的增加最终转变为对马海峡流量的增长。这些结

果表明在全球变暖的背景下,跨陆架输运变得更加活跃。

在跨陆架输运增长的影响下,冬季由陆架海向深海的碳输运量也呈现增长的趋势(图6)。RCP4.5模拟结果显示,在百年尺度上,POC、DOC和DIC冬季跨陆架向深海的输运量分别增加了0.27、5.9和103.7百万吨,与2006~2016年最初十年相比,POC、DOC、DIC冬季跨陆架输运通量分别增加了约15.4%、16.7%和15.4%。RCP8.5结果比前者增长更加显著,分别增长了19.8%、25.2%和19.9%,这说明持续增暖可以加剧跨陆架碳输运的增长。对净输运量来说(图略),向深海的跨陆架碳输运也呈现增加趋势,增长幅度在6.2~21%。引起跨陆架输运增长的原因主要有两方面。一方面是有有机碳浓度自近海一侧向深海方向逐渐降低(图3)。另一方面,虽然跨陆架净体积通量长期变化不大(图略),但跨陆架交换呈现增长趋势,对于同样增幅的不同方向的跨陆架海流来说,流出陆架区的海流可以带走更多的有机碳。

为了了解《巴黎协定》框架下,未来全球气温升高1.5℃时,东海冬季跨TWCJ断面向外海的输送通量变化情况,我们分别计算了在RCP4.5和RCP8.5辐射强迫下,气温升高1.5℃时(IPCC, 2013)和未来21世纪末,冬季跨TWCJ向外海通量的增长值及其相对于2006~2016年期间冬季向外海平均通量的增长率(表3)。在RCP4.5强迫下,到21世纪中叶辐射强迫趋于稳定,此时温度升高约1.4℃(表1),此后直到21世纪末,温度升高幅度不大。与之对应的,跨TWCJ断面向外海的输送量也在21世纪中叶达到峰值,此后趋于稳定。在

图5 冬季跨TWCJ断面(a)和200m(b)等深线向深海流量绝对值的长期变化(3年滑动平均值)

通量的线性增长率表示百年尺度上通量的增长值(Sv/100年)

图6 冬季跨TWCJ断面向深海输送POC(a)、DOC(b)、DIC(c)通量的长期变化
3年滑动平均值; 通量的线性增长率表示百年尺度上通量的增长值(百万吨/100年)

表3 RCP4.5和RCP8.5强迫下, 全球平均气温升高1.5℃时和21世纪末, 冬季跨TWCJ断面向外海输运通量的增长值及其相对于2006~2016年期间冬季向外海平均通量的增长率

		体积输运(Sv)	POC(百万吨)	DOC(百万吨)	DIC(百万吨)
RCP4.5	升高1.5℃	0.42(12%)	0.21(12.0%)	5.82(16.5%)	82.1(12.2%)
	2006~2099	0.54(15.3%)	0.27(15.4%)	5.90(16.7%)	103.7(15.4%)
RCP8.5	升高1.5℃	0.38(11.5%)	0.19(11.7%)	4.49(13.6%)	72.9(11.6%)
	2006~2099	0.65(19.6%)	0.33(19.8%)	8.32(25.2%)	125.7(19.9%)

RCP8.5强迫下, 温室气体浓度持续增长到21世纪末, 最终气温可升高至3.7℃. 与之对应的, 跨陆架输运量也呈现持续增长的态势, 当气温升高1.5℃, 跨陆架输运量约为21世纪末的一半, 代表中国近海跨陆架输运在持续增暖条件下的储碳潜力.

4 结论

基于马普耦合模式, 结合现场水文观测资料, 计算了东海冬季跨陆架向深海大洋的碳输送量. 研究表明, 黄东海陆架冬季存在明显的向深海的跨陆架净碳输运. 对多年平均值(2006~2016)来说, 跨越陆架边缘向外海的年均输送量为3.92Sv, 净输送量为0.82Sv, 跨越200m等深线向近海的年均净输送量为1.04Sv. 冬季, 向外海的跨陆架DIC、DOC和POC净输运量分别

为98、12和0.1百万吨, 其中跨陆架DOC输运的量值约为方精云等(2007)计算的中国陆地植被年碳汇量的12%. 冬季, 东海悬浮物向深海的跨陆架净通量为6百万吨, 据此估算的跨陆架POC通量约为0.06~0.18百万吨, 与通过水样分析计算的通量值相当, 显示了计算结果的一致性.

全球温室气体减排背景(RCP4.5)和持续增加(RCP8.5)下的长期气候预报结果(2006~2099)显示, 在全球变暖背景下, 该跨陆架输运有不断增强的趋势. RCP4.5和RCP8.5的模拟结果分别显示, 冬季跨越陆架边缘向外海的输送流量从2006~2099年分别增加了0.54和0.65Sv. 受其影响, 跨陆架POC、DOC和DIC向外海的输运量在减排(RCP4.5)背景下分别增长15.4%、16.7%和15.4%; 在持续排放增加(RCP8.5)背景下, 该跨陆架输运量可持续增加19.8%、25.2%和19.9%. 其中

RCP8.5模拟的跨陆架输运明显大于RCP4.5的结果, 这说明持续增暖可以加剧跨陆架的碳输运. 本文首次评估了黄东海冬季跨陆架碳输运通量, 以及在不同减排背景下的跨陆架碳输运通量变化, 揭示了跨陆架输运在中国近海碳循环中的重要作用.

由于缺乏实际黄、东海水体悬浮物浓度和碳含量浓度的长期变化, 本文仅就全球变暖背景下黄东海冬季跨陆架输运增加造成的碳输运增加进行了评估, 实际情况还包括碳含量浓度长期变化所引起的碳输运变化以及穿刺锋面的集合输运, 后者由于缺乏观测和数值模拟, 目前还不得而知. 另外, 卫星观测显示, 黄东海跨陆架环流延伸至晚秋和早春季节, 其跨陆架环流通量没有包含在本文的计算中, 因此本文计算的跨陆架碳输运通量可能偏少. 本文的研究表明开展长期连续的水体碳含量和跨陆架输运通量观测, 是不断完善中国近海跨陆架碳通量研究的迫切需求.

致谢 感谢德国马普气象研究所的苏健博士和Thomas Pohlmann教授提供的模式数据. 感谢2015年冬季黄东海物质输运专题调查全体人员的艰苦工作.

参考文献

程君, 石晓勇, 张传松, 王丽莎, 黄爽, 刘东生. 2012. 春季黄东海颗粒有机碳的时空分布特征. *海洋环境科学*, 32: 2505–2511

方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 2007. 1981–2000年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学D辑: 地球科学*, 37: 804–812

胡敦欣, 杨作升. 2001. 东海海洋通量关键过程. 北京: 海洋出版社. 204

卢汐, 宋金明, 袁华茂, 李宁. 2015. 黑潮与毗邻陆架海域的碳交换. *地球科学进展*, 30: 214–225

乔璐璐, 王震, 刘世东, 李广雪, 刘雪, 黄玲玲, 薛文静, 仲毅. 2017. 从陆架海到西太平洋: 黄、东海悬浮体跨陆架输运通道与机制. *地学前缘*, 24: 134–140

商荣宁, 王作华, 张传松, 石晓勇. 2012. 冬季黄东海溶解有机碳的分布特征. *海洋科学进展*, 30: 94–101

肖合辉, 王厚杰, 毕乃双, 吴晓, 王爱美, 张勇. 2015. 渤海海域悬浮体季节性分布及主要迁移路径. *海洋地质与第四纪地质*, 35: 11–21

张岩松, 章飞军, 郭学武, 张曼平. 2004. 黄海夏季水域沉降颗粒物垂直通量的研究. *海洋与湖沼*, 35: 230–238

张岩松, 章飞军, 郭学武, 张曼平. 2006. 东海秋季典型站位沉降颗粒物通量. *海洋与湖沼*, 37: 28–34

Aldrian E, Sein D, Jacob D, Gates L D, Podzun R. 2005. Modelling

Indonesian rainfall with a coupled regional model. *Clim Dyn*, 25: 1–17

Beardsley R C, Limeburner R, Yu H, Cannon G A. 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Cont Shelf Res*, 4: 57–76

Bian C, Jiang W, Quan Q, Wang T, Greatbatch R J, Li W. 2013. Distributions of suspended sediment concentration in the Yellow Sea and the East China Sea based on field surveys during the four seasons of 2011. *J Mar Syst*, 121–122: 24–35

Dai M H, Meng F F, Tang T T, Kao S J, Lin J L, Chen J H, Huang J C, Tian J W, Gan J P, Yang S. 2009. Excess total organic carbon in the intermediate water of the South China Sea and its export to the North Pacific. *Geochem Geophys Geosyst*, 10: Q12002

Deng B, Zhang J, Wu Y. 2006. Recent sediment accumulation and carbon burial in the East China Sea. *Glob Biogeochem Cycle*, 20, doi: 10.1029/2005GB002559

Guan B X. 1994. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas. In: Zhou D, Liang Y B, Zeng C K, eds. *Oceanology of China Seas Volume 1*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 17–26

Hu D X. 1994. Some striking features of circulation in Huanghai Sea and East China Sea. In: Zhou D, Liang Y B, Zeng C K, eds. *Oceanology of China Seas Volume 1*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 27–38

Hung J J, Lin P L, Liu K K. 2000. Dissolved and particulate organic carbon in the southern East China Sea. *Cont Shelf Res*, 20: 545–569

IPCC. 2013. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press

Iseki K, Okamura K, Kiyomoto Y. 2003. Seasonality and composition of downward particulate fluxes at the continental shelf and Okinawa Trough in the East China Sea. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 50: 457–473

Isobe A. 2008. Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves. *J Oceanogr*, 64: 569–584

Jiao N Z, Herndl G J, Hansell D A, Benner R, Kattner G, Wilhelm S W, Kirchman D L, Weinbauer M G, Luo T, Chen F, Azam F. 2010. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. *Nat Rev Microbiol*, 8: 593–599

Jiao N Z, Herndl G J, Hansell D A, Benner R, Kattner G, Wilhelm S W, Kirchman D L, Weinbauer M G, Luo T, Chen F, Azam F. 2011. The microbial carbon pump and the oceanic recalcitrant dissolved

- organic matter pool. [Nat Rev Microbiol](#), 9: 555
- Knap A, Michaels A, Close A, Ducklow H, Dickson A. 1996. Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) Core Measurements. JGOFS Report No. 19. Reprint of the IOC Manuals and Guides No. 29. Paris: UNESCO
- Lin K, Guo B, Tang Y. 2001. An analysis on observational surface current in the Yellow Sea and the East China Sea. Cheju: Proceedings, Extended Abstract Volume, the 11th PAMS/JECSS Workshop, April 11–13, 2001, 67–71
- Milliman J D, Shen H T, Yang Z S, Mead R H. 1985. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf. [Cont Shelf Res](#), 4: 37–45
- Munk W H. 1966. Abyssal recipes. [Deep Sea Res Oceanogr Abstracts](#), 13: 707–730
- Nitani H. 1972. Beginning of the Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K, eds. Kuroshio—Its Physical Aspects. Tokyo: University of Tokyo Press. 353–369
- Qiao L, Huang L, Wang Z, Yao Z, Liu S. 2016. Flux and its seasonal variation of suspended particulate matter in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea. [Geol J](#), 51: 22–34
- Saito Y, Yang Z. 1995. Historical change of the Huanghe (Yellow River) and its impact on the sediment budget of the East China Sea. In: Tsunogai, S, Iseki K, Koike I, Oba T, eds. Global Flux of Carbon and its Related Substances in the Coastal Sea-Ocean-Atmosphere System. Yokohama: M & J International. 7–12
- Su J. 1998. Circulation dynamics of the China Seas north of 18°N. In: Robinson A R, Brink K H, eds. In The Sea, Volume 11. New York: John Wiley & Sons Inc. 483–505
- Tsunogai S, Watanabe S, Sato T. 1999. Is there a “continental shelf pump” for the absorption of atmospheric CO₂? [Tellus B-Chem Phys Meteor](#), 51: 701–712
- van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt G C, Kram T, Krey V, Lamarque J F, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith S J, Rose S K. 2011. The representative concentration pathways: An overview. [Clim Change](#), 109: 5–31
- Wu K, Dai M H, Chen J H, Meng F F, Li X L, Liu Z Y, Du C J, Gan J P. 2015. Dissolved organic carbon in the South China Sea and its exchange with the Western Pacific Ocean. [Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr](#), 122: 41–51
- Yuan D L, Hsueh Y. 2010. Dynamics of the cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas in winter. [Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr](#), 57: 1745–1761
- Yuan D L, Zhu J, Li C Y, Hu D X. 2008. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations. [J Mar Syst](#), 70: 134–149
- Zhang J, Guo X Y, Zhao L, Miyazawa Y, Sun Q. 2017. Water exchange across isobaths over the continental shelf of the East China Sea. [J Phys Oceanogr](#), 47: 1043–1060
- Zhou F, Xue H J, Huang D J, Xuan J L, Ni X B, Xiu P, Hao Q. 2015. Cross-shelf exchange in the shelf of the East China Sea. [J Geophys Res-Oceans](#), 120: 1545–1572

(责任编辑: 焦念志)