中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 10 期: 3113 ~ 3133
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

中国东部近海沉积有机碳的分布、埋藏及碳汇效应

石学法[1,2,3*], 吴斌[1,2,3], 乔淑卿[1,2,3*], 姚政权[1,2,3], 胡利民[2,4], 白亚之[1,3], 胡珊[1,2,3], 盛洁[1], 刘焱光[1,2,3], 刘升发[1,2,3], 王昆山[1,2,3], 邹建军[1,2,3]

1. 自然资源部第一海洋研究所, 自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室, 青岛 266061;
2. 青岛海洋科技中心, 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237;
3. 山东省深海矿产资源开发重点实验室(筹), 青岛 266061;
4. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100
* 通讯作者, E-mail: xfshi@fio.org.cn(石学法) , qiaoshuqing@fio.org.cn(乔淑卿)

收稿日期: 2024-02-22; 收修改稿日期: 2024-07-29; 接受日期: 2024-08-05; 网络版发表日期: 2024-09-06
崂山实验室科技创新项目(LSKJ202204200)、我国近海海洋综合调查与评价专项项目(908~ZC~I~05)、 国家自然科学基金委员会-山东省联合基金海洋中心项目(U1606401)、 国家自然科学基金委员会共享航次计划项目(42049902, 42149902)和泰山学者攀登计划项目(tspd20181216)资助

摘要 海洋是地球上最大的活性碳库. 有机碳作为海洋固碳的主要形态, 其沉积和埋藏在全球碳循环中扮演着重要的角色. 本文利用采自渤海、黄海和东海海域的5796个站的沉积有机碳含量及相关地球化学和沉积学参数, 编制了系列图件, 总结阐述了中国东部近海沉积有机碳分布和埋藏规律; 基于获得的现代沉积物收支数据, 系统估算了渤海、黄海和东海有机碳埋藏通量; 在此基础上综合评估了中国东部近海沉积碳汇效应强度, 基本摸清了渤海、黄海和东海沉积有机碳"家底". 研究结果表明, 渤海、黄海和东海沉积有机碳含量介于0.00%~2.12%之间, 平均含量为0.47%±0.26%. 有机碳含量主要受细粒沉积物组分控制, 泥质区有机碳含量平均值比非泥质区高39%. 渤海、黄海和东海现代沉积有机碳主要埋藏在七大泥质区, 其沉积有机碳埋藏通量合计约为8.20Mt C a^{-1}. 其中, 生源有机碳埋藏通量为6.92Mt C a^{-1}, 与我国东部九大水系流域硅酸盐风化强度相当. 在自然状态下, 中国东部近海沉积物中每年固定的有机碳相当于25.37Mt大气CO_2, 具有非常可观的碳汇效应. 渤海、黄海和东海陆源有机碳的分布和埋藏主要受大河输入和海区复杂水动力环境的影响, 但筑坝等人类活动已显著改变了近海泥质区有机碳的埋藏.

关键词 沉积有机碳, 埋藏通量, 碳汇效应, 碳循环, 中国东部近海

1 引言

海洋是地球上最大的活性碳库. 海洋生态系统吸收大气CO_2或通过光合作用固定大气CO_2是减缓大气CO_2浓度升高的重要途径(Liu等, 2022; DeVries等, 2023; Stukel等, 2023). 自工业革命以来, 海洋吸收了约23%的人为源CO_2, 因而海洋生态系统固碳有望成为我国实现碳中和目标"三端发力"中"自然生态固碳"的

中文引用格式: 石学法, 吴斌, 乔淑卿, 姚政权, 胡利民, 白亚之, 胡珊, 盛洁, 刘焱光, 刘升发, 王昆山, 邹建军. 2024. 中国东部近海沉积有机碳的分布、埋藏及碳汇效应. 中国科学: 地球科学, 54(10): 3113–3133, doi: 10.1360/SSTe-2024-0056
英文引用格式: Shi X, Wu B, Qiao S, Yao Z, Hu L, Bai Y, Hu S, Sheng J, Liu Y, Liu S, Wang K, Zou J. 2024. Distribution, burial fluxes and carbon sink effect of sedimentary organic carbon in the eastern China seas. Science China Earth Sciences, 67(10): 3062–3082, https://doi.org/10.1007/s11430-024-1412-0

© 2024 《中国科学》杂志社

重要手段(焦念志等, 2021; 丁仲礼等, 2022; 于贵瑞等, 2022a). 碳的含量、存在形式、迁移转化(交换)、通量等是碳库最主要的特征参数, 而厘清地球上主要碳储库之间的碳通量及其交换特征则是研究以大气CO_2为核心的碳循环和气候变化之间反馈关系的重要基础(Bradley等, 2022). 由于海洋碳库储量远高于大气碳库, 两者之间碳交换的微小变化都将显著影响大气CO_2浓度, 因此海洋固碳对气候具有重要调控作用(Martin和Bianchi, 2024). 当前, 不同计算方法估算的生态系统碳汇效应差别很大, 导致我国近海碳库和碳汇强度仍未确认, 在海底部分尤其如此(于贵瑞等, 2022b). 因此, 查清海洋碳库关键信息底数、量化海洋碳库的空间格局, 可以准确估算海洋碳库收支、更好地认识和调控人为活动对海洋的影响, 也是探讨海洋增汇和实现碳中和的重要前提.

有机碳(Organic Carbon, 以下简称OC)是海洋碳库的重要组成部分(LaRowe等, 2020; Ausín等, 2021). 陆地上经由光合作用和化学风化固定/捕集的大气CO_2通过河流等途径进入海洋, 最终以有机碳和碳酸盐的形式在海底埋藏和保存(Regnier等, 2013). 海洋初级生产者通过光合作用固定的CO_2也有少部分(平均0.1%)从真光层沉降至海底并被长期埋藏(Burdige, 2007; 张瑶等, 2017; Bradley等, 2022; Li等, 2023). 这些埋藏在海底沉积物中的有机碳能有效脱离地表碳循环过程, 在地质时间尺度上可降低大气CO_2水平, 构成了长期碳汇机制中的重要一环(Galy等, 2015; Hilton等, 2015; Dai等, 2022; Glibert等, 2022; Jørgensen等, 2022; Li等, 2023). 海洋沉积有机碳(Sedimentary Organic Carbon, 以下简称SOC)的长期保存还可延缓埋藏在其中的藻类和植物的氧化, 促进大气氧含量增加, 对宜居地球的形成和生命演化具有重要贡献(Zhao等, 2023). 近海有机碳埋藏是全球碳循环的关键一环, 对气候变化具有重要的影响.

渤海、黄海和东海发育宽浅的陆架, 周边的黄河、长江及大量中小型河流带来的巨量陆源物质沉积形成了大型三角洲和泥质沉积体(Qiao等, 2017). 与之相伴, 大量的陆源有机碳也随之入海并沉积埋藏(Hu等, 2009, 2011, 2012, 2013, 2016; 石学法等, 2016; Wu等, 2020), 在区域和全球碳循环中扮演了重要的角色(戴民汉等, 2004; 赵美训等, 2017; 焦念志等, 2018). 从现代沉积作用和区域沉积物收支来看, 渤海、黄海和东海的泥质区属于稳定沉积区域, 而在非泥质沉积区沉积速率极低, 基本上不发生沉积, 甚至出现侵蚀, 所以泥质区的现代沉积通量基本可代表整个海域的现代沉积通量(Qiao等, 2017). 据初步估算, 全球大陆边缘以仅占~10%的海底面积埋藏了全球将近90%的有机碳(130 *vs.* 157Mt C a^{-1}; Berner, 1982; Atwood等, 2020). 之前, 许多研究者曾根据少量数据粗略估计渤海、黄海和东海沉积有机碳埋藏量约占全球大陆边缘有机碳埋藏量的~10%(~13Mt C a^{-1}; Deng等, 2006; Hu等, 2016; 焦念志等, 2018), 这与中国东部近海海-气界面CO_2碳汇通量(8.3~24.7Mt C a^{-1}; 宋金明等, 2018; 焦念志等, 2018)和九大水系流域硅酸盐风化强度(5.05~7.52Mt C a^{-1}; 吴卫华等, 2011)大致具有可对比性. 可见渤海、黄海和东海沉积有机碳是全球重要的碳储库, 具有显著的碳汇效应.

过去二十多年来, 随着碳循环成为全球变化研究的焦点, 我国近海沉积有机碳的研究也取得了长足进步. 研究者对渤海、黄海和东海沉积有机碳分布、来源、埋藏和保存以及机制等方面开展了诸多研究, 提升了对中国近海有机碳源汇过程、转化及埋藏过程的认识和理解, 积累了很多数据, 这对限定不同类型有机碳的活性和通量奠定了基础(Deng等, 2006; Hu等, 2016; Zhao等, 2021). 特别是随着传统和新型生物标志物以及放射性碳(^{14}C)方法的应用(Zhu等, 2013; Bao等, 2016, 2018, 2019; Yu等, 2018, 2021; Guo等, 2021; Tao等, 2023), 对渤海、黄海和东海沉积有机碳的研究更加深入, 在有机碳化学活性、年龄和水动力控制等方面取得了大量成果, 为认识全球变化背景下中国东部海区沉积有机碳埋藏及潜力评估提供了依据. 然而, 从碳库和碳汇的角度来看, 还存在诸多不足. 一方面尚未对渤海、黄海和东海沉积有机碳的分布特征和变化规律进行精细的全面刻画; 另一方面也未能对沉积有机碳埋藏量、来源及收支进行系统和翔实的计算, 特别是未基于沉积物质量收支进行讨论, 只是进行了非常粗略的估算, 没有给出精确的数据. 这主要有三个原因: 一是研究者使用的样品数量偏少, 在空间上远未能覆盖所有沉积物类型, 代表性不够; 二是没有将海洋沉积有机碳研究与海区沉积物分布特征充分结合起来进行分析; 三是研究者利用的沉积速率数据偏少, 代表性不够, 缺乏对海区沉积过程和环境的全面分析.

本文基于作者近年编制出版的1:100万《渤海、

黄海和东海沉积物类型图》(石学法等, 2021), 以及渤海、黄海和东海现代沉积物收支研究结果(Qiao等, 2017), 利用渤海、黄海和东海迄今为止覆盖范围最广和采样密度最高的沉积有机碳及其相关参数数据集, 分析了SOC的分布特征和控制因素, 计算了SOC埋藏通量, 给出了中国东部近海碳汇效应强度(指固定并能长期保存的大气CO_2的量), 较为精确地估算了渤海、黄海和东海沉积物中有机碳的碳汇潜力, 基本摸清了渤海、黄海和东海沉积有机碳的"家底", 可为准确认识我国近海自然生态固碳能力, 实现我国"双碳战略"目标及制定相关政策提供科学依据.

2　材料和方法

2.1　样品和数据获取

本研究使用的资料数据主要来自"我国近海海洋综合调查与评价专项项目"、"海洋公益性行业科研专项项目"和"国家自然科学基金共享航次"等多个项目在渤海、黄海和东海采集沉积样品的分析测试结果, 并收集了公开发表的有关数据资料. 本文共使用了5796个站表层沉积有机碳含量(图1a)及其相关参数, 其中包括988站有机碳$\delta^{13}C$、432站有机碳$\Delta^{14}C$、1920站沉积总氮、302站黑碳(Black Carbon, 简称BC)、565站基于^{210}Pb计算的沉积速率、994站干密度和18229站粒度数据. 相关样品采集和分析均按《海洋底质调查技术规程》(国家海洋局908专项办公室, 2006)、《海洋地质调查技术规程》(T/CAOE 42-2021)等标准执行.

2.2　沉积有机碳埋藏通量计算

沉积有机碳埋藏通量计算公式为$BF_{OC}=OC\times A\times SR\times\rho$. 其中, BF_{OC}(Burial flux of OC, 简称BF_{OC})为有机碳埋藏通量(g a^{-1}); OC为有机碳, 其含量以总有机碳(Total Organic Carbon, 简称TOC, %)表征; A为面积(cm^2); SR为沉积速率(cm a^{-1}); ρ为干密度(g cm^{-3}). BF_{OC}计算中, OC、SR和ρ乘积即为沉积有机碳埋藏速率(Mass Accumulation of OC, 简称MAR_{OC}). 渤海泥质区沉积物干密度取实测值, 黄海和东海泥质区沉积物干密度取我国近海黏性沉积物平均值0.95g cm^{-3}(徐元芹, 2012). 通过数据网格化得到TOC、SR的空间分布, 并将地理坐标系下的TOC与SR值网格转换至墨卡托投影坐标系. 对于任一网格单元, 可通过公式计算该网格单元内的通量. 根据渤海、黄海和东海现代沉积物收支计算结果, 渤海泥质区(M1)、山东半岛东部沿岸泥质区(M2)、黄海中部泥质区(M3)、废黄河口泥质区(M4)、黄海东南部泥质区(M5)、济州岛西南泥质区(M6)和浙闽沿岸泥质区(M7)(图1b)等7个泥质区沉积物埋藏通量基本代表了全海域沉积通量(Qiao等, 2017). 因此, 渤海、黄海和东海有机碳埋藏通量为各泥质区内网格单元计算有机碳埋藏通量之和. 陆源有机碳(Terrestrial OC, 简称OC_{ter})、海源有机碳(Marine OC, 简称OC_{mar})和黑碳埋藏通量分别为各自含量与沉积物埋藏通量之乘积. OC_{ter}和OC_{mar}根据区域海源和陆源有机碳端元值, 按照二端元模型进行定量划分, 其中黄河流域以C_3植物为主, $\delta^{13}C$平均值为–26.7‰±4.18‰, 长江流域C_3植物的$\delta^{13}C$与之相近(Sun等, 2021; Zhao等, 2021). 中国近海海源有机碳平均$\delta^{13}C$为–20.0‰±1.00‰(Wang等, 2015). 生源有机碳(biospheric OC, 简称OC_{bio})系根据样品$\Delta^{14}C$计算现代碳比值(Fm), 进而获得岩源有机碳(OC_{petro})含量, OC_{bio}为站位OC与OC_{petro}差值(方法参见Zhao等, 2021).

2.3　碳汇效应强度定量估算

沉积物中OC_{mar}由海洋生物活动产生, 主要是海洋初级生产者经生物泵固定的有机碳, 直接代表了海洋生物泵固定并在沉积物中保存的大气CO_2的强度. OC_{bio}可以影响碳在海洋储库中的净规模和停留时间(Galy和Eglinton, 2011; Hilton等, 2012). OC_{bio}包括OC_{mar}和OC_{ter}中的生源有机碳部分($OC_{bio\text{-}ter}$). 在地质时间尺度上, OC_{bio}在河流中的搬运及其在海洋沉积环境中的埋藏是大气CO_2升高的重要负反馈机制(Hilton等, 2015). 因此, 沉积有机碳中OC_{bio}通量可代表沉积碳埋藏的碳汇强度. 本文相关通量系根据^{210}Pb活度得到的沉积速率计算获得, 因此OC_{bio}通量代表的是百年尺度上碳汇效应.

3　结果

3.1　沉积有机碳分布和来源

如图2a所示, 渤海、黄海和东海表层沉积物中TOC含量介于0.00%~2.12%, 平均值为0.47%±0.26% (n=5796). TOC高含量区(累积频率≥75%, TOC≥0.62%)主要分布在渤海泥质区、北黄海中部、

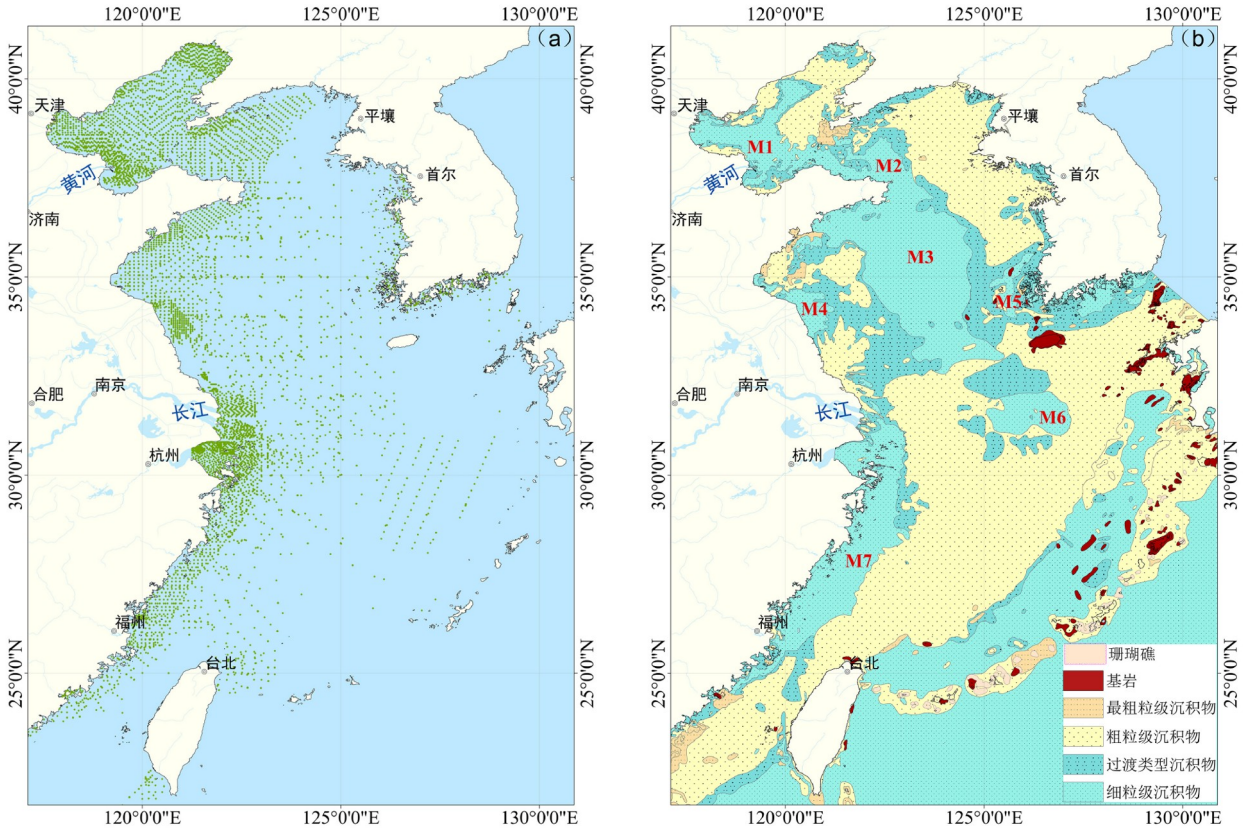

图 1　渤海、黄海和东海表层沉积物站位(a)及简化的沉积物类型分布图(b)

(a) 调查和收集的站位, 收集站位数据来源: Aller等, 1985; Park等, 1999; Lin等, 2000; Jeng等, 2003; Kang和Choi, 2003; Deng等, 2006; Kao等, 2006; 2014; Cha等, 2007; Kong和Park, 2007; Youn和Kim, 2008; Chang等, 2010, 2015; Xing等, 2011, 2014; Li等, 2012; Hu等, 2012, 2013, 2016; Wu等, 2013; Li等, 2014; Lim等, 2015; Yao等, 2015; Amano和Itaki, 2016; Bao等, 2016, 2018; Tao等, 2016; Yoon等, 2016; Cao等, 2017; Zhang等, 2017, 2021; Liao等, 2018; Ma等, 2018; Zhao等, 2018, 2021; Matsuzaki等, 2019; Mei等, 2019; Kim等, 2020; Sun等, 2020a, 2021; Wu等, 2020; Chen等, 2021a, 2021b; Guo等, 2021; Qi等, 2021; Wang等, 2021; Yu等, 2021; 王润梅等, 2015; (b) 渤海泥质区(M1)、山东半岛东部沿岸泥质区(M2)、黄海中部泥质区(M3)、废黄河口泥质区(M4)、黄海东南部泥质区(M5)、济州岛西南泥质区(M6)和浙闽沿岸泥质区(M7), 引自石学法等(2021)

黄海中部泥质区、黄海东南部泥质区、洛东江和蟾津江三角洲、济州岛西南泥质区、东矶列岛与韭山列岛东部、闽江与瓯江三角洲及邻近海域、台湾岛东北和西南部以及冲绳海槽中北部等区域, 其中小清河口、北黄海中部、南黄海中北部、洛东江和蟾津江三角洲、闽江与瓯江三角洲、台湾岛东北和西南外海以及冲绳海槽TOC含量高达0.90%以上, 属于极高含量区(累积频率≥85%, 即TOC≥0.71%). 低含量区(累积频率≤25%, 即TOC≤0.28%)主要分布在辽东湾南部、辽东浅滩、西朝鲜湾、江华湾、除废黄河口周边外的江苏沿岸、东海中外陆架、台湾海峡等海区, 其中黄海东部西朝鲜湾和江华湾附近海域、黄海西部海州湾及邻近海域和东海外陆架TOC含量处于极低水平, 基本在0.20%以下(累积频率≤15%).

渤海、黄海和东海沉积物的C/N比值为1.3~28.1, 平均值为7.8±2.9(n=1920, 图2b). C/N比值分布与TOC具有一定的相似性, 即在陆源影响显著的泥质区和河口等区域TOC含量和C/N比值均较高, 而在砂质区则较低. 然而, C/N比值在黄海中部泥质区西南边缘具有斑块状高值区(>9.3), 但对应的TOC含量却低于0.40%. 这是由于近海沉积物中无机氮、沉积动力环境和微生物作用等都可能影响C/N比值, 这使得近海有机碳的C/N比值对有机碳物源的指示作用存在一定局限(Hu等, 2013; 石学法等, 2016). 渤海、黄海和东海沉积有

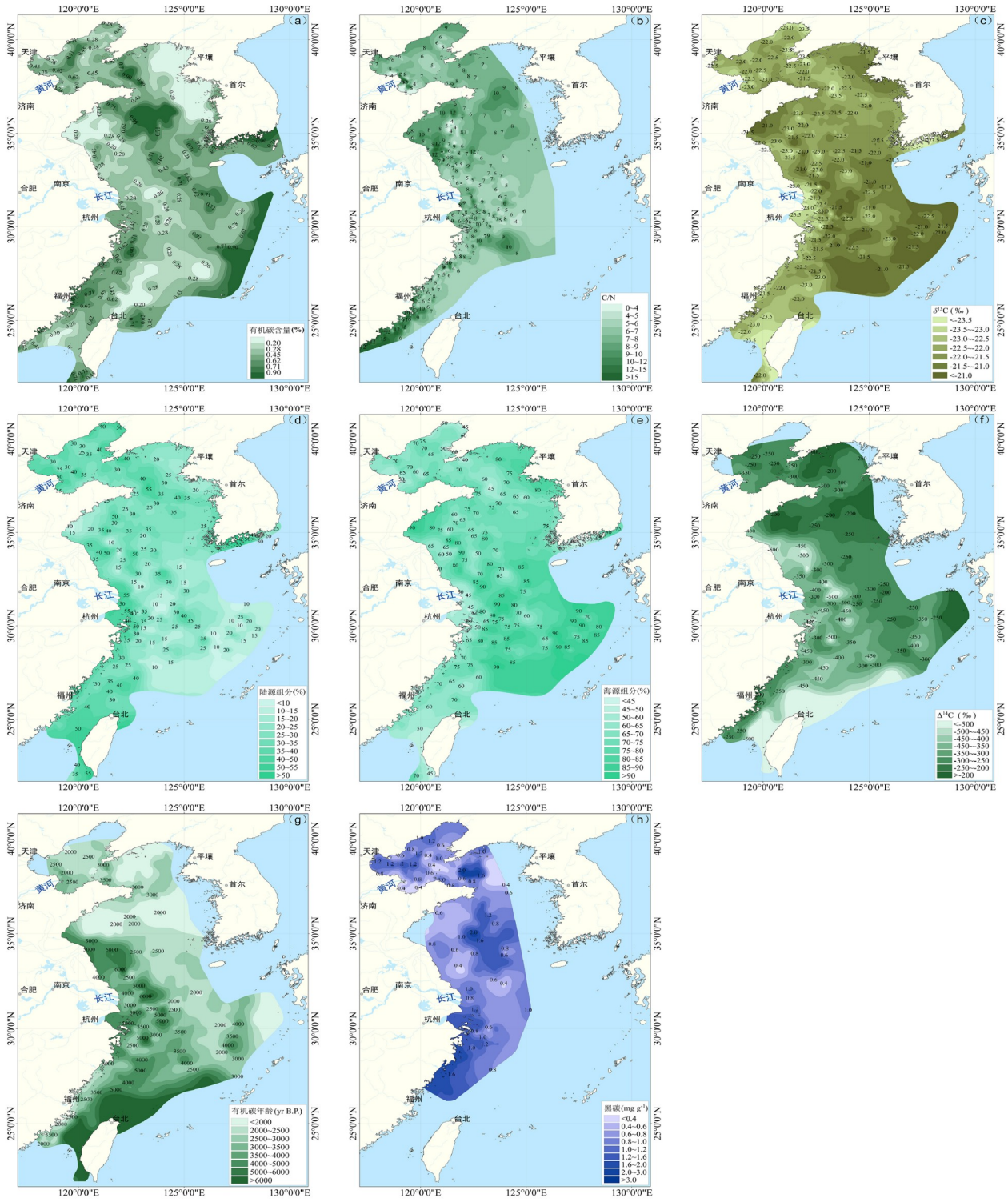

图 2　渤海、黄海和东海沉积有机碳含量(a)、碳氮比(b)、$\delta^{13}C$(c)、陆源有机碳比例(d)、海源有机碳比例(e)、$\Delta^{14}C$(f)、有机碳年龄(g)和黑碳(h)分布图

机碳δ^{13}C值为–25.80‰~–20.00‰, 平均值为–22.13‰±0.91‰(n=988, 图2c), 其高值区(累积频率≥75%, δ^{13}C≥–21.58)主要分布在TOC含量、C/N比值相对均较低的砂质区, 包括北黄海朝鲜半岛一侧、连云港-青岛外海以及东海中、外陆架等区域; 低值区(累积频率≤25%, δ^{13}C≤–22.61‰)主要位于TOC含量、C/N比值相对较高的泥质区. 但是, 长江口外砂质区尽管TOC、C/N比值都较低, 但其δ^{13}C值也较低. 渤海、黄海和东海SOC主要为海源输入(平均为69.5%), 而陆源输入占主导(>50%)的区域主要分布在河口等陆源输入及其搬运路径上, 包括黄河口周边、山东半岛东部沿岸泥质区、废黄河口、浙闽沿岸泥质区、台湾海峡以及台湾岛东北部等区域(图2d). 计算结果表明, 渤海、黄海和东海SOC海源贡献依次升高, 分别为66.5%、68.8%和70.6%. 海源有机碳高值区(累积频率≥75%, 海源组分≥77.5%)通常位于远离陆源输入的海域, 例如渤海中部、东海中外陆架等(图2e). 渤海、黄海和东海SOC陆源贡献依次降低, 分别为33.5%、31.2%和29.4%, 其分布主要受大河输入的影响, 空间分布变化较大. 应用C/N比值判别有机碳来源时, 常因陆源有机碳中N相对匮乏, 导致陆源有机碳组分易被不同C/N比值的混合曲线所低估, 因此可采用N/C比值替代C/N比值进行陆源贡献判别和计算(Perdue和Koprivnjak, 2007). 渤海、黄海和东海沉积物N/C比值为0.04~0.33. 综合TOC、N/C、δ^{13}C组成特征来看(图3), 渤海、黄海和东海SOC由C_3植物、土壤以及海洋浮游植物等多种物源混合而成. 然而如图3所示, 部分站位位于这些潜在端元合围区域外, 这可能与成岩作用和人为活动对N/C和δ^{13}C等原始组成的影响有关(Hu等, 2013). 尽管如此, N/C比值和δ^{13}C值均可表明这些海域SOC来自海洋浮游生产力、土壤和陆源高等植物等多种物源的混合, 其中土壤的贡献比陆源高等植物显著(图3b). 另外, 黄河口、长江口及邻近海域δ^{13}C分布特征与大河入海沉积物的扩散输运路径基本一致(Hu等, 2016), 说明它可以一定程度上作为指示河流入海物质在该海域扩散的特征指标.

渤海、黄海和东海沉积有机碳Δ^{14}C值为–871.1‰~–137.1‰(平均值–311.5‰±114.9‰, n=432; 图2f), 对应年龄为16417~1124a BP(图2g). Δ^{14}C高值区(累积频率≥75%, Δ^{14}C≥–241.2‰, 年龄较轻)主要分布在陆源输入影响显著的泥质区, 主要包括渤海泥质区、山东半岛东部沿岸泥质区东北部和黄海中部泥质区东北部, 对应TOC含量和C/N比值相对较高、δ^{13}C值相对偏负. Δ^{14}C值较高的区域还包括青岛外海、南黄海朝鲜半岛一侧和冲绳海槽北部砂质区, 上述区域TOC含量很低, C/N比值较小、δ^{13}C值相对偏正. 低值区(累积频率≤25%, Δ^{14}C≤–345.9‰, 年龄较老)则主要分布在废黄河口外到南黄海西部的大片海域、长江口外东北部粗粒和细粒沉积过渡带以及台湾海峡中部, 这些区域TOC含量和C/N比值相对较低, 但δ^{13}C值相对偏正. 此外, 从台湾岛北部到冲绳海槽南部等区域Δ^{14}C值也较低, 但此区域TOC含量相对较高, 而C/N比值较低,

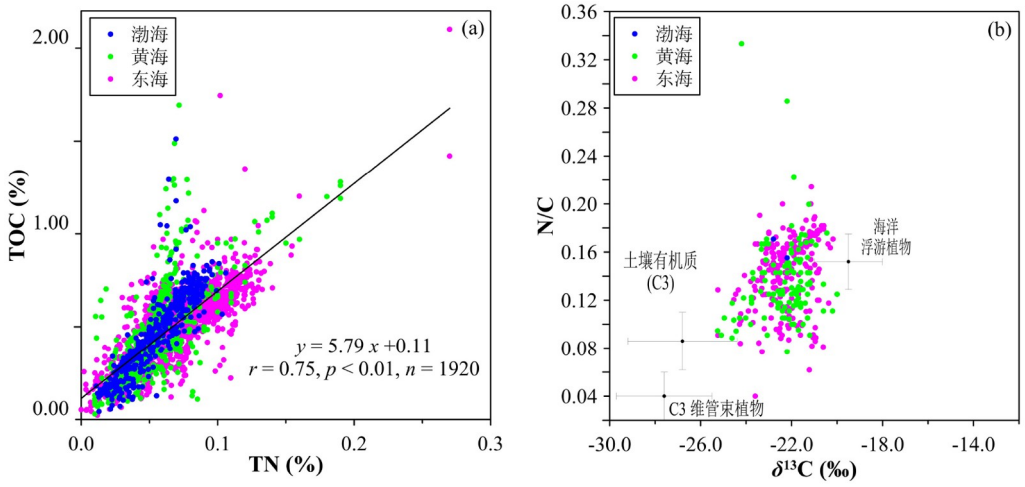

图 3　渤海、黄海和东海TOC-TN(a)和N/C-δ^{13}C(b)散点图

C_3维管束植物、土壤有机质和海洋浮游植物端元值来自Hu等(2016)

δ^{13}C值相对偏负.

渤海、黄海和东海沉积物BC为0.02~3.55mg g^{-1}, 平均值为(0.90±0.50)mg g^{-1}(n=302, 图2h), BC/TOC介于0.01~0.45, 平均值为0.21, 是有机碳的重要组成部分. BC空间分布与TOC分布大体相同, 高值区(累积频率≥75%, BC≥1.13mg g^{-1})均位于细粒沉积区, 指示陆源输入; 与TOC分布不同的是, BC高含量区范围在渤海比渤海泥质区范围小, 在东海比浙闽沿岸泥质区大, 其中中外陆架的高值区主要由烟炱组成, 指示以大气沉降输入为主.

3.2　泥质区有机碳埋藏速率与通量

近百年来渤海沉积速率为0.7~95.9mm a^{-1}, 平均值(14.5±21.8)mm a^{-1}(n=65, 图4a), 其高值区(累积频率≥75%, SR≥8.2mm a^{-1})主要分布在渤海湾海河以南到黄河口的沿岸、莱州湾大部、辽东湾顶部和西南部, 其中海河、黄河和辽河河口及其周边区域为沉积速率极高值区, 最高值出现在黄河口. 沉积速率低值区(累积频率≤25%, SR≤2.0mm a^{-1})分布在渤海湾北侧、渤海中部以及辽东湾中部的大片区域. 渤海泥质区MAR_{OC}为0.2~989.7g C m^{-2} a^{-1}, 平均值(57.3±87.8 g C m^{-2} a^{-1} (图4b). 该区MAR_{OC}高值区(>67.9g C m^{-2} a^{-1})主要集中在海河口和黄河口及其周边区域, 其中黄河口周边MAR_{OC}基本大于160.8g C m^{-2} a^{-1}, 为极高值区. MAR_{OC}低值区主要分布于渤海中部与莱州湾和渤海湾交界海域, 基本小于21.2g C m^{-2} a^{-1}. 根据渤海泥质

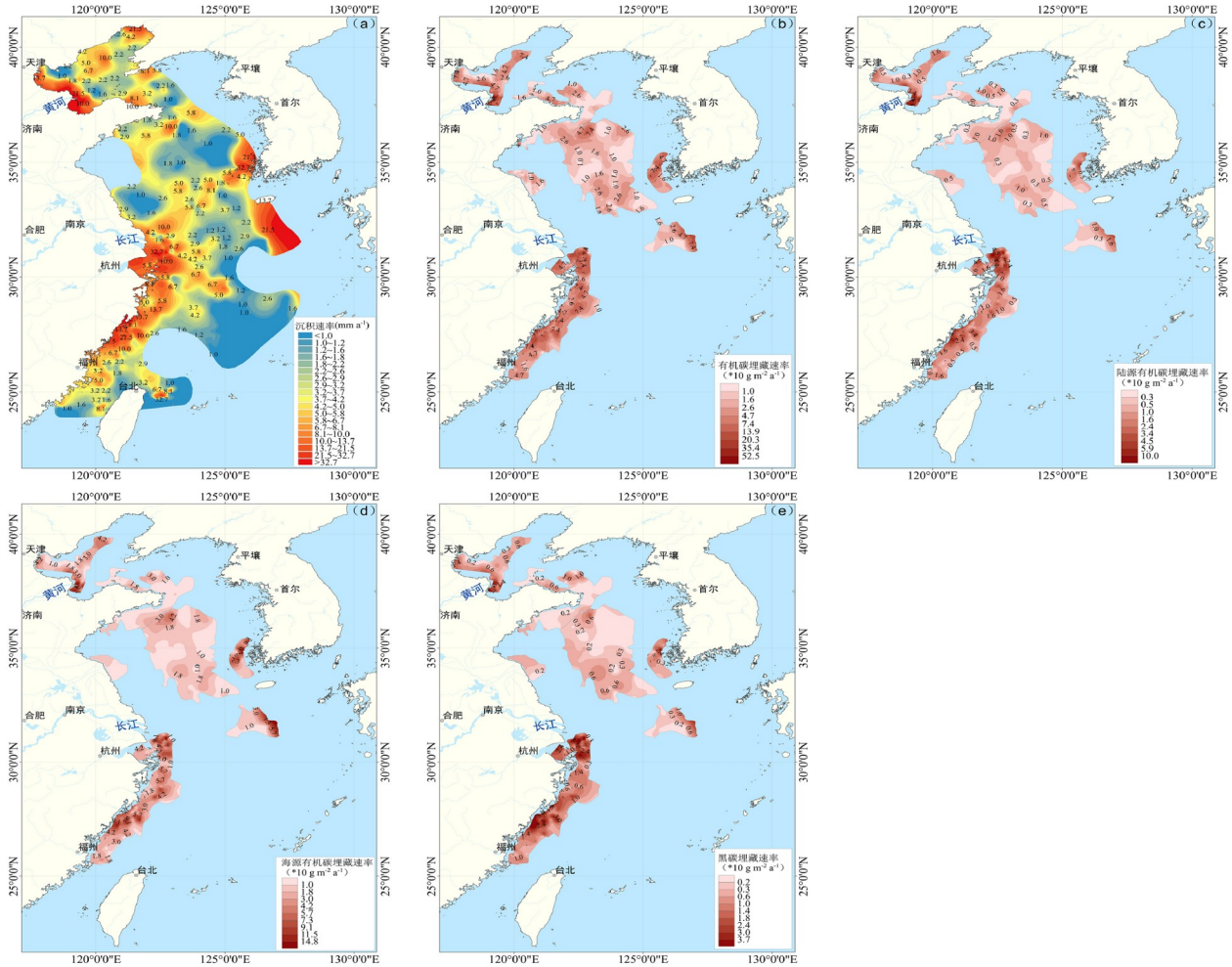

图 4　渤海、黄海和东海现代沉积速率(a)、有机碳埋藏速率(b)、陆源有机碳埋藏速率(c)、海源有机碳埋藏速率(d)和黑碳埋藏速率(e)分布图

区MAR_{OC}和面积, 以实测干密度数据计算得到渤海泥质区OC埋藏通量为1.30Mt C a^{-1}(表1).

黄海沉积速率为0.0~42.9mm a^{-1}, 平均值为(3.2±5.3)mm a^{-1}(n=122, 图4a), 高值区(≥8.2mm a^{-1})主要分布山东半岛北侧沿岸、大连外海、黄海中部泥质区北部、黄海东南部泥质区、长江口以北等区域, 其中黄海东南部泥质区出现极高值, 沉积速率>13.6mm a^{-1}. 低值区(≤2.0mm a^{-1})主要分布在山东半岛东北、南黄海中部以及苏南外海等区域. 黄海泥质区MAR_{OC}(图4b)与沉积速率(图4a)分布大体相似, 但与TOC分布稍有差别. 山东半岛东部沿岸泥质区有机碳埋藏速率为1.4~64.5g C m^{-2} a^{-1}, 平均值(16.4±11.0)g C m^{-2} a^{-1}. 高值区(>39.8g C m^{-2} a^{-1})主要集中在山东半岛北侧沿岸、北黄海中部等靠近黄河物源供应的区域; 低值区主要分布于渤海海峡、山东半岛东侧等海域, 基本小于12.0g C m^{-2} a^{-1}. 黄海中部泥质区MAR_{OC}为1.4~74.5g C m^{-2} a^{-1}, 平均值(16.36±11.1)g C m^{-2} a^{-1}. 其MAR_{OC}高值区(>39.8g C m^{-2} a^{-1})主要集中在该区西北部; 低值区(<12.0g C m^{-2} a^{-1})主要分布于该区中部和北部. 废黄河口泥质区MAR_{OC}为2.4~51.5g C m^{-2} a^{-1}, 平均值(15.0±8.5)g C m^{-2} a^{-1}. 其中MAR_{OC}高值区(19.9~39.8g C m^{-2} a^{-1})主要集中在该区东侧; 低值区(<12.0g C m^{-2} a^{-1})主要分布于南部靠陆一侧. 黄海东南部泥质区MAR_{OC}为8.0~175.3g C m^{-2} a^{-1}, 平均值(55.1±33.7)g C m^{-2} a^{-1}. 该区MAR_{OC}均较高, 高值区(>39.8g C m^{-2} a^{-1})主要分布在该区中部和北部, 其中在该区靠近韩国近岸边缘出现极高值区, >57.7g C m^{-2} a^{-1}. MAR_{OC}低值区(<12.0g C m^{-2} a^{-1})小范围出现在该区中东部. 黄海各泥质区有机碳埋藏通量分别为山东半岛东部沿岸泥质区0.56Mt C a^{-1}、黄海中部泥质区1.56Mt C a^{-1}、废黄河口泥质区0.11Mt C a^{-1}、黄海东南部泥质区0.48Mt C a^{-1}, 合计2.71Mt C a^{-1}.

东海沉积速率为0.0~63.0mm a^{-1}, 平均值为(8.1±11.1)mm a^{-1}(n=378, 图4a). 其高值区(≥8.2mm a^{-1})主要分布在浙闽沿岸泥质区、济州岛西南泥质区东部、台湾北部等海域; 低值区(≤2.0mm a^{-1})主要分布在东海中外大陆架、冲绳海槽等区域. 济州岛西南泥质区MAR_{OC}为0~205.4g C m^{-2} a^{-1}, 平均值(33.1±38.1)g C m^{-2} a^{-1}(图4b). 该区MAR_{OC}高值区(>39.8g C m^{-2} a^{-1})主要分布在该区东部, 低值区(<12.0g C m^{-2} a^{-1})分布在该区中西部. 浙闽沿岸泥质区MAR_{OC}为6.1~388.5g C m^{-2} a^{-1}, 平均值(59.2±38.6)g C m^{-2} a^{-1} (图4b). MAR_{OC}高值区(>39.8g C m^{-2} a^{-1})广泛分布在泥质区, 呈斑块状, 其中长江口、杭州湾外等处出现极高值(>57.7g C m^{-2} a^{-1}).

表 1　渤海、黄海和东海沉积有机碳埋藏通量和埋藏效率[a)]

海区	泥质区	面积 (km^2)[#]	沉积物埋藏通量 (Mt C a^{-1})	OC埋藏速率 (g C m^{-2} a^{-1})	埋藏通量(Mt C a^{-1})						埋藏效率(%)		
					OC	OC_{ter}	OC_{mar}	OC_{petro}	OC_{bio}	BC	OC_{ter}	OC_{mar}	OC
渤海	M1	18856.2 (24.4%)	245.4	57.3±87.8	1.30	0.45	0.85	0.11	1.08	0.14	94	40	50
黄海	M2	34487.7 (9.1%)	115.4	16.4±11.0	0.56	0.18	0.38	0.06	0.55	0.09	33	9	11
	M3	89628.0 (23.6%)	243.3	16.36±11.1	1.56	0.45	1.11	0.16	1.73	0.27			
	M4	8855.5 (2.0%)	30.9	15.0±8.5	0.11	0.04	0.07	0.005	0.09	0.02			
	M5	7447.8 (1.2%)	77.0	55.1±33.7	0.48*	0.10	0.35	–	–	–			
东海	M6	16254.0 (2.2%)	83.4	33.1±38.1	0.54	0.09	0.45	0.04	0.16	–	37	18	21
	M7	61674.5 (8.2%)	613.7	59.2±38.6	3.65	1.26	2.39	0.47	3.31	0.86			
合计		237203.7			8.20	2.57	5.60	0.85	6.92	1.38	39	14	17

a) * OC与OC_{ter}和OC_{mar}埋藏通量数值差异系该泥质区SOC数据少, 插值误差引起; OC与OC_{petro}和OC_{bio}埋藏通量差异系$\Delta^{14}C$数据与SOC数据量不等, 插值误差引起. [#] 泥质区面积占所在海区面积的百分比. M1~M7分别代表渤海泥质区、山东半岛东部沿岸泥质区、黄海中部泥质区、废黄河口泥质区、黄海东南部泥质区、济州岛西南泥质区、浙闽沿岸泥质区

MAR_{OC}低值区(<12.0g C m^{-2} a^{-1})仅少量分布在泥质区向海一侧边缘. 根据泥质区MAR_{OC}和面积计算得到: 济州岛西南泥质区有机碳埋藏通量为0.54Mt C a^{-1}, 浙闽沿岸泥质区有机碳埋藏通量为3.65Mt C a^{-1}, 东海泥质区有机碳埋藏通量合计为4.19Mt C a^{-1}(表1).

沉积有机碳中陆源有机碳、海源有机碳和黑碳的埋藏速率空间分布见图4c~4e, 其埋藏通量如表1所示. 岩源有机碳和生源有机碳等相关数据见表2, 埋藏通量见表1, 其中渤海、黄海、东海OC_{bio}埋藏通量分别为1.08、2.37和3.47Mt C a^{-1}, 总计6.92Mt C a^{-1}.

3.3　泥质区有机碳埋藏效率

黄河、海河和辽河等12条渤海最主要河流, 其沉积物年输出通量多年平均为780.1Mt a^{-1}, 颗粒有机碳(Particulate Organic Carbon, 以下简称POC)年输出通量为0.60Mt C a^{-1}(表3). 黄河有机碳入海通量约占渤海入海河流的三分之二, 其剧烈变化显著影响渤海河流物质输入总量(Ke等, 2023; Lu等, 2023). 过去百年来黄河入海物质通量以1968年为界分为两个显著不同的阶段: 1968年之前主要由自然因素控制, 水沙输入量较高; 1968至今由于人类采取了筑坝和水土保持等措施, 水沙输入量剧烈减少. 研究中采用分阶段平均校正得到黄河百年尺度上径流量为354.6×10^8 m^3 a^{-1}, 输沙量为1026.0Mt a^{-1} (Qiao等, 2017), 由此计算得到渤海河流POC输入通量为0.68Mt C a^{-1}. 渤海通过渤海海峡与黄海进行物质交换, 据区域百年尺度沉积物收支计算, 渤海每年向黄海输送的沉积物约占渤海河流入海通量的30%(Qiao等, 2017), 因此渤海陆源有机碳输入通量约为河流输入的70%, 即0.48Mt C a^{-1}, 以此计算渤海泥质区陆源有机碳的埋藏效率约为94%. 该结果显示, 沿岸、水下三角洲侵蚀和海底再悬浮可能是渤海陆源有机碳的潜在输入源. 根据渤海平均初级生产力数值(112g C m^{-2} a^{-1})(宋金明等, 2008)和渤海泥质区面积(18.86×$10^3$$km^2$), 计算得到的泥质区海源有机碳输入通量为2.11Mt C a^{-1}. 据此得出渤海泥质区海源有机碳埋藏效率为40%. 进一步计算得到渤海泥质区沉积有机碳埋藏效率约为50%.

黄海沉积物的主要来源为黄河的远距离搬运(~376.6Mt a^{-1})和废黄河口水下三角洲的侵蚀(~23.7Mt a^{-1})(Qiao等, 2017), 直接流入黄海的淮河、鸭绿江、汉江和锦江(Keum)等河流沉积物入海通量仅约占黄海沉积物年输入通量的千分之二(0.9Mt a^{-1}, 表3). 利用黄河POC平均含量(0.48%±0.14%)(Wang等, 2012)、废黄河口表层沉积物TOC平均含量(0.40%; Deng等, 2006)、黄海直接入海河流POC通量数据(0.46Mt C a^{-1}, 表3)、黄海泥质区面积以及黄海各泥质区陆源有机碳埋藏速率, 计算得出黄海泥质区陆源有机碳输入通量是2.36Mt C a^{-1}, 由此得到黄海陆源有机碳埋藏效率为33%. 根据黄海平均初级生产力(159g C m^{-2} a^{-1})(宋金明等, 2008)、黄海泥质区面积(140.4×10^3 km^2), 计算得到的海源有机碳输入通量为22.32Mt C a^{-1}, 埋藏效率仅为9%. 综合来看, 黄海泥质区沉积有机碳埋藏效率约为11%(表1).

长江、钱塘江、闽江以及台湾地区河流等13条流入东海的最主要河流, 其沉积物年输入通量平均为482.3Mt a^{-1}, POC年输入通量为2.73Mt C a^{-1}(表3). 此外, 废黄河口水下三角洲侵蚀和沿岸侵蚀也是东海泥质区沉积物重要来源, 可达238Mt a^{-1}(Qiao等, 2017),

表 2　渤海、黄海和东海泥质区Fm_{bio}、OC_{petro}、OC_{bio}、$OC_{bio\text{-}ter}$和$OC_{bio\text{-}mar}$ a)

泥质区	Fm_{bio}	OC_{petro}(%)	OC_{bio}(%)	$OC_{bio\text{-}ter}$(%)	$OC_{bio\text{-}mar}$(%)
渤海泥质区(M1)	0.79	0.045	0.44±0.16	0.09±0.05	0.35±0.12
山东半岛东部沿岸泥质区(M2)	0.86	0.050	0.48±0.34	0.12±0.10	0.37±0.23
黄海中部泥质区(M3)	0.85	0.065	0.71±0.32	0.18±0.10	0.53±0.22
废黄河口泥质区(M4)	0.60	0.015	0.28±0.15	0.08±0.05	0.20±0.10
*黄海东南部泥质区(M5)	–	–	–	–	–
济州岛西南泥质区(M6)	0.79	0.044	0.56±0.11	0.13±0.03	0.42±0.08
浙闽沿岸泥质区(M7)	0.65	0.026	0.54±0.11	0.14±0.03	0.40±0.08

a) * 黄海东南泥质区(M5)数据暂缺. Fm_{bio}, 现代生物有机碳比值; OC_{petro}, 岩源有机碳; OC_{bio}, 生源有机碳; $OC_{bio\text{-}ter}$, 陆源生源有机碳; $OC_{bio\text{-}mair}$, 海源生源有机碳

表 3　渤海、黄海和东海周边29条主要河流(长度>100km)颗粒有机碳(POC)通量估算[a)]

河流名称	海区	年均径流量* (10^8 m^3 a^{-1})	年均输沙量* (10^4 t a^{-1})	POC平均浓度 (mg L^{-1})	POC通量# (10^2 t C a^{-1})	POC浓度数据来源
黄河	渤海	301.4	72,200	15.26	4599	Ran等(2013)
海河		8.20	7.38	8.05	66	Xia和Zhang (2011)
辽河/双台子		29.35	417	8.58	252	Xia和Zhang (2011)
大凌河		19.63	2,740	15.71	310	Xia和Zhang (2011)
小凌河		4.03	364	6.52	56	Xia和Zhang (2011)
六股河		6.02	148	2.57	15	Xia和Zhang (2011)
滦河		46.51	1,739	9.26	431	Xia和Zhang (2011)
大清河		2.27	49.9	2.75	6	Xia和Zhang (2011)
子牙新河		3.09	38.6	11.31	35	Xia和Zhang (2011)
马颊河		2.93	76.0	14.06	41	Xia和Zhang (2011)
徒骇河		8.97	157	8.74	78	Xia和Zhang (2011)
小清河		8.78	36.9	7.54	66	Xia和Zhang (2011)
淮河	黄海	21.16	212	4.85	105	刘军等(2015)
鸭绿江		289.47	373	3.36	973	刘军等(2015)
汉江		170.00	100	5.77	981	刘军等(2015)
锦江		420	220	6.03	2532	刘军等(2015)
长江	东海	8964.00	39,000	1.98	17749	Wang等(2012)
钱塘江		11.60	17.1	1.94	23	鲍红艳(2013)
闽江		37.31	54.3	3.14	117	刘军等(2015)
九龙江		148.00	307	1.03	152	Yang等(2013)
曹娥江		45.30	128.7	12.84	582	鲍红艳(2013)
甬江		34.50	35.9	2.95	102	鲍红艳(2013)
椒江		6.66	123	9.13	61	鲍红艳(2013)
瓯江		332.00	266.5	3.67	1218	鲍红艳(2013)
飞云江		44.50	68.7	20.00	890	鲍红艳(2013)
淡水溪		70.43	1145	20.88	1741	Kao等(2014)
曾文溪		16.40	18	63.21	1037	Kao等(2014)
乌溪		37.27	679	26.52	988	Kao等(2014)
浊水溪		60.95	6387	42.9	2615	Kao等(2014)

a) * 年均径流量和输沙量数据来自中华人民共和国水利部(2011)、中国海湾志编纂委员会(1998)、Kao和Milliman(2008), 其中黄河(1952~2010)、滦河(1950~1984)、辽河(1987~2010)、海河(1960~2010)、鸭绿江(1965~1974)、淮河(1951~2010)、长江(1950~2010)、钱塘江(1956~2010)、闽江(1952~2010)、九龙江(1950~1979)等河流的水、沙量为多年平均值. # POC通量=POC平均浓度×年均径流量

根据废黄河口TOC平均含量(0.40%; Deng等, 2006), 计算得到的东海陆源有机碳输入通量为0.95Mt C a^{-1}. 据前人研究, 本文统计的台湾地区4条主要河流沉积物绝大部分沉积在台湾海峡(Huh等, 2011). 因此, 东海陆源有机碳输入通量为3.68Mt C a^{-1}, 其埋藏效率约为37%. 根据东海平均初级生产力(204g C m^{-2} a^{-1})(宋金明等, 2008)、东海泥质区面积(77.9×10^3km^2)以及东海各泥质区$MAR_{OC\text{-}mar}$和面积积分, 计算得到东海泥质区海源有机碳输入通量为15.89Mt C a^{-1}, 埋藏通量为2.84Mt C a^{-1}(济州岛西南泥质区0.45Mt C a^{-1}; 浙闽沿岸泥质区2.36Mt C a^{-1}), 埋藏效率仅为18%. 综合来看, 东海泥质区沉积有机碳埋藏效率约为21%(表1).

总体来说, 渤海、黄海和东海沉积速率为0.0~95.9mm a^{-1}(n=565, 图4a), 其高值区主要集中在黄河、长江等大河河口及其近岸区域. 泥质区有机碳埋藏速率为0.0~989.7g C m^{-2} a^{-1}, 平均值为32.9g C m^{-2} a^{-1}

(图4b). MAR_{OC}分布具有显著的空间非均匀性, 高值区分布在黄河口及其周边海域, 次高值区主要分布在长江口及浙闽泥质区. 此外海河口、辽河口、瓯江口以及山东半岛东部沿岸泥质区、南黄海中部泥质区、黄海东南泥质区等局部海域有机碳埋藏速率也较高. 有机碳埋藏速率和沉积速率、有机碳含量分布等密切相关. 渤海、黄海和东海有机碳埋藏通量分别为1.30、2.71和4.19Mt C a^{-1}, 总计约为8.20Mt C a^{-1}, 有机碳埋藏效率分别为50%、11%和21%.

4　讨论

4.1　有机碳分布、埋藏及其控制因素

4.1.1　有机碳空间分布及影响因素

渤海、黄海和东海沉积物以陆源碎屑沉积为主, 只是在冲绳海槽区域沉积物中含有较高的生物源组分和火山源组分. 海区沉积物在黑潮及其分支、潮流、风暴潮和沿岸流等复杂的水动力作用下发生分异, 形成了细粒级泥质沉积区、粗粒级砂质沉积区和混合沉积区, 只在部分区域出现含砾沉积物、基岩和岩块. 渤海、黄海和东海陆架广泛分布有泥质沉积区(石学法等, 2021). 这些泥质区的沉积物主要为黏土质粉砂和粉砂质黏土, 潮流和波浪等动力一般较弱、沉积速率较高、沉积连续, 是污染物和营养盐的重要载体, 也是沉积有机碳的主要汇区(Huh等, 2011; Qiao等, 2017; Jia等, 2018; 石学法等, 2021). 渤海、黄海和东海TOC含量高值区分布趋势与细粒沉积区分布基本一致(图1b), 呈现显著的粒度控制分布特征. 研究区域内TOC含量与沉积物平均粒径和细粒组分(黏土和粉砂)呈显著正相关(r=0.44~0.53, p<0.01, n=3848; 图5a, 5b和5c), 而与粗粒组分(砂)呈显著负相关(r=–0.52, p<0.01, n=3848; 图5d), 这解释了TOC在泥质区含量相对较高, 而在渤海东部与东北部、北黄海中东部、苏北浅滩和东海中外陆架等砂质区普遍较低的分布格局. BC是渤海、黄海和东海SOC的重要组成部分. BC空间分布特征(图2h)与TOC和OC_{ter}(图2a和2d)类似, 也具有显著的粒度控制分布特征(p<0.01; 图6), 这进一步印证了其高度亲颗粒特性促使其在细粒沉积物中被吸附和埋藏. 当然, 中国东部近海沉积物中TOC和BC的分布特征还与其物源和人为排放格局等密切相关. 例如, 长江口和浙闽沿岸部分SOC受到河流输入和航运活动排放的石油烃类的影响(Hu等, 2013); 环渤海经济圈是我国BC排放强度最高的区域, 渤海和黄海沉积BC显著受到该物源分布格局的影响(Fang等, 2015, 2019).

有机碳平均含量可表征不同沉积单元数据差别, 中位值则用来描述特定沉积单元数据的集中趋势. 渤海、黄海和东海泥质区TOC含量平均值(0.57%±0.23%, n=2128)比非泥质区(0.41%±0.25%, n=3668)高39%; 泥质区TOC含量中位值(0.57%)比非泥质区(0.37%)高54%(图7a). 从各个海区来看, 渤海泥质区TOC含量平均值(0.55%±0.21%, n=461)比该区非泥质区(0.36%±0.20%, n=1024)高53%; 泥质区TOC含量中位值(0.55%)比非泥质区(0.34%)高62%(图7b). 黄海泥质区TOC含量平均值(0.61%±0.21%, n=773)比该区非泥质区(0.35%±0.21%, n=1314)高74%; 泥质区TOC含量中位值(0.51%)比非泥质区(0.32%)高59%(图7b). 东海泥质区TOC含量平均值(0.59%±0.14%, n=884)比该区非泥质区(0.51%±0.30%, n=1311)高16%; 泥质区TOC含量中位值(0.59%)比非泥质区(0.46%)高26%(图7b). 研究区内TOC含量与粉砂组分和黏土组分呈显著正相关(r=0.48 *vs.* 0.44, p<0.01), 这也在一定程度上反映了细粒组分比粗粒组分更易吸附有机碳.

水动力可对颗粒物所吸附的OC进行选择性运输, 粗粉砂具非黏结性, 易再悬浮和再搬运, 与之结合的有机碳便可被长时间搬运, 易被选择性降解, 导致其OC含量较低, 年龄较老; 而细粒的黏土黏结性强, 分散性能力弱, 不易被降解, 因而OC含量较高, 年龄较轻(Ausín等, 2021). 黄河和长江入海POC年龄显著不同, 前者入海有机碳显著偏老(4000~8000a BP), 表明黄河OC入海前已经高度降解, 具有难降解特性; 而长江POC年龄相对较年轻, 约为800~1060a BP(Wang等, 2012). 黄河口周边SOC年龄均较老(>2500a BP; 图2g), 但在黄河沉积物扩散路径上, 渤海泥质区、山东半岛东部沿岸泥质区和黄海中部泥质区部分区域沉积物中有机碳的含量显著高于黄河口周边, 并伴随着海源组分的升高($\delta^{13}C$、$\Delta^{14}C$、Fm_{bio}值的升高)(图2c和2f, 表2), 这可能是海洋初级生产产生的年轻有机碳稀释了黄河输入的老化有机碳, 导致了渤海和黄海泥质区中的SOC年龄整体相对较轻(图2g). 另外, 黄河沉积物在渤海和黄海的扩散路径上, 平均粒径有增加趋势, 尤其是山东半岛东部沿岸泥质区近岸粉砂含量明显增加

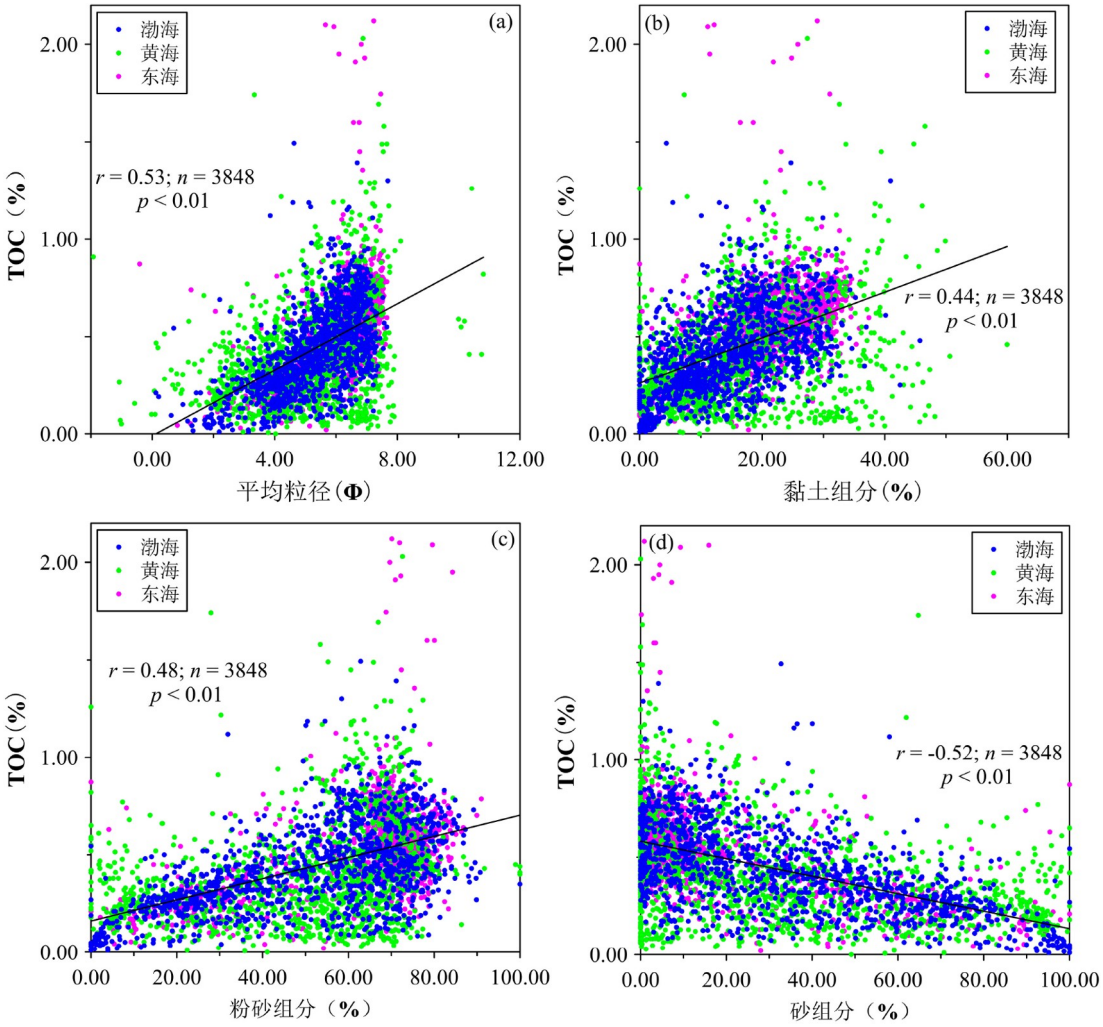

图 5　渤海、黄海和东海沉积有机碳与沉积物平均粒径(a)、黏土组分(b)、 粉砂组分(c)和砂组分(d)相关关系

(石学法, 2012), 其OC含量较低, 年龄与黄河沉积物相近(图2g), 可能反映出沉积物粉砂粒级组分携带的OC年龄相对较老.

东海近岸泥质区强烈的再悬浮作用导致SOC的氧化和老化. 如图2a所示, 浙闽沿岸泥质区SOC含量显著高于长江口, 但OC年龄却比长江口轻, 这可能与浙闽沿岸泥质区大部分海域黏土组分要高于长江口有关(石学法, 2012). 与黄海类似, 长江入海沉积物向浙闽沿岸泥质区和济州岛西南泥质区搬运过程中也出现了TOC含量(图2a)、海源有机碳组分(图2e)、$\Delta^{14}C$值(图2f)的升高, 同时有机碳年龄变轻(图2g), 这与新鲜海源有机碳的生产和埋藏有关. 总体上, 渤海、黄海和东海沉积物在长距离运输过程中伴随着不同粒径沉积物的分选, 不仅发生了陆源有机碳的降解, 还伴随着新鲜海源有机碳的输入(例如, Bao等, 2016). 持续不断的新鲜海源有机碳供应是中国东部陆架沉积有机碳中海源贡献占主导的主要原因.

4.1.2　不同泥质区有机碳埋藏效率差异与控制机制

渤海泥质区是由黄河入海物质向东和向北运移进入渤海湾和渤海中部堆积形成的(刘建国等, 2007; Qiao等, 2017). 现代黄河入海沉积物除大部分沉积在渤海中部外, 还有部分被沿岸流搬运到黄海(Alexander等, 1991; Qiao等, 2017). 山东半岛东部沿岸泥质区沉积物主要来自长距离输入的黄河物质, 也受沿岸侵蚀和周边中小河流输入的影响(Liu等, 2001). 黄海中部

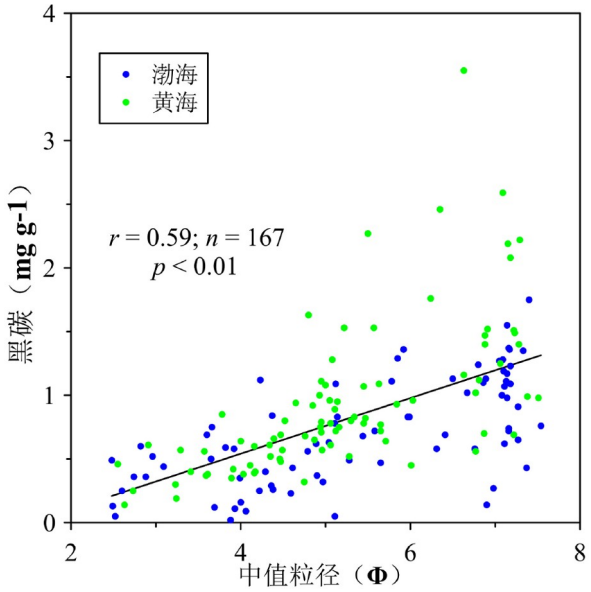

图 6　渤海和黄海黑碳与沉积物中值粒径的相关关系

泥质区主要受气旋型涡旋影响形成，沉积物主要来自黄河、废黄河口侵蚀再搬运沉积物等(Shi等, 2002; Wang等, 2014). 黄海泥质区沉积物绝大部分为远距离陆源输入，并在沿岸流与潮流等作用下不断地搬运、沉积、再悬浮(Yang和Liu, 2007; Liu等, 2009). 大部分进入黄海的陆源有机碳经过长距离的搬运、沉积、再悬浮等过程，矿化严重(Hu等, 2016). 黄海中部泥质区弱动力环境和水体分层使得进入此区域的细粒沉积物得以滞留并得到较好的保存(Shi等, 2002; Dong等, 2011; Guo等, 2021). 废黄河口泥质区沉积物主要为老黄河三角洲及侵蚀物质，黄海东南部泥质区则受到朝鲜半岛物源等影响(Qiao等, 2017). 有机碳主要吸附在细粒矿物颗粒表面，并随海流搬运至黄海的远端泥质区. 鉴于黄海泥质区无大河直接输入，并远离黄河物质的影响，其沉积水动力环境及其影响下形成的泥质沉积可能是制约黄海沉积有机碳搬运和埋藏的重要机制(Hu等, 2016). 有机碳稳定同位素的分布特征与黄河入海沉积物的扩散路径具有较好的一致性，揭示了大河输入和陆架沉积水动力环境对本区陆源沉积有机碳选择性输运的控制作用(Hu等, 2013).

东海沉积有机碳与沉积物平均粒径密切相关，其高值区主要位于长江口和内陆架泥质区，显示水动力及沉积物粒度分布是该区域TOC分布的重要影响因素. 长江细粒级沉积物和有机碳进入东海后首先在长江口短暂沉积，并在沿岸流的影响下随后向南搬运并

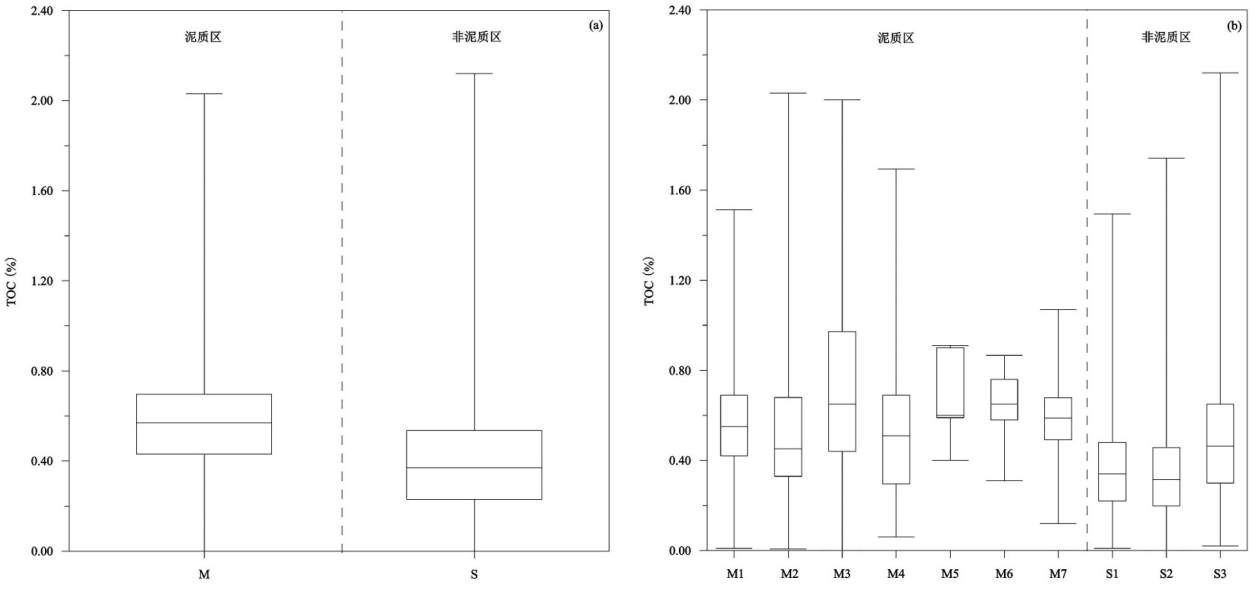

图 7　渤海、黄海和东海泥质区和非泥质区沉积有机碳含量对比(a)和泥质区和非泥质区分区沉积有机碳含量对比(b)

M, 泥质区, *n*=2128; S, 非泥质区, *n*=3668; M1, 渤海泥质区, *n*=461; M2, 山东半岛东部沿岸泥质区, *n*=400; M3, 黄海中部泥质区, *n*=218; M4, 废黄河口泥质区, *n*=146; M5, 黄海东南部泥质区, *n*=9; M6, 济州岛西南泥质区, *n*=19; M7, 浙闽沿岸泥质区, *n*=865; S1, 渤海泥质区以外区域, *n*=1024; S2, 黄海泥质区以外区域, *n*=1314; S3, 东海泥质区以外区域, *n*=1311

最终在台湾暖流顶托下在内陆架沉积(Liu等, 2007; Liu等, 2018, 2021). 浙闽沿岸泥质区中的沉积物受到强潮、浪、沿岸流和冬季风暴潮和上升流的影响不断地再悬浮、再搬运和再沉降, 有机质矿化作用强烈(Yao等, 2014; Sun等, 2020a; Wei等, 2022), 但在台湾暖流顶托下, 长江输入的绝大部分有机碳仍在该区域内沉积和埋藏(Bao等, 2018; Wu等, 2020). 通过对长江口及邻近陆架区的沉积物不同密度和不同粒级的有机碳组成研究, 发现陆源有机碳主要富集在密度小的颗粒物上, 海源有机碳则优先富集在密度大的颗粒物上, 富含木质素的新鲜植物碎屑主要与粗颗粒相吸附, 并优先堆积在河口附近, 而贫木质素、降解程度较高的土壤有机碳则主要赋存在细颗粒物上, 可输运到离河口较远的位置(Wang等, 2015). 因此, 东海的水动力分选过程对陆源有机碳和海洋源有机碳在河口外的输运和分散过程中发挥着重要作用. 总体看来, 渤海和黄海大部水深较浅, 沉积环境相对稳定, 有利于有机碳的保存; 而东海陆架宽广并受到强水动力环境的影响, 沉积物再悬浮和再搬运作用强烈, 沉积环境往往多变, 加剧了有机碳的矿化(DeMaster等, 1985; Su和Huh, 2002; Bao等, 2018; Wu等, 2020; Guo等, 2021; Zhao等, 2021). 因此, 东海泥质区陆源有机碳埋藏效率(37%)显著低于渤海泥质区(94%).

渤海泥质区直接受黄河等输入的影响, 水浅且沉积环境较稳定, OC_{ter}埋藏效率较高. 黄海泥质沉积区远离直接的陆源输入, 尽管沉积环境稳定, 但是SOC经过长距离搬运, OC_{ter}埋藏效率较低. 东海在长江和其他区域河流的直接输入下, 尤其长江口和内陆架受强水动力影响, 沉积环境空间变化较大, 沉积有机碳矿化强烈, 有机碳埋藏效率相对较低(图8). 综上所述, 渤海、黄海和东海的泥质沉积区是我国东部近海沉积物有机碳的主要埋藏地区, 水动力条件是控制沉积有机碳分布的主要因素.

4.2 中国东部近海沉积有机碳埋藏的碳汇效应

基于沉积物收支计算的中国东部近海近百年来沉积有机碳埋藏通量为8.20Mt C a^{-1}(表1), 约占全球近岸埋藏通量(130Mt C a^{-1}; Berner, 1982)的6.3%, 全球海底埋藏通量(157Mt C a^{-1}; Berner, 1982)的5.3%. 这其中除OC_{petro}对大气CO_2无实质贡献外, OC_{bio}代表了对降低大气CO_2具有直接作用的沉积有机碳组分, 渤海、黄海、东海OC_{bio}埋藏通量分别为1.08、2.37和3.47Mt C a^{-1}, 总计6.92Mt C a^{-1}(表1), 该通量显著高于中国近海红树林(约0.09Mt C a^{-1})、盐沼(0.26Mt C a^{-1})和海草床(约0.01Mt C a^{-1})等湿地蓝碳碳汇(焦念志等, 2018), 而与我国东部九大水系流域硅酸盐风化强度(5.05~7.52Mt C a^{-1}; 吴卫华等, 2011)相当. 在自然状态下, 中国东部近海沉积物中每年可固定的有机碳相当于25.37Mt大气CO_2, 具有非常可观的碳汇效应.

筑坝等人类活动会显著降低河流入海沉积物通量(Wang等, 2016), 这一方面直接降低了OC_{ter}输入通量, 另一方面也间接促进了三角洲和近岸的侵蚀, 导致沉积物再悬浮, 加剧了OC矿化, 从而降低OC的保存和埋藏(Syvitski等, 2005; Gao等, 2019). 自1960以来, 在中国东部入海的两条世界性大河长江和黄河在人类筑坝等活动影响下, 入海沉积物逐渐减少, 深刻改变了陆架OC搬运过程和埋藏格局(Yu等, 2011; Li等, 2015; Sun等, 2020b; Wang 等, 2020; Lu等, 2022). 自2003年三峡

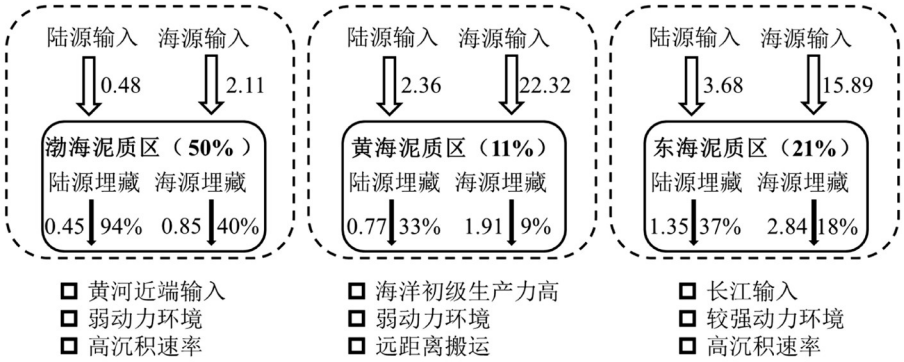

图 8　渤海、黄海和东海泥质沉积区有机碳收支与埋藏环境示意图

有机碳通量单位: Mt C a^{-1}

水库和1999年小浪底水库蓄水以来，长江和黄河输沙量快速下降，其年平均输沙量分别仅为1950~2010年多年平均的33%和14%. 据估算, 筑坝后长江入海OC_{ter}通量下降了15%(Sun等, 2020b); 相对黄河、长江多年输沙通量的平均值，筑坝后渤海、黄海和东海OC_{ter}埋藏通量下降则多达66%(Zhao等, 2021). 筑坝活动还导致河流入海OC的来源和组成发生改变, 例如小浪底大坝蓄水后，下游河床沉积物成为入海有机质的主要供应源，其年龄比黄土高原段黄河POC年轻约2400a(Lu等, 2022). 因此，筑坝活动不仅显著改变了我国东部陆架OC埋藏的分布格局和通量, 还影响到近海沉积碳汇埋藏潜力.

4.3　中国东部近海沉积有机碳埋藏控制因素

中国东部近海每年接收大量来自长江和黄河的颗粒物、OC和营养盐, 在水动力作用的影响下形成了多个泥质区(Qiao等, 2017), 且不同泥质区的OC来源和沉积环境差异显著(Hu等, 2009, Hu等, 2012, 2013), 导致其OC的输运埋藏模式存在明显差异(Bao等, 2016; Hu等, 2016; Zhao等, 2021). 渤海、黄海和东海SOC的高含量区主要分布在细粒泥质区(图2a). OC来源以海洋自生源为主，高值区主要分布在渤海东部及东北部、黄海东部和东海中、外陆架等区域；陆源有机碳高值区主要分布在河口和近岸区域，河口等局部区域具有显著的陆源输入信号; 人类活动来源的BC通过大气沉降和河流输入方式入海后, 集中分布在细粒沉积区. 整体上看，陆架泥质区TOC和OC_{ter}含量要显著高于非泥质区. 从现代沉积作用来看，渤海和黄海的泥质区属于较稳定的沉积环境，SOC的空间分布格局与细颗粒沉积物的输运过程具有较好的一致性(Qiao等, 2017); 渤海和黄海大部水深较浅、沉积环境相对稳定，有利于OC保存；而东海陆架宽广并受到强水动力的影响, 沉积物再悬浮和再搬运作用强烈，沉积环境多变，则加剧了有机碳的迁移和转化. 研究还发现输运过程中发生的再悬浮-再沉积循环可引起部分活性OC的选择性输运降解(Hu等, 2013; Bao等, 2018), 因此物源输入和水动力条件是控制中国东部近海沉积有机碳分布和埋藏的主要因素.

中国东部近海泥质区SOC的总埋藏通量约为8.20Mt C a^{-1}, 其中, OC_{mar}埋藏通量约为5.60Mt C a^{-1}(约68%), OC_{ter}埋藏通量约2.57Mt C a^{-1}(约32%)(表1). 从SOC埋藏效率的角度看，渤海泥质区OC的埋藏效率(约50%)高于黄海(约11%)和东海(约21%)，这与其水深较浅、较高的沉积速率、高惰性OC_{ter}比例(导致更高的碳埋藏效率，达94%)(表1)和稳定的沉积环境有关. 从不同来源OC的埋藏效率来看，OC_{ter}的埋藏效率显著高于OC_{mar}，其中渤海泥质区OC_{ter}的埋藏效率(约94%)高于OC_{mar}(约40%)，黄海泥质区OC_{ter}的埋藏效率(约33%)显著高于OC_{mar}(约9%)(表1). 渤、黄海泥质区较高的OC_{ter}埋藏效率可能是因为受黄河大量输入的陈化有机碳的影响(Tao等, 2016)，而反复的沉积-再悬浮过程则强化了沉积物的长距离-选择性输运过程，使更多的OC_{mar}在跨越陆架的输运和沉降过程中发生降解. 而对于东海泥质区SOC, 频繁的物理扰动(再悬浮-再输运-再沉积)加速了OC的降解(Yao等, 2015)，使OC_{mar}和OC_{ter}都具有较低的埋藏效率(分别为18%和37%)(表1).

总之，近海的快速沉积有助于OC的埋藏，这与沉积物的长距离输运形成对比, 后者能够促进OC的再矿化并降低其埋藏效率. 而且, 不同河流和海洋水动力环境的差异(如水动力分选和再悬浮过程)显著影响着沉积物的输运扩散, 也会导致OC的沉积埋藏模式具有区域性的差异, 并最终影响沉积碳汇特征. 从全球范围来看，较高的OC_{ter}埋藏效率通常对应于具有高沉积速率或相对封闭的沉积体系. 渤海泥质区的高沉积速率和相对封闭稳定的沉积环境促使该区OC_{ter}的埋藏效率整体处于较高的水平，是重要的OC_{ter}储库；相比之下，东海泥质区OC_{ter}埋藏效率则明显偏低.

从上一节的讨论可以看出，筑坝等人类活动会显著降低河流入海沉积物通量. 对比流域建坝前后不同来源OC的埋藏通量, 发现建坝后OC_{ter}、OC_{bio}和OC_{petro}的埋藏通量分别下降了约66%、64%和68%, 表明大坝显著降低了中国东部近海的OC埋藏(Zhao等, 2021). 未来在流域建坝增加的背景下，入海泥沙将继续减少, 导致OC输入量进一步减少, 或将改变中国东部陆架海作为OC储库的能力.

5　结论

本文基于渤海、黄海和东海大量沉积物有机碳及相关实测数据资料详细阐述了其沉积有机碳的含量、来源、埋藏速率分布特征及规律，估算了有机碳埋藏

通量, 基本摸清了渤海、黄海和东海沉积有机碳的“家底”, 探讨了不同水动力环境和沉积过程对沉积有机碳输运、埋藏和保存的影响, 分析了人类活动对沉积有机碳埋藏的影响. 主要结论如下：

(1) 沉积有机碳分布特征. 现代渤海、黄海和东海沉积有机碳含量介于0.00%~2.12%之间, 平均值为0.47%±0.26%(n=5796). TOC含量与沉积物细粒组分显著相关, 高值区主要位于泥质沉积区, 包括黄河口及其毗邻的莱州湾西部、渤海湾大部、渤海湾中部西侧以及辽东湾西南部, 山东半岛北部泥质区、黄海中部泥质区、废黄河口及其周边、黄海东南泥质区西北部、长江口及其毗邻的浙闽沿岸泥质区、济州岛西南泥质区和台湾东北部山地河流影响的冲绳海槽南部等区域; TOC低值区主要分布在非泥质区, 包括辽东湾、渤海海峡、黄海北部、长江口东北部、南黄海西南部以及东海中外陆架等区域, 其中以东海中外陆架砂质沉积区和东海南部的砂质区沉积有机碳含量最低. 泥质区TOC含量平均值(0.57%±0.23%, n=2128)比非泥质区(0.41%±0.25%, n=3668)高39%.

(2) 沉积有机碳埋藏通量. 基于沉积物收支得到渤海、黄海和东海泥质区有机碳埋藏通量分别为1.30、2.71、4.19M C a^{-1}, 总计为8.20Mt C a^{-1}, 约占全球海底埋藏通量的5.3%. 其中, 生源有机碳埋藏通量占85%以上, 该通量与中国东部九大水系流域硅酸盐风化强度相当. 在自然状态下, 中国东部近海沉积物中每年可固定的有机碳的量相当于25.37Mt大气CO_2, 具有非常可观的碳汇效应.

(3) 沉积有机碳分布和埋藏控制因素. 渤海、黄海和东海陆源有机碳的分布和埋藏主要受控于大河的输运过程和海区复杂水动力环境. 黄河、长江等大河输入大部分颗粒有机碳均吸附在细粒沉积物中, 沉积在泥质沉积区. 渤海和黄海水深较浅、高惰性陆源有机碳输入和稳定的沉积环境更有利于有机碳保存; 东海陆架宽广并受到较强动力环境的影响, 沉积物再悬浮和再搬运作用强烈, 沉积环境多变, 加剧了有机碳的迁移和转化, 导致陆源有机碳的保存效率不高. 筑坝等人类活动显著改变了近海泥质区有机碳的埋藏, 对我国东部近海陆架沉积有机碳分布和埋藏产生了深刻影响.

致谢 本文研究使用的资料数据主要来自于“我国近海海洋综合调查与评价专项项目”、“海洋公益性行业科研专项项目”和“国家自然科学基金共享航次”等多个项目在渤海、黄海和东海采集的沉积样品的分析测试数据, 并收集使用了公开发表的有关数据资料, 谨向参加这些项目和发表数据的所有人员致以衷心的感谢. 三位审稿专家和责任编委提出了宝贵的意见和修改建议, 使本文更加完善, 谨致谢忱.

参考文献

鲍红艳. 2013. 溶解态和颗粒态陆源有机质在典型河流和河口的来源, 迁移和转化. 上海: 华东师范大学博士学位论文. 1–170

戴民汉, 翟惟东, 鲁中明, 蔡平河, 蔡卫君, 洪华生. 2004. 中国区域碳循环研究进展与展望. 地球科学进展, 19: 120–130

丁仲礼, 张涛等. 2022. 碳中和: 逻辑体系与技术需求. 北京: 科学出版社. 1–450

焦念志, 刘纪化, 石拓, 张传伦, 张永雨, 郑强, 陈泉睿, 汤凯, 王誉泽, 董海良, 唐剑武, 叶思源, 董双林, 高坤山, 张继红, 薛强, 李琦, 贺志理, 屠奇超, 王法明, 黄小平, 白雁, 潘德炉. 2021. 实施海洋负排放践行碳中和战略. 中国科学: 地球科学, 51: 632–643

焦念志, 梁彦韬, 张永雨, 刘纪化, 张瑶, 张锐, 赵美训, 戴民汉, 翟惟东, 高坤山, 宋金明, 袁东亮, 李超, 林光辉, 黄小平, 严宏强, 胡利民, 张增虎, 王龙, 曹纯洁, 罗亚威, 骆庭伟, 王南南, 党宏月, 王东晓, 张偲. 2018. 中国海及邻近区域碳库与通量综合分析. 中国科学: 地球科学, 48: 1393–1421

刘军, 于志刚, 臧家业, 孙涛, 赵晨英, 冉祥滨. 2015. 黄渤海有机碳的分布特征及收支评估研究. 地球科学进展, 30: 564–578

刘建国, 李安春, 陈木宏, 徐方建. 2007. 全新世渤海泥质沉积物地球化学特征. 地球化学, 36: 559–568

宋金明, 李学刚, 袁华茂, 郑国侠, 杨宇峰. 2008. 中国近海生物固碳强度与潜力. 生态学报, 28: 551–558

宋金明, 曲宝晓, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段丽琴. 2018. 黄东海的碳源汇: 大气交换、水体溶存与沉积物埋藏. 中国科学: 地球科学, 48: 1444–1455

石学法. 2012. 中国近海海洋——海洋底质. 北京: 海洋出版社. 1–561

石学法, 胡利民, 乔淑卿, 白亚之. 2016. 中国东部陆架海沉积有机碳研究进展: 来源、输运与埋藏. 海洋科学进展, 34: 313–327

石学法, 刘焱光, 乔淑卿. 2021. 渤海, 黄海和东海沉积物类型图. 北京: 科学出版社

王润梅, 唐建辉, 黄国培, 陈颖军, 田崇国, 潘晓辉, 骆永明, 李军, 张干. 2015. 环渤海地区河流河口及海洋表层沉积物有机质特征和来源. 海洋与湖沼, 46: 497–507

吴卫华, 郑洪波, 杨杰东, 罗超, 周斌. 2011. 中国河流流域化学风化和全球碳循环. 第四纪研究, 31: 397–407

徐元芹. 2012. 中国近海典型区域粘性土工程地质特征的差异性及其成因研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文. 1–164

于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 2022a. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨. 中国科学院院刊, 37: 423–434

于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 何念鹏. 2022b. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案. 中国科学院院刊, 37: 490–501

中华人民共和国水利部. 2011. 中国河流泥沙公报2010. 北京: 中国水利水电出版社. 1–69

中国海湾志编纂委员会. 1998. 中国海湾志. 第14分册-重要河口. 北京: 海洋出版社. 1–799

赵美训, 丁杨, 于蒙. 2017. 中国边缘海沉积有机质来源及其碳汇意义. 中国海洋大学学报(自然科学版), 47: 70–76

张瑶, 赵美训, 崔球, 樊炜, 齐家国, 陈鹰, 张永雨, 高坤山, 樊景凤, 汪光义, 严重玲, 卢豪良, 罗亚威, 张子莲, 郑强, 肖伟, 焦念志. 2017. 近海生态系统碳汇过程、调控机制及增汇模式. 中国科学: 地球科学, 47: 438–449

Alexander C R, DeMaster D J, Nittrouer C A. 1991. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: The Yellow Sea. Mar Geol, 98: 51–72

Aller R C, Mackin J E, Ullman W J, Wang C H, Tsai S M, Jin J C, Sui Y N, Hong J Z. 1985. Early chemical diagenesis, sediment-water solute exchange, and storage of reactive organic matter near the mouth of the Changjiang, East China Sea. Cont Shelf Res, 4: 227–251

Amano A, Itaki T. 2016. Variations in sedimentary environments in the forearc and backarc regions of the Ryukyu Arc since 25 ka based on CNS analysis of sediment cores. Quat Int, 397: 360–372

Atwood T B, Witt A, Mayorga J, Hammill E, Sala E. 2020. Global patterns in marine sediment carbon stocks. Front Mar Sci, 7: 165

Ausín B, Bruni E, Haghipour N, Welte C, Bernasconi S M, Eglinton T I. 2021. Controls on the abundance, provenance and age of organic carbon buried in continental margin sediments. Earth Planet Sci Lett, 558: 116759

Bao R, McIntyre C, Zhao M, Zhu C, Kao S J, Eglinton T I. 2016. Widespread dispersal and aging of organic carbon in shallow marginal seas. Geology, 44: 791–794

Bao R, van der Voort T S, Zhao M, Guo X, Montluçon D B, McIntyre C, Eglinton T I. 2018. Influence of hydrodynamic processes on the fate of sedimentary organic matter on continental margins. Glob Biogeochem Cycle, 32: 1420–1432

Bao R, Blattmann T M, McIntyre C, Zhao M, Eglinton T I. 2019. Relationships between grain size and organic carbon ^{14}C heterogeneity in continental margin sediments. Earth Planet Sci Lett, 505: 76–85

Berner R A. 1982. Burial of organic carbon and pyrite sulfur in the modern ocean; its geochemical and environmental significance. Am J Sci, 282: 451–473

Bradley J A, Hülse D, LaRowe D E, Arndt S. 2022. Transfer efficiency of organic carbon in marine sediments. Nat Commun, 13: 7297

Burdige D J. 2007. Preservation of organic matter in marine sediments: Controls, mechanisms, and an imbalance in sediment organic carbon budgets? Chem Rev, 107: 467–485

Cao Y, Xing L, Zhang T, Liao W H. 2017. Multi-proxy evidence for decreased terrestrial contribution to sedimentary organic matter in coastal areas of the East China Sea during the past 100 years. Sci Total Environ, 599-600: 1895–1902

Cha H J, Choi M S, Lee C B, Shin D H. 2007. Geochemistry of surface sediments in the southwestern East/Japan Sea. J Asian Earth Sci, 29: 685–697

Chang F, Li T, Xiong Z, Xu Z. 2015. Evidence for sea level and monsoonally driven variations in terrigenous input to the northern East China Sea during the last 24.3 ka. Paleoceanography, 30: 642–658

Chang F, Li T, Zhuang L, Yan J. 2010. Environmental anomalies in the northeastern East China Sea during the last 3 000 years: implications for El Niño activity in the Holocene. Chin J Ocean Limnol, 28: 190–200

Chen Y, Hu C, Yang G P, Gao X C. 2021a. Source, distribution and degradation of sedimentary organic matter in the South Yellow Sea and East China Sea. Estuar Coast Shelf Sci, 255: 107372

Chen Y, Hu C, Yang G, Gao X, Zhou L. 2021b. Variation and Reactivity of organic matter in the surface sediments of the Changjiang estuary and its adjacent East China Sea. J Geophys Res-Biogeoscis, 126: e2020JG005765

Dai M, Su J, Zhao Y, Hofmann E E, Cao Z, Cai W J, Gan J, Lacroix F, Laruelle G G, Meng F, Müller J D, Regnier P A G, Wang G, Wang Z. 2022. Carbon fluxes in the coastal ocean: Synthesis, boundary processes, and future trends. Annu Rev Earth Planet Sci, 50: 593–626

DeMaster D J, McKee B A, Nittrouer C A, Jiangchu Q, Guodong C. 1985. Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea. Cont Shelf Res, 4: 143–158

Deng B, Zhang J, Wu Y. 2006. Recent sediment accumulation and carbon burial in the East China Sea. Glob Biogeochem Cycle, 20: GB3014

DeVries T, Yamamoto K, Wanninkhof R, Gruber N, Hauck J, Müller J D, Bopp L, Carroll D, Carter B, Chau T, Doney S C, Gehlen M, Gloege L, Gregor L, Henson S, Kim J H, Iida Y, Ilyina T, Landschützer P, Le Quéré C, Munro D, Nissen C, Patara L, Pérez F F, Resplandy L, Rodgers K B, Schwinger J, Séférian R, Sicardi V, Terhaar J, Triñanes J, Tsujino H, Watson A, Yasunaka S, Zeng J.

2023. Magnitude, trends, and variability of the global ocean carbon sink from 1985 to 2018. Glob Biogeochem Cycle, 37: e2023GB007780

Dong L X, Guan W B, Chen Q, Li X H, Liu X H, Zeng X M. 2011. Sediment transport in the Yellow Sea and East China Sea. Estuar Coast Shelf Sci, 93: 248–258

Fang Y, Chen Y, Tian C, Lin T, Hu L, Huang G, Tang J, Li J, Zhang G. 2015. Flux and budget of BC in the continental shelf seas adjacent to Chinese high BC emission source regions. Glob Biogeochem Cycle, 29: 957–972

Fang Y, Chen Y, Hu L, Tian C, Luo Y, Li J, Zhang G, Zheng M, Lin T. 2019. Large-river dominated black carbon flux and budget: A case study of the estuarine-inner shelf of East China Sea, China. Sci Total Environ, 651: 2489–2496

Galy V, Eglinton T. 2011. Protracted storage of biospheric carbon in the Ganges-Brahmaputra basin. Nat Geosci, 4: 843–847

Galy V, Peucker-Ehrenbrink B, Eglinton T. 2015. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion. Nature, 521: 204–207

Gao J H, Shi Y, Sheng H, Kettner A J, Yang Y, Jia J J, Wang Y P, Li J, Chen Y, Zou X, Gao S. 2019. Rapid response of the Changjiang (Yangtze) River and East China Sea source-to-sink conveying system to human induced catchment perturbations. Mar Geol, 414: 1–17

Glibert P M, Cai W J, Hall E R, Li M, Main K L, Rose K A, Testa J M, Vidyarathna N K. 2022. Stressing over the complexities of multiple stressors in marine and estuarine systems. Ocean-Land-Atmos Res, 2022: 2022/9787258

Guo J, Yuan H, Song J, Li X, Duan L, Li N, Wang Y. 2021. Evaluation of sedimentary organic carbon reactivity and burial in the eastern China marginal seas. J Geophys Res-Oceans, 126: e2021JC017207

Hilton R G, Galy V, Gaillardet J, Dellinger M, Bryant C, O'Regan M, Gröcke D R, Coxall H, Bouchez J, Calmels D. 2015. Erosion of organic carbon in the Arctic as a geological carbon dioxide sink. Nature, 524: 84–87

Hilton R G, Galy A, Hovius N, Kao S, Horng M, Chen H. 2012. Climatic and geomorphic controls on the erosion of terrestrial biomass from subtropical mountain forest. Glob Biogeochem Cycle, 26: GB3014

Hu L, Guo Z, Feng J, Yang Z, Fang M. 2009. Distributions and sources of bulk organic matter and aliphatic hydrocarbons in surface sediments of the Bohai Sea, China. Mar Chem, 113: 197–211

Hu L M, Lin T, Shi X F, Yang Z S, Wang H J, Zhang G, Guo Z G. 2011. The role of shelf mud depositional process and large river inputs on the fate of organochlorine pesticides in sediments of the Yellow and East China seas. Geophys Res Lett, 38: L03602

Hu L, Shi X, Bai Y, Qiao S, Li L, Yu Y, Yang G, Ma D, Guo Z. 2016. Recent organic carbon sequestration in the shelf sediments of the Bohai Sea and Yellow Sea, China. J Mar Syst, 155: 50–58

Hu L, Shi X, Guo Z, Wang H, Yang Z. 2013. Sources, dispersal and preservation of sedimentary organic matter in the Yellow Sea: The importance of depositional hydrodynamic forcing. Mar Geol, 335: 52–63

Hu L, Shi X, Yu Z, Lin T, Wang H, Ma D, Guo Z, Yang Z. 2012. Distribution of sedimentary organic matter in estuarine–inner shelf regions of the East China Sea: Implications for hydrodynamic forces and anthropogenic impact. Mar Chem, 142-144: 29–40

Huh C A, Chen W, Hsu F H, Su C C, Chiu J K, Lin S, Liu C S, Huang B J. 2011. Modern (100 years) sedimentation in the Taiwan Strait: Rates and source-to-sink pathways elucidated from radionuclides and particle size distribution. Cont Shelf Res, 31: 47–63

Jeng W L, Lin S, Kao S J. 2003. Distribution of terrigenous lipids in marine sediments off northeastern Taiwan. Deep Sea Res Part II-Topical Stud Oceanogr, 50: 1179–1201

Jia J, Gao J, Cai T, Li Y, Yang Y, Wang Y P, Xia X, Li J, Wang A, Gao S. 2018. Sediment accumulation and retention of the Changjiang (Yangtze River) subaqueous delta and its distal muds over the last century. Mar Geol, 401: 2–16

Jørgensen B B, Wenzhöfer F, Egger M, Glud R N. 2022. Sediment oxygen consumption: Role in the global marine carbon cycle. Earth-Sci Rev, 228: 103987

Kang M G, Choi Y C. 2003. The Characteristics of suspended particulate matter and surface sediment of C, N in the Northern East China Sea ill summer. J Korean Soc Mar Environ Energy, 6: 13–23

Kao S J, Hilton R G, Selvaraj K, Dai M, Zehetner F, Huang J C, Hsu S C, Sparkes R, Liu J T, Lee T Y, Yang J Y T, Galy A, Xu X, Hovius N. 2014. Preservation of terrestrial organic carbon in marine sediments offshore Taiwan: mountain building and atmospheric carbon dioxide sequestration. Earth Surf Dynam, 2: 127–139

Kao S J, Milliman J D. 2008. Water and sediment discharge from small mountainous rivers, Taiwan: The roles of lithology, episodic events, and human activities. J Geol, 116: 431–448

Kao S J, Shiah F K, Wang C H, Liu K K. 2006. Efficient trapping of organic carbon in sediments on the continental margin with high fluvial sediment input off southwestern Taiwan. Cont Shelf Res, 26: 2520–2537

Ke Y, Calmels D, Bouchez J, Massault M, Chetelat B, Noret A, Cai H, Chen J, Gaillardet J, Quantin C. 2023. Channel cross-section heterogeneity of particulate organic carbon transport in the Huanghe. EGUsphere, 2023: 1–26

Kim S H, Lee J S, Kim K T, Kim S L, Yu O H, Lim D, Kim S H. 2020. Low benthic mineralization and nutrient fluxes in the continental

shelf sediment of the northern East China Sea. J Sea Res, 164: 101934

Kong G S, Park S C. 2007. Paleoenvironmental changes and depositional history of the Korea (Tsushima) Strait since the LGM. J Asian Earth Sci, 29: 84–104

LaRowe D E, Arndt S, Bradley J A, Estes E R, Hoarfrost A, Lang S Q, Lloyd K G, Mahmoudi N, Orsi W D, Shah Walter S R, Steen A D, Zhao R. 2020. The fate of organic carbon in marine sediments—New insights from recent data and analysis. Earth-Sci Rev, 204: 103146

Li D, Yao P, Bianchi T S, Zhang T, Zhao B, Pan H, Wang J, Yu Z. 2014. Organic carbon cycling in sediments of the Changjiang Estuary and adjacent shelf: Implication for the influence of Three Gorges Dam. J Mar Syst, 139: 409–419

Li G, Wang X T, Yang Z, Mao C, West A J, Ji J. 2015. Dam-triggered organic carbon sequestration makes the Changjiang (Yangtze) river basin (China) a significant carbon sink. J Geophys Res-Biogeoscis, 120: 39–53

Li X, Bianchi T S, Allison M A, Chapman P, Mitra S, Zhang Z, Yang G, Yu Z. 2012. Composition, abundance and age of total organic carbon in surface sediments from the inner shelf of the East China Sea. Mar Chem, 145-147: 37–52

Li Z, Zhang Y G, Torres M, Mills B J W. 2023. Neogene burial of organic carbon in the global ocean. Nature, 613: 90–95

Liao W, Hu J, Peng P. 2018. Burial of organic carbon in the Taiwan Strait. J Geophys Res-Oceans, 123: 6639–6652

Lim J, Lee J Y, Kim J C, Hong S S, Yang D Y. 2015. Holocene environmental change at the southern coast of Korea based on organic carbon isotope (δ^{13}C) and C/S ratios. Quat Int, 384: 160–168

Lin S, Huang K M, Chen S K. 2000. Organic carbon deposition and its control on iron sulfide formation of the southern East China Sea continental shelf sediments. Cont Shelf Res, 20: 619–635

Liu C, Liu G, Casazza M, Yan N, Xu L, Hao Y, Franzese P P, Yang Z. 2022. Current status and potential assessment of China's ocean carbon sinks. Environ Sci Technol, 56: 6584–6595

Liu J P, Milliman J D, Gao S. 2001. The Shandong mud wedge and post-glacial sediment accumulation in the Yellow Sea. Geo-Mar Lett, 21: 212–218

Liu J P, Xu K H, Li A C, Milliman J D, Velozzi D M, Xiao S B, Yang Z S. 2007. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. Geomorphology, 85: 208–224

Liu J, Xue Z, Ross K, Wang H, Yang Z, Li A, Gao S. 2009. Fate of sediments delivered to the sea by Asian large rivers: Long-distance transport and formation of remote alongshore clinothems. The Sedim Record, 7: 4–9

Liu J T, Hsu R T, Yang R J, Wang Y P, Wu H, Du X, Li A, Chien S C, Lee J, Yang S, Zhu J, Su C C, Chang Y, Huh C A. 2018. A comprehensive sediment dynamics study of a major mud belt system on the inner shelf along an energetic coast. Sci Rep, 8: 4229

Liu J T, Lee J, Yang R J, Du X, Li A, Lin Y S, Su C C, Tao S. 2021. Coupling between physical processes and biogeochemistry of suspended particles over the inner shelf mud in the East China Sea. Mar Geol, 442: 106657

Lu T, Wang H, Hu L, Wu X, Bi N, Dang Y, Assavapanuvat P, Bianchi T S. 2023. Dynamic transport of particulate organic carbon in the Yellow River during dam-orientated Water-Sediment Regulation. Mar Geol, 460: 107054

Lu T, Wang H, Wu X, Bi N, Hu L, Bianchi T S. 2022. Transport of particulate organic carbon in the lower Yellow River (Huanghe) as modulated by dam operation. Glob Planet Change, 217: 103948

Martin P, Bianchi T S. 2024. Organic Carbon Cycling and Transformation, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. In: Baird D, Elliott M, eds. Treatise on Estuarine and Coastal Science (Second Edition). Oxford: Academic Press.164–224

Matsuzaki K M, Itaki T, Tada R. 2019. Paleoceanographic changes in the Northern East China Sea during the last 400 kyr as inferred from radiolarian assemblages (IODP Site U1429). Prog Earth Planet Sci, 6: 22

Ma W W, Zhu M X, Yang G P, Li T. 2018. Iron geochemistry and organic carbon preservation by iron (oxyhydr)oxides in surface sediments of the East China Sea and the south Yellow Sea. J Mar Syst, 178: 62–74

Mei X, Li X, Wang Z, Zhang C, Zhang Y. 2019. Cross shelf transport of terrigenous organic matter in surface sediments from outer shelf to Okinawa Trough in East China Sea. J Mar Syst, 199: 103224

Park S C, Yoo D G, Lee K W, Lee H H. 1999. Accumulation of recent muds associated with coastal circulations, southeastern Korea Sea (Korea Strait). Cont Shelf Res, 19: 589–608

Perdue E M, Koprivnjak J F. 2007. Using the C/N ratio to estimate terrigenous inputs of organic matter to aquatic environments. Estuar Coast Shelf Sci, 73: 65–72

Qi L, Wu Y, Chen S, Wang X. 2021. Evaluation of abandoned huanghe delta as an important carbon source for the Chinese marginal seas in recent decades. J Geophys Res-Oceans, 126: e2020JC017125

Qiao S, Shi X, Wang G, Zhou L, Hu B, Hu L, Yang G, Liu Y, Yao Z, Liu S. 2017. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea. Mar Geol, 390: 270–281

Ran L, Lu X X, Sun H, Han J, Li R, Zhang J. 2013. Spatial and seasonal variability of organic carbon transport in the Yellow River, China. J Hydrol, 498: 76–88

Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, Mackenzie F T, Gruber N, Janssens I A, Laruelle G G, Lauerwald R, Luyssaert S, Andersson A J, Arndt S, Arnosti C, Borges A V, Dale A W, Gallego-Sala A, Goddéris Y, Goossens N, Hartmann J, Heinze C, Ilyina T, Joos F, LaRowe D E, Leifeld J, Meysman F J R, Munhoven G, Raymond P A, Spahni R, Suntharalingam P, Thullner M. 2013. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. Nat Geosci, 6: 597–607

Shi X, Chen C, Liu Y, Ren H, Wang H. 2002. Trend analysis of sediment grain size and sedimentary process in the central South Yellow Sea. Chin Sci Bull, 47: 1202–1207

Stukel M R, Irving J P, Kelly T B, Ohman M D, Fender C K, Yingling N. 2023. Carbon sequestration by multiple biological pump pathways in a coastal upwelling biome. Nat Commun, 14: 2024

Su C C, Huh C A. 2002. ^{210}Pb, ^{137}Cs and ^{239,240}Pu in East China Sea sediments: Sources, pathways and budgets of sediments and radionuclides. Mar Geol, 183: 163–178

Sun X, Fan D, Cheng P, Hu L, Sun X, Guo Z, Yang Z. 2021. Source, transport and fate of terrestrial organic carbon from Yangtze River during a large flood event: Insights from multiple-isotopes (δ^{13}C, δ^{15}N, Δ^{14}C) and geochemical tracers. Geochim Cosmochim Acta, 308: 217–236

Sun X, Fan D, Liao H, Tian Y. 2020a. Fate of organic carbon burial in modern sediment within Yangtze River Estuary. J Geophys Res-Biogeoscis, 125: e2019JG005379

Sun X, Fan D, Liu M, Liao H, Tian Y. 2020b. The fate of organic carbon burial in the river-dominated East China Sea: Evidence from sediment geochemical records of the last 70 years. Org Geochem, 143: 103999

Syvitski J P M, Vorosmarty C J, Kettner A J, Green P. 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. Science, 308: 376–380

Tao S, Eglinton T I, Montluçon D B, McIntyre C, Zhao M. 2016. Diverse origins and pre-depositional histories of organic matter in contemporary Chinese marginal sea sediments. Geochim Cosmochim Acta, 191: 70–88

Tao S, Wang A, Liu J T, Ye X, Blattmann T M, Ran C, Liu Z, Wang L, Yin X, Zhang H, Li L, Ning X, Hung C C, Haghipour N. 2023. Characteristics of sedimentary organic carbon burial in the shallow conduit portion of source-to-sink sedimentary systems in marginal seas. Geochim Cosmochim Acta, 353: 92–111

Wang C, Hao Z, Gao J, Feng Z, Ding Y, Zhang C, Zou X. 2020. Reservoir Construction has reduced organic carbon deposition in the East China Sea by half since 2006. Geophys Res Lett, 47: e2020GL087357

Wang H, Kandasamy S, Liu Q, Lin B, Lou J Y, Veeran Y, Lei H, Liu Z, Arthur Chen C T. 2021. Roles of sediment supply, geochemical composition and monsoon on organic matter burial along the longitudinal mud belt in the East China Sea in modern times. Geochim Cosmochim Acta, 305: 66–86

Wang J, Yao P, Bianchi T S, Li D, Zhao B, Cui X, Pan H, Zhang T, Yu Z. 2015. The effect of particle density on the sources, distribution, and degradation of sedimentary organic carbon in the Changjiang Estuary and adjacent shelf. Chem Geol, 402: 52–67

Wang S, Fu B, Piao S, Lü Y, Ciais P, Feng X, Wang Y. 2016. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. Nat Geosci, 9: 38–41

Wang X, Ma H, Li R, Song Z, Wu J. 2012. Seasonal fluxes and source variation of organic carbon transported by two major Chinese Rivers: The Yellow River and Changjiang (Yangtze) River. Glob Biogeochem Cycle, 26: 2011GB004130

Wang Y, Li G, Zhang W, Dong P. 2014. Sedimentary environment and formation mechanism of the mud deposit in the central South Yellow Sea during the past 40kyr. Mar Geol, 347: 123–135

Wei L, Cai P, Shi X, Cai W J, Liu W, Hong Q, Wu T, Bai Y, Cheng P, Sun Z. 2022. Winter mixing accelerates decomposition of sedimentary organic carbon in seasonally hypoxic coastal seas. Geochim Cosmochim Acta, 317: 457–471

Wu X, Wu B, Jiang M, Chang F, Nan Q, Yu X, Gaowa S. 2020. Distribution, sources and burial flux of sedimentary organic matter in the East China Sea. J Ocean Limnol, 38: 1488–1501

Wu Y, Eglinton T, Yang L, Deng B, Montluçon D, Zhang J. 2013. Spatial variability in the abundance, composition, and age of organic matter in surficial sediments of the East China Sea. J Geophys Res-Biogeoscis, 118: 1495–1507

Xia B, Zhang L. 2011. Carbon distribution and fluxes of 16 rivers discharging into the Bohai Sea in summer. Acta Oceanol Sin, 30: 43–54

Xing L, Zhang H, Yuan Z, Sun Y, Zhao M. 2011. Terrestrial and marine biomarker estimates of organic matter sources and distributions in surface sediments from the East China Sea shelf. Cont Shelf Res, 31: 1106–1115

Xing L, Zhao M, Gao W, Wang F, Zhang H, Li L, Liu J, Liu Y. 2014. Multiple proxy estimates of source and spatial variation in organic matter in surface sediments from the southern Yellow Sea. Org Geochem, 76: 72–81

Yang L, Guo W, Chen N, Hong H, Huang J, Xu J, Huang S. 2013. Influence of a summer storm event on the flux and composition of dissolved organic matter in a subtropical river, China. Appl Geochem, 28: 164–171

Yang Z S, Liu J P. 2007. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea. Mar Geol, 240: 169–176

Yao P, Yu Z, Bianchi T S, Guo Z, Zhao M, Knappy C S, Keely B J, Zhao B, Zhang T, Pan H, Wang J, Li D. 2015. A multi-proxy analysis of sedimentary organic carbon in the Changjiang Estuary and adjacent shelf. J Geophys Res-Biogeoscis, 120: 1407–1429

Yao P, Zhao B, Bianchi T S, Guo Z, Zhao M, Li D, Pan H, Wang J, Zhang T, Yu Z. 2014. Remineralization of sedimentary organic carbon in mud deposits of the Changjiang Estuary and adjacent shelf: Implications for carbon preservation and authigenic mineral formation. Cont Shelf Res, 91: 1–11

Yoon S H, Kim J H, Yi H I, Yamamoto M, Gal J K, Kang S, Shin K H. 2016. Source, composition and reactivity of sedimentary organic carbon in the river-dominated marginal seas: A study of the eastern Yellow Sea (the northwestern Pacific). Cont Shelf Res, 125: 114–126

Youn J S, Kim T J. 2008. Geochemical composition and provenance of surface sediments in the western part of Jeju Island, Korea. J Korean Earth Sci Soc, 29: 328–340

Yu H, Wu Y, Zhang J, Deng B, Zhu Z. 2011. Impact of extreme drought and the Three Gorges Dam on transport of particulate terrestrial organic carbon in the Changjiang (Yangtze) River. J Geophys Res, 116: F04029

Yu M, Eglinton T I, Haghipour N, Montluçon D B, Wacker L, Hou P, Ding Y, Zhao M. 2021. Contrasting fates of terrestrial organic carbon pools in marginal sea sediments. Geochim Cosmochim Acta, 309: 16–30

Yu M, Guo Z, Wang X, Eglinton T I, Yuan Z, Xing L, Zhang H, Zhao M. 2018. Sources and radiocarbon ages of aerosol organic carbon along the east coast of China and implications for atmospheric fossil carbon contributions to China marginal seas. Sci Total Environ, 619-620: 957–965

Zhang H, Li D W, Sachs J P, Yuan Z, Wang Z, Su C, Zhao M. 2021. Hydrodynamic processes and source changes caused elevated ^{14}C ages of organic carbon in the East China Sea over the last 14.3 kyr. Geochim Cosmochim Acta, 304: 347–363

Zhang H, Xing L, Zhao M. 2017. Origins of terrestrial organic matter in surface sediments of the East China Sea shelf. J Ocean Univ China, 16: 793–802

Zhao B, Yao P, Bianchi T S, Arellano A R, Wang X, Yang J, Su R, Wang J, Xu Y, Huang X, Chen L, Ye J, Yu Z. 2018. The remineralization of sedimentary organic carbon in different sedimentary regimes of the Yellow and East China Seas. Chem Geol, 495: 104–117

Zhao B, Yao P, Bianchi T S, Yu Z G. 2021. Controls on organic carbon burial in the eastern China marginal seas: A regional synthesis. Glob Biogeochem Cycle, 35: e2020GB006608

Zhao M, Mills B J W, Homoky W B, Peacock C L. 2023. Oxygenation of the Earth aided by mineral-organic carbon preservation. Nat Geosci, 16: 262–267

Zhu C, Wagner T, Talbot H M, Weijers J W H, Pan J M, Pancost R D. 2013. Mechanistic controls on diverse fates of terrestrial organic components in the East China Sea. Geochim Cosmochim Acta, 117: 129–143

(责任编委: 李超)