

综 述

中国边缘海沉积有机质来源及其碳汇意义*

赵美训^{1,2}, 丁 杨^{1,2}, 于 蒙^{1,2}

(1 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

2 中国海洋大学海洋有机地球化学研究所, 山东 青岛 266100)

摘 要: 中国边缘海(本文特指渤海、黄海和东海,不包括南海)是陆源和海源有机质的重要碳汇。总有机质指标和生物标志物的结果显示,表层沉积物中陆源有机质高值集中在近岸尤其是河口附近;海源有机质在陆架海盆处有高值,受控于海洋生产力和沉积环境。利用多参数指标对表层沉积物中不同来源和不同年龄有机质的贡献比例估算的结果显示,我国边缘海的有机碳埋藏量约 13 Mt/a,占全球边缘海沉积物有机碳埋藏量(~138 Mt/a)的~10%,其中陆源有机质的碳埋藏量(3.9 Mt/a)占全球边缘海沉积物陆源有机质埋藏量的~7%。若假定陈化土壤有机质和古老有机质主要是陆源物质,则非现代有机质的碳埋藏量为~6Mt/a,占我国边缘海总有机质碳埋藏量的~46%,与全球边缘海沉积物中陆源有机质的平均比例(44%)相当。这些结果表明我国边缘海在全球海洋碳循环中具有重要地位。本文利用已发表的文献数据,总结和归纳了中国边缘海沉积有机质来源及其碳汇意义。

关键词: 中国边缘海;生物标志物;有机碳来源;有机碳年龄;海洋碳汇

中图法分类号: P734

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2017)09-070-07

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxsb.201700003

引用格式: 赵美训,丁杨,于蒙. 中国边缘海沉积有机质来源及其碳汇意义[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(9): 70-76.

ZHAO Mei-Xun, DING Yang, YU Meng. Sources of sedimentary organic matter in China marginal sea surface sediments and implications of carbon sink[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(9): 70-76.

海洋是重要碳汇,全球变化背景下海洋碳汇演变机制及未来发展趋势受到越来越高的重视。有机碳在海洋沉积物中的埋藏是海洋碳循环的重要组成部分,对大气 CO₂ 吸收的重要性仅次于陆地硅酸盐的风化过程^[1-2]。尤其是大河影响下的边缘海,具有高生产力、高陆源输入和高沉积速率的特点,有机质埋藏效率更高。因此,虽然边缘海只占全球海洋面积的 8%,但其沉积有机质年埋藏量约占全球的 80%^[3],相当于海洋 CO₂ 净吸收量的 20%左右^[4]。客观评估边缘海在整个海洋碳收支中的作用,准确判断边缘海吸收大气 CO₂ 的能力,需要明确沉积物有机质的来源和组成,因为不同来源和不同年龄有机质的埋藏,其碳汇意义也不同。

中国东部边缘海(渤海、黄海和东海;简称中国边缘海,但不包括南海)是世界上最为宽广的陆架海之一,受长江(4.8×10⁸ t/a)、黄河(1×10⁹ t/a)等大河输入的巨量细颗粒物影响^[5],在适宜的海洋动力条件下,形成了多个泥质沉积区(简称泥质区)。我国边缘

海泥质区基本是在全新世中期海平面到达高水位以来形成,各泥质区的现代沉积速率空间分布差异较大,高沉积速率区集中在黄河口水下三角洲和长江口及其邻近海域,黄海海域的现代沉积速率显著低于渤海和东海^[6]。受河流输入影响,沉积物累积速率的高值主要出现在渤海湾,辽东湾上部,朝鲜半岛西部海岸,长江口及闽浙沿岸^[7-8]。黄海中部泥质区面积大,但其沉积速率低^[6]。

沉积物总有机质(TOC)含量的空间分布与泥质区的分布类似,渤海湾 TOC 高值出现在渤海湾西部以及渤海中部泥质区,低值出现在辽东浅滩和渤海海峡,这也是沉积物粒径大(砂质)及低沉积速率区域^[7]。东海高 TOC 主要在长江口泥质区和内陆架泥质区,这里具有高的沉积物累积速率,而外陆架的砂质沉积区具有较低的 TOC^[8-10]。TOC 与沉积物中值粒径的相关性表明 TOC 主要与黏土等细粒径物质结合,水动力条件是控制沉积有机质分布的一个重要因素^[7-8],这也说明

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFA0601403);国家自然科学基金项目(41520104009)资助

Supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFA0601403);the National Natural Science Foundation of China(41520104009)

收稿日期:2017-01-03;修订日期:2017-03-27

作者简介:赵美训(1959-),男,教授。E-mail:maxzhao@ouc.edu.cn

我国边缘海泥质区不仅是细颗粒物质的“汇”,也是重要的有机碳汇区域。结合已有的 TOC 含量及沉积物累积速率,可以得出我国边缘海沉积有机质累积速率的空间分布,进而计算出有机碳的埋藏量。Hu 等人^[7]计算的渤海 TOC 平均累积速率为 $15.3 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,与东海陆架区的有机质累积速率相当($14.7 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),总有机碳埋藏量为 5.6 Mt/a ,略低于东海陆架区的有机碳埋藏量(7.4 Mt/a ^[8])。由此看出,我国边缘海的有机碳埋藏量约占全球边缘海有机碳埋藏量($\sim 138 \text{ Mt/a}$ ^[1])的 $\sim 10\%$,在全球海洋碳循环、尤其是海洋碳汇过程中具有重要地位。

同时,我国边缘海受陆-海相互作用(如河流输入和海洋环流等)及人类活动(如建坝、近海工程、化石燃料的燃烧等)的影响较大,沉积有机质的来源十分复杂。不同来源和不同年龄的有机质对海洋碳循环和碳汇的贡献不同,在不同时间尺度对大气 CO_2 有不同的调节作用。首先,沉积有机质可以分为海源和陆源两大类,海源有机质的埋藏直接影响海洋碳汇。其次,输送到海洋中的陆源有机质又可以归为三类,包括现代陆源植被有机质、陈化的陆地土壤有机质和古老化石有机质(来自沉积岩的侵蚀或人类活动)。现代陆源植被有机质是陆地碳汇,输送到海洋后可以影响海洋生物地球化学过程和海洋碳汇;陈化的陆地土壤有机质在千年尺度上是陆地碳汇,埋藏在海洋沉积物中,可以影响海洋生物地球化学过程^[11-13],但是不影响当今大气二氧化碳浓度;古老化石有机质的输送和埋藏,在千年时间尺度以下不影响陆地和海洋碳汇^[11,14-15]。因此本文总结和归纳文献数据,聚焦如何有效区分我国边缘海沉积有机质的来源和年龄,进一步厘清边缘海沉积有机质的时空分布格局,为准确估算我国边缘海沉积有机质碳汇格局和潜力提供依据。

1 中国边缘海表层沉积有机质来源的空间分布

1.1 总有机质指标

总有机质的 C/N 比和 $\delta^{13}\text{C}$ 被广泛用来指示不同来源有机质的贡献,陆源有机质比海源有机质具有较高的 C/N 比和较负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[16]。渤黄海的 C/N 比范围为 $3\sim 21$,在黄河口有高值,没有明显空间分布规律^[7,17-18]。东海(含长江口)的 C/N 比范围为 $5\sim 13$,在长江口外有高值,也无明显空间分布规律^[9-10,19-20]。渤海 TOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-19.9\text{‰}\sim -24.0\text{‰}$,低值主要出现在黄河口及老黄河口,显示高的陆源有机质输入^[7,17-18,21]。东海 TOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-19.1\text{‰}\sim -24.8\text{‰}$,低值出现在内陆架区域显示陆源有机质比例高,向海洋方向有增加的趋势显示海源有机质比例

增加^[9-10,19-20]。

近年来, ^{14}C 的应用为碳循环的研究提供了新的方法,从有机质的年龄角度来追踪其来源及其在输送、埋藏过程中发生的变化。由黄河 POC 及其中的生物标志物 ^{14}C 年龄^[22-23]可以推断,陆源有机质的年龄高于近海表层沉积物中海源有机质年龄,还可以进一步用于评估古老化石有机质的贡献。我国边缘海表层沉积物 TOC 的 $\Delta^{14}\text{C}$ 数据显示黄河口及老黄河口有机质年龄较老,说明陆源有机质相对贡献高,而南黄海中部有机质较年轻,说明年轻海源有机质的贡献增加^[24-25]。东海陆架表层沉积物的总有机质 ^{14}C 年龄范围为 $3\ 140\sim 8\ 020 \text{ a BP}$,在长江口外一个站位有最高值,内外陆架平均有机质年龄相当^[9],均显示具有高的陆源有机质贡献。

1.2 生物标志物

生物标志物是一类具有特定来源并在地质环境中相对稳定的化合物,已被广泛应用于示踪我国边缘海表层沉积物中不同来源有机质的贡献^[10,17,19-20]。常用来示踪海源有机质的生物标志物有菜子甾醇、甲藻甾醇、长链烯酮、奇古菌醇等,其中菜子甾醇、甲藻甾醇和长链烯酮的含量加和常用来指示浮游植物生产力^[26]。指示陆源有机质的生物标志物主要包括两类,一类指示陆源高等植物有机质,如长链正构烷烃、醇、脂肪酸^[27]和木质素^[28]等,另一类指示土壤有机质,如支链 GDGTs^[29]等。

1.2.1 海源有机质的空间分布 浮游植物生物标志物结果显示,渤海和北黄海海源有机质含量分布与浮游植物平面分布类似,黄海暖流影响区域生产力高,海源有机质贡献高^[30]。另有生物硅的结果显示,渤海中部有高的海洋生产力贡献^[18]。浮游植物生物标志物和奇古菌醇的结果都揭示,南黄海的海源有机质含量分布呈明显近岸低值,由近岸向 50 m 等深线处呈增加趋势,然后向 80 m 等深线处又呈减小趋势,黄海中部有高值^[17]。东海海源有机质含量有类似的分布趋势,高值出现在长江口和闽浙沿岸外部的上升流区域,近岸及河口处较低^[10]。

1.2.2 陆源有机质的空间分布 奇碳数长链正构烷烃结果揭示,渤海表层沉积物中陆源有机质高值区出现在黄河口附近^[31]。在南黄海,支链 GDGTs 的分布与长链正构烷烃类似,指示表层沉积物陆源有机质在近岸区域有高值,最高值出现在老黄河口^[17]。东海表层沉积物中陆源有机质的高值区出现在长江口和闽浙沿岸,离岸呈减少趋势^[10,19];支链 GDGTs 的含量在长江口区域内迅速降低,但在离岸处含量又有所增加,这可能是由于海洋沉积物中的原位生产导致^[19]。Wu 等^[9]发现在东海内陆架木质素含量较高,主要存在于

细颗粒沉积物,而外陆架有机质的木质素含量低,主要存在于粗颗粒物中,说明有机质的分布受水动力淘选的影响大。Zhu 等^[19]系统研究了长江口-东海陆架系统中不同陆源有机质指标来示踪陆源有机质的变化,结果表明在河口及近岸处有陆源有机质高值,但随离岸距离衰减的速率不一致,并提出物理保护和化学活性从根本上控制陆源有机质的整体行为,前者在河口相对重要而后者主要在开阔陆架起主要控制作用。

综上所述,在我国边缘海表层沉积物中,海源和陆源有机质呈现明显不同的空间分布趋势。整体看来,海源有机质分布呈现明显的远海高值,近岸低值的趋势,受控于海洋生产力和沉积环境。陆源有机质高值集中在近岸尤其是河口附近,如黄河口、老黄河口及长江口。靠近黄河口和老黄河口的 TOC- $\delta^{13}\text{C}$ 年龄较老,指示陆源有机质相对贡献高。

2 中国边缘海表层沉积有机质来源的定量估算

总有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 已经被广泛用来定量估算海洋沉积物中陆源和海源有机质的贡献。最近,更多利用陆源生物标志物和海源生物标志物比值提出的指标,如 TMBR(Terrestrial and Marine Biomarker Ratio^[10]), BIT(Branched and Isoprenoid Tetraether index^[29]),对陆源有机质的贡献进行估算。我国学者利用以上多参数指标结合二端元或三端元混合模型,初步估算了我国边缘海表层沉积物中不同有机质来源的贡献。

2.1 不同来源有机质的定量估算

Liu 等^[18]利用总有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 结合二端元模型对渤海表层沉积物中的陆源有机质贡献进行估算,结果显示黄河口处的陆源有机质比例最高(40%~50%),仅有约 10%~20%的黄河来源沉积物可以输送并沉降在渤海中部和渤海海峡处。Xing 等^[17]分别用总有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 、TMBR 和 BIT 结合二端元模型对南黄海表层沉积物中的陆源有机质的贡献进行定量估算,发现用 TMBR 所估算的陆源有机质比例(12%~85%,平均 34%)明显高于用总有机质 $\delta^{13}\text{C}$ (0~43%,平均 26%)和 BIT(4%~43%,平均 12%)估算的陆源有机质比例。这是由于 BIT 指标仅反映土壤有机质贡献,而 TMBR 代表土壤和陆地高等植物有机质输入。由此利用三端元模型将陆源有机质进一步区分为土壤有机质(4%~47%,平均 13%)和陆地高等植物有机质(0.9%~73%,平均 23%)。土壤有机质和陆地高等植物有机质的结果显示南黄海表层沉积物中陆源有机质的高值均集中在老黄河口和近岸区,且陆地高等植物有机质的输入大于土壤有机质的输入。陆地高等植物有机质在离岸处仍有超过 20%的贡献,说明风尘输送也是陆地高等

植物有机质向海洋输送的一个重要途径。

Yao 等^[20]在长江口及邻近陆架区域用总有机质和生物标志物参数,利用主成分分析-蒙特卡洛模拟(PCA-MC)的三端元混合模型来估算海源、土壤和陆地高等植物来源有机质的比例分别为 35.3%,47.0%和 17.6%,各自的高值分别出现在陆架、内河口和近岸区域。该研究得出的陆源有机质比例(64.6%)高于 Wu 等计算的东海内陆架陆源有机质比例(平均 37%^[9]),可能由于 Yao 等^[20]的研究区域包括了长江内河口。

2.2 不同年龄有机质的定量估算

Wu 等^[9]通过对东海陆架表层沉积物的总有机质 $\Delta^{14}\text{C}$ 分析,利用二端元模型计算发现东海内、外陆架古老有机质($\Delta^{14}\text{C} = -1\ 000\text{‰}$)的比例相当(35%~45%)。但 TOC- $\Delta^{14}\text{C}$ 的二端元模型可能会高估古老化石有机质的比例,而通过测定 TOC 及来源特定的生物标志物 ^{13}C 及 $\Delta^{14}\text{C}$,利用同位素质量平衡方程,可以进一步定量估算现代、陈化(^{14}C 年龄 1 500~1 800 a BP^[23])及古老化石有机质($\Delta^{14}\text{C} = -1\ 000\text{‰}$, ^{14}C 年龄 > 26 000 a BP^[23])在中国边缘海表层沉积物中的相对比例。该技术已成功应用于黄河颗粒物的源解析上,显示陈化土壤有机质对黄河悬浮颗粒物贡献最大(56%±12%),古老有机质的贡献也很重要(30%±3%),现代有机质的贡献却最低(14%±9%)^[23]。Tao 等^[24]还利用该方法估算了渤海和黄海表层沉积物中现代(主要是海源)、陈化及古老化石有机质的相对比例,结果显示现代有机质占 35%~61%,高值在陆架深水区;陈化土壤有机质占 27%~48%,在黄河口和老黄河口处最高,但在黄海中部仍有 40%的比例;古老化石有机质较少,占 7%~25%,但在黄海中部仍有 10%的比例,不可忽视。

综上所述,利用不同方法定性区分和定量估算陆源和海源有机质的贡献,都存在局限性^[17]。Xing 等发现利用总有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 、TMBR 和 BIT 的三端元模型估算出南黄海陆源有机质的比例比单独用一种指标更加准确。总体上,生物标志物指标及单体碳同位素分析,并结合 TOC- ^{13}C 及 ^{14}C 的多参数、多指标可以更好的区分不同来源有机质的比例,但是此方法在我国边缘海沉积有机质源解析的应用案例还较少。在现有数据的条件下,本文尽可能汇总同一海域样品的同一套数据,但仍不可避免不同研究所用的手段及报道数据方式不同而造成的差异。因此在渤、黄海数据的选择上,综合比较后选取了更能反映陆源输入实际情况的研究结果,提高对陆源有机质比例评估的准确性。未来的研究工作应注重不同文献数据、不同手段计算的数据之间的可比性,以及对同一批数据进行多参数分析来增强数据的可靠性,提高对我国边缘海有机碳源汇格局估算的准确性。

表 1 我国边缘海沉积物中不同来源和不同年龄有机质的碳埋藏量估算
Table 1 Burial of different sources and age OC in China marginal seas and implication for carbon sink

沉积物 Sediments	总有机质 埋藏量 TOC /Mt·a ⁻¹	陆源有机质 百分比 TOM percentage /%	不同来源有机质埋藏量		不同年龄有机质贡献百 分比 Different age OC percentage /%			不同年龄有机质埋藏量		
			Burial of different sources OM /Mt·a ⁻¹		Burial of different age OC			Burial of different age		
			陆源有机 质 TOM	海源有机 质 MOM	现代有机 质 Modern OM	陈化土壤有机 质 Pre-aged OC	古老化石有 机质 Fossil OC	现代有机质 Modern OC	陈化土壤有 机质 Pre-aged OC	古老化石有 机质 Fossil OC
渤海 Bohai sea	2.0	12~92(36) ^a	0.7	1.3	32~50(41) ^a	43~48(46) ^a	7~20(14) ^a	0.8	0.9	0.3
黄海 Yellow sea	3.6		1.3	2.3	31~64(52) ^a	24~49(32) ^a	10~26(16) ^a	1.9	1.2	0.6
东海 East China Sea	7.4	26	1.9	5.5	—	—	35~45	—	4.4	3.0
中国边缘海(不包括南海)Chinese marginal sea without South China Sea	13.0	30	3.9	9.1	—	—	—	—	9.1	3.9
全球河口区陆架沉积物 Global river dominated shelf sediments	70	67±24 ^b	47±17 ^b	20	—	—	—	—	—	—
全球非河口区陆架沉积物 Global non-river dominated shelf sediments	68	16±4 ^b	11±3 ^b	57	—	—	—	—	—	—
全球边缘海沉积物 Total marginal sea sediments	138	44±13 ^b	58±17 ^b	80	—	—	—	—	—	—
全球海洋沉积物 Total marine sediments	160	36±11 ^b	58±17 ^b	102	—	—	—	—	—	—

Note: OC; Organic Carbon; OM; Organic Matter; TOC; Total Organic Carbon; TOM; Terrestrial Organic Matter; MOM; Marine Organic Matter;

^a 渤、黄海陆源和不同年龄有机质比例根据文献报道给出范围, 括号内为均值。^b 全球数据根据文献报道以均值及误差的形式表达。渤海海陆源有机质百分比数据来自 Xing 等^[17], 不同年龄有机质贡献百分比来自 Tao 等^[24]; 东海古老化石有机质百分比来自 Wu 等^[9]。中国边缘海总有机质埋藏量数据来自 Hu 等^[7]和 Deng 等^[8], 全球数据来自 Burdige^[1]。The data of Bohai and Yellow sea TOM percentage was from Xing et al^[17], the data of different age OC percentage was from Tao et al^[24]; the data of fossil OC percentage in East China sea was from Wu et al^[9], The data of TOC in China marginal seas was from Hu et al^[7] andDeng et al^[8], the data of sediment in global seas was from Burdige^[1].

3 中国边缘海沉积物的碳汇格局及指示意义

根据已有的研究结果,可以对我国边缘海沉积有机碳的埋藏量进行初步估算并与全球数据进行对比(见表1)。由于陆源和海源有机质本身具有很大的空间差异性,因此各种指标估算的不同来源和不同年龄有机质比例范围首先体现的是空间差异(见表1);为了便于比较区域特征和估算埋藏量,表1的括号内也提供了均值。对于全球数据,文献报道的陆源有机质比例误差范围显示其具有较大的不确定性。未来研究应聚焦于改善方法,增加数据的空间覆盖性,以减少估算误差。

在数据误差范围内,中国边缘海总有机质埋藏量约 $13 \text{ Mt/a}^{[7-8]}$,占全球边缘海沉积物有机质埋藏量($\sim 138 \text{ Mt/a}$)的 $\sim 10\%$,其中陆源有机质的碳埋藏量(3.9 Mt/a)占全球边缘海沉积物陆源有机质埋藏量的 $\sim 7\%$;海源有机质埋藏量(9.1 Mt/a)占全球边缘海沉积物海源有机质埋藏量的 $\sim 11\%$,表明我国边缘海在全球碳循环中具有重要地位。我国边缘海表层沉积物中埋藏的陆源有机质比例为 30% ,略低于全球边缘海沉积物中陆源有机质的平均比例(44%),与全球海洋沉积物的相当。根据渤海表层沉积物中单体分子 ^{14}C 数据得到的不同年龄有机质贡献比例 $^{[24]}$,现代有机质、陈化土壤有机质和古老化石有机质在渤海的埋藏量分别为 0.8 、 0.9 及 0.3 Mt/a ,在黄海的埋藏量分别为 1.9 、 1.2 及 0.6 Mt/a 。根据东海陆架表层沉积物的总有机质 $\Delta^{14}\text{C}$ 得到古老化石有机质贡献的比例,其在东海的埋藏量为 $\sim 3 \text{ Mt/a}$ 。由此可知,整个中国边缘海古老化石有机质的埋藏量为 $\sim 3.9 \text{ Mt/a}$,占边缘海总有机质埋藏量的 30% ,与陆源有机质埋藏量的比例相当。若假定非现代有机质(陈化土壤有机质和古老有机质)主要是陆源物质,则中国边缘海非现代有机质的埋藏量为 $\sim 6 \text{ Mt/a}$,占边缘海总有机质埋藏量的 $\sim 46\%$,与全球边缘海沉积物中陆源有机质的平均比例相当。

埋藏在渤海的非现代有机质的量为 1.2 Mt/a ,低于黄河的输送量($\sim 2.9 \text{ Mt/a}^{[23]}$),这说明黄河来源的物质受水动力条件的影响继续向黄海搬运。渤海和黄海的非现代有机质埋藏量为 3.0 Mt/a ,高于陆源有机质埋藏量(2.0 Mt/a),说明渤海受黄河输入影响大,大部分陆源有机质的年龄较老,这也揭示了渤海和黄海埋藏的陆源有机质比例较高的原因。东海埋藏的陆源有机质比例比渤海低,可能是由于长江输送的现代有机质较多并且长江口具有高能量和相对富氧暴露的移动泥,使得陆源有机质的埋藏效率较低 $^{[9,11,22]}$ 。东海古老化石有机质埋藏量大于其陆源有机质埋藏量,

这可能由于仅用 TOC^{14}C 的二端元模型可能会高估古老化石有机质的比例(例如有机质在沉积物再悬浮过程中发生了预陈化)或者还有其它来源(如大气沉降)的古老化石有机质未考虑进去。由此看出,目前我国边缘海沉积有机质来源估算的不确定性依然很大,渤海、黄海及东海陆架不同来源和不同年龄有机质分布的控制因素不同,在我国边缘海碳循环中扮演不同角色。

4 结语

边缘海有机碳循环是国际前沿科学问题,厘清我国边缘海沉积有机质的来源和埋藏,定量估算我国边缘海有机质的源汇格局,揭示过去变化规律,建立边缘海有机碳循环模型,可以为应对有关碳排放的环境外交谈判提供科学依据,为预测未来气候变化趋势提供有力支撑。我国边缘海碳汇格局取得了一定成果,但不同研究者使用的指标和分析方法不同,能够准确估算不同年龄有机质比例的单体分子 ^{14}C 数据匮乏,使得目前有机质来源估算的不确定性依然很大,制约了对陆源有机质埋藏效率的准确估算。我国边缘海有机质埋藏受水动力条件的影响大,如何量化输送和搬运过程中不同来源和不同年龄有机质的降解过程,对陆源有机质埋藏的机制研究有重要作用。尤其是主要河口和近海区域的移动泥对有机质的降解和保存有重要影响。一方面浮泥(移动泥)可以促进有机质的氧化,具有“有机碳氧化炉”效应,导致有机质埋藏效率低,比如长江口及闽浙沿岸。另一方面移动泥的搬运可以形成高沉积速率区域,导致有机质总埋藏量增加,比如黄河口。另外,人类活动的扰动可以导致土壤中已陈化有机质重新进入现代碳循环 $^{[32]}$,同时也增加了古老有机质的输送 $^{[32-33]}$;近海的富营养化会导致生产力增加和海源有机质的埋藏。因此,人类活动造成的不同来源和不同年龄有机质的埋藏会影响边缘海的碳汇格局,如何区分人类活动和气候变化对我国边缘海有机碳埋藏的影响也是重要命题。因此今后的研究需要充分利用业已成熟的 ^{14}C 分析测试技术,增加单体分子 ^{14}C 尤其是加强对不同粒级单体分子 ^{14}C 的测定,明确我国边缘海沉积有机质年龄特征及空间格局,进一步确定我国边缘海沉积有机质的来源,聚焦搬运过程对不同年龄有机质埋藏的控制机制,最终确定我国边缘海沉积物中陆源和海源有机质埋藏效率和碳汇意义。我国边缘海受大河输入影响明显并且环流体系复杂,研究长江、黄河及其影响下的陆架边缘海碳埋藏的控制机制,可以为研究其它区域提供有利范本。此外,目前对于小河流输送的陆源有机质仍缺乏估算,今后需要加强研究。

参考文献:

- [1] Burdige D J. Burial of terrestrial organic matter in marine sediments: A re-assessment[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(4): GB4011.
- [2] Galy V, France-Lanord C, Beyssac O, et al. Efficient organic carbon burial in the Bengal fan sustained by the Himalayan erosional system[J]. *Nature*, 2007, 450(7168): 407-410.
- [3] Hedges J I, Keil R G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis [J]. *Marine Chemistry*, 1995, 49(2): 81-115.
- [4] Battle M, Bender M, Tans P P, et al. Global carbon sinks and their variability inferred from atmospheric O₂ and $\delta^{13}\text{C}$ [J]. *Science*, 2000, 287(5462): 2467-2470.
- [5] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21.
- [6] 李军, 胡邦琦, 龚衍光, 等. 中国东部海域泥质沉积区现代沉积速率及其物源控制效应初探[J]. *地质论评*, 2012, 58(4): 745-756. Li Jun, Hu Bangqi, Dou Yanguang, et al. Modern sedimentation rate, budget and supply of the muddy deposits in the East China seas[J]. *Geological Review*, 2012, 58(4): 745-756.
- [7] Hu L, Shi X, Bai Y, et al. Recent organic carbon sequestration in the shelf sediments of the Bohai Sea and Yellow Sea, China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 155: 50-58.
- [8] Deng B, Zhang J, Wu Y. Recent sediment accumulation and carbon burial in the East China Sea [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(3): GB3014.
- [9] Wu Y, Eglinton T, Yang L, et al. Spatial variability in the abundance, composition, and age of organic matter in surficial sediments of the East China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(4): 1495-1507.
- [10] Xing L, Zhang H, Yuan Z, et al. Terrestrial and marine biomarker estimates of organic matter sources and distributions in surface sediments from the East China Sea shelf [J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(10): 1106-1115.
- [11] Blair N E and Aller R C. The fate of terrestrial organic carbon in the marine environment [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4: 401-423.
- [12] Drenzek N J, Montluçon D B, Yunker M B, et al. Constraints on the origin of sedimentary organic carbon in the Beaufort Sea from coupled molecular ^{13}C and ^{14}C measurements [J]. *Marine Chemistry*, 2007, 103(1): 146-162.
- [13] Feng X, Benitez-Nelson B C, Montluçon D B, et al. ^{14}C and ^{13}C characteristics of higher plant biomarkers in Washington margin surface sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 105: 14-30.
- [14] Drenzek N J, Hughen K A, Montluçon D B, et al. A new look at old carbon in active margin sediments [J]. *Geology*, 2009, 37(3): 239-242.
- [15] Galy V, Beyssac O, France-Lanord C, et al. Recycling of graphite during Himalayan erosion: A geological stabilization of carbon in the crust [J]. *Science*, 2008, 322(5903): 943-945.
- [16] Hedges J I, Keil R G, Benner R. What happens to terrestrial organic matter in the ocean? [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5-6): 195-212.
- [17] Xing L, Zhao M, Gao W, et al. Multiple proxy estimates of source and spatial variation in organic matter in surface sediments from the southern Yellow Sea [J]. *Organic Geochemistry*, 2014, 76: 72-81.
- [18] Liu D, Li X, Emeis K-C, et al. Distribution and sources of organic matter in surface sediments of Bohai Sea near the Yellow River Estuary, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 165: 128-136.
- [19] Zhu C, Wagner T, Talbot H M, et al. Mechanistic controls on diverse fates of terrestrial organic components in the East China Sea [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 117: 129-143.
- [20] Yao P, Yu Z, Bianchi T S, et al. A multiproxy analysis of sedimentary organic carbon in the Changjiang Estuary and adjacent shelf [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(7): 1407-1429.
- [21] Hu L, Shi X, Guo Z, et al. Sources, dispersal and preservation of sedimentary organic matter in the Yellow Sea: The importance of depositional hydrodynamic forcing [J]. *Marine Geology*, 2013, 335(1): 52-63.
- [22] Wang X, Ma H, Li R, et al. Seasonal fluxes and source variation of organic carbon transported by two major Chinese Rivers: The Yellow River and Changjiang (Yangtze) River [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(2): GB2025.
- [23] Tao S, Eglinton T I, Montluçon D B, et al. Pre-aged soil organic carbon as a major component of the Yellow River suspended load: Regional significance and global relevance [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 414: 77-86.
- [24] Tao S, Eglinton T I, Montluçon D B, et al. Diverse origins and pre-depositional histories of organic matter in contemporary Chinese marginal sea sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 191: 70-88.
- [25] Bao R, McIntyre C, Zhao M, et al. Widespread dispersal and aging of organic carbon in shallow marginal seas [J]. *Geology*, 2016, 44(10): 791-794.
- [26] Xing L, Tao S, Zhang H, et al. Distributions and origins of lipid biomarkers in surface sediments from the southern Yellow Sea [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(8): 1584-1593.
- [27] Eglinton T I, Eglinton G. Molecular proxies for paleoclimatology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 275(1-2): 1-16.
- [28] Hedges J I, Mann D C. The lignin geochemistry of marine sediments from the southern Washington coast [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(11): 1809-1818.
- [29] Hopmans E C, Weijers J W H, Schefuß E, et al. A novel proxy for terrestrial organic matter in sediments based on branched and isoprenoid tetraether lipids [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224(1): 107-116.
- [30] 王星辰, 邢磊, 张海龙, 等. 北黄海-渤海表层沉积物中浮游植物生物标志物的分布特征及指示意义 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2014, 44(5): 69-73. Wang Xingchen, Xing Lei, Zhang Hailong, et al. Distribution of phytoplankton biomarkers in surface sediments from the north Yellow sea and the Bohai sea and its implication [J]. *Periodical of Ocean university of China*, 2014, 44(5): 69-73.
- [31] Hu L, Guo Z, Feng J, et al. Distributions and sources of bulk organic matter and aliphatic hydrocarbons in surface sediments of

- the Bohai Sea, China[J]. *Marine Chemistry*, 2009, 113(3): 197–211.
- [32] Butman D E, Wilson H F, Barnes R T, et al. Increased mobilization of aged carbon to rivers by human disturbance[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 112–116.
- [33] Galy V, Peucker-Ehrenbrink B, Eglinton T. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion[J]. *Nature*, 2015, 521(7551): 204–207.

Sources of Sedimentary Organic Matter in China Marginal Sea Surface Sediments and Implications of Carbon Sink

ZHAO Mei-Xun^{1,2}, DING Yang^{1,2}, YU Meng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Institute of Marine Organic Geochemistry, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: China marginal seas (CMS, including the Bohai Sea, the Yellow Sea, the East China Sea), are a significant sink for both terrestrial organic matter (TOM) and marine OM (MOM). Both the sources and distributions of OM in China marginal seas have been affected by rapid climate changes and anthropogenic activities over the last 60 years. The total organic carbon (TOC) proxies and biomarker results of surface sediments indicated that higher percentage of TOM (%TOM) occurred near coastal regions and especially near river mouths such as the Yellow River Estuary, the old Huanghe Estuary and the Changjiang River Estuary. Higher percentage of MOM values were found in shelf sea basins, controlled by the marine primary production and depositional settings. Quantitative estimates based on both TOC and biomarker proxies with binary or ternary models revealed that total a sequestration of 13 Mt/a TOC buried in CMS ($\sim 10\%$ of global continental margin sediments) and burial TOM accounted for $\sim 7\%$ that of global continental margin sediments. If we assumed non-modern OM (including pre-aged and fossil OM) was mainly terrigenous, then the percentage of non-modern OM in CMS was $\sim 46\%$, comparable to the %TOM (44%) of global continental margin sediments. The preliminary carbon budget in the CMS indicated that it plays an important role in the global marine carbon cycle. This paper summarizes the sources of sedimentary organic matter in china maginal sea surface sedments and implications of carbon sink using published data.

Key words: China Marginal Seas; biomarkers; organic carbon sources; organic carbon age; ocean carbon sink

责任编辑 徐 环