

文章编号:1000-0550(2020)03-0648-13

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.057

三角洲—浅海沉积体系陆源有机质分布控制因素

屈童^{1,2},高岗^{1,2},徐新德³,刘凤妍⁴

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249

3. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057

4. 华北油田分公司勘探开发研究院,河北任丘 062552

摘要 三角洲—浅海沉积体系中同时存在陆源有机质与海洋有机质,向深水方向陆源有机质的分布受限,但越来越多的深水区域油气勘探实践发现陆源有机质的贡献,证明陆源有机质在深水区的存在及其对油气生成具有重要意义。通过系统分析陆源有机质的分布规律,从而阐述了影响陆源有机质分布的主要因素及其相互关系。研究表明:陆源有机质的分布受碎屑粒度、矿物组成、有机质组成、水动力类型、水动力强度、水体盐度及pH值等多因素控制,各因素间相互联系、相互影响。将其控制因素可系统归纳为物源条件、搬运条件及沉积与保存条件。水动力类型与水动力强度是陆源有机质存在于深水区的因素,生物作用可能成为陆源有机质分布的主控因素,环境因素及成岩作用是影响陆源有机质保存的重要因素。

关键词 三角洲—浅海沉积体系;陆源有机质;分布规律;影响因素

第一作者简介 屈童,男,1994年出生,硕士研究生,油气成藏与分布规律,E-mail: 2967163043@qq.com

通信作者 高岗,男,副教授,E-mail: gaogang2819@sina.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

三角洲的概念最早由 Barrell(1912)提出,他认为“三角洲是河流在一个稳定水体中或紧靠水体处形成的、部分露出水面的一种沉积物”^[1]。随着对三角洲沉积研究的深入,学者们也提出了更加具体准确的概念,三角洲是河流等水流携带大量沉积物入海(湖)时在河口地带堆积形成的、总体呈朵状的沉积体,三角洲的形成是携带泥沙的水流与海洋或湖泊水动力的共同影响下形成的^[2-4]。沉积体系是指具有统一物源、统一水流动力体制的、在成因上有共生关系的沉积组合而成的巨大三维沉积体^[4-5]。目前研究中三角洲沉积体系没有统一的分类标准,有学者按照三角洲发育过程的沉积方式将三角洲沉积体系分为进积型和退积型进行研究^[6-7],这是目前较为全面的一种分类方法;而大多数学者根据研究需要对湖泊扇三角洲体系、辫状三角洲沉积体系、河控三角洲沉积体系等进行研究^[6,8-9],分类方法多种多样。本文按照水流入海或入湖将三角洲沉积体系分为三角洲

—浅海沉积体系、三角洲—湖泊沉积体系,并结合三角洲的分类类型进一步划分为扇三角洲—浅海(湖泊)沉积体系、辫状河三角洲—浅海(湖泊)沉积体系、正常三角洲—浅海(湖泊)沉积体系^[10]。

三角洲沉积体系具备良好的生储盖配置条件,现有研究主要是对三角洲沉积体系油气储层进行研究^[11-14],也有部分学者对三角洲沉积体系烃源岩进行了研究^[15-16],对三角洲沉积体系展开深入研究对油气的勘探开发有重要的意义。三角洲—浅海沉积体系由于同时接受陆源物质与海洋生物的供给而同时具有陆源有机质和海洋有机质,且近年来越来越多的勘探实例表明,深水区域存在陆源有机质的贡献,这引起了人们对三角洲—浅海沉积体系陆源有机质分布的重视,也有学者对三角洲—浅海沉积体系陆源有机质分布规律进行了相关研究^[17],但并未对三角洲—浅海沉积体系陆源有机质分布的控制因素进行系统探讨。

收稿日期:2019-03-20;收修改稿日期:2019-05-30

基金项目:中海油“十三五”油气资源评价项目(YXKY-2018-KT-01);“十三五”全国油气资源评价项目中海油矿区油气资源评价(2017YQZYP J0109)[Foundation: CNOOC 13th Five-Year Plan Oil and Gas Resources Evaluation Project, No. YXKY-2018-KT-01; Oil and Gas Resources Evaluation of CNOOC Mineral Rights Area in the “13th Five-Year” National Oil and Gas Resource Evaluation Project, No. 2017YQZYPJ0109]

1 陆源有机质的内涵

沉积有机质是指生物遗体及生物的分泌物和排泄物随无机质一起沉积后,被直接保存下来或进一步经过生物降解、沉积埋藏、成岩作用等演化过程形成的有机物^[18]。根据有机质来源将其分为海洋有机质和陆源有机质两类,陆源有机质是指源于湖泊水生生物和源于高等植物的有机质;海洋有机质指源于浮游植物藻类及各种浮游动物的有机质^[19]。有机质含量常用有机碳含量进行表征。前人对沉积历史过程中三角洲—浅海沉积体系陆源有机质分布规律的研究较少^[17,20-23],而将今论古是地球科学研究中常用的方法之一^[24-25],因此,可通过对现代入海河口及三角洲沉积体系陆源有机质分布规律的研究揭示其控制因素,但仍需考虑陆源有机质沉积后在地质历史过程中的改造作用。现代入海河口及三角洲沉积体系陆源有机质供应可分为颗粒有机碳(POC)及溶解有机碳(DOC),其含量比例约为2:3^[26],颗粒有机碳可通过机械搬运直接进行沉积,而溶解有机碳则形成絮凝体或经生物作用形成生物残体或粪球粒进行沉积^[27],并且水体中POC与DOC相互转化保持动态平衡^[27-28]。对于石油地质而言,仅沉积并保存下来的有机质才有可能成为油气生成的母质。

2 陆源有机质分布控制因素

影响陆源有机质分布的因素较多,目前前人对古代入海三角洲体系陆源有机质分布的研究相对较少^[17,20-23]。现有研究主要集中在澳大利亚北卡那封盆地、尼日尔三角洲盆地、我国南海地区琼东南盆地、珠江口盆地等地区,普遍认为陆源有机质分布受沉积相、古气候、水动力、古构造等因素控制,并未对其影响因素进行具体研究。而对现代入海河口及三角洲沉积体系陆源有机质分布有大量研究^[25-34]。研究表明,不同地区陆源有机质分布的影响因素有所差异^[29-35]。李中乔^[29]在对越南红河水下三角洲的研究中认为陆源有机质主要受沉积物粒度、沉积速率、氧化降解等因素控制;Ramaswamy *et al.*^[30]在对缅甸伊洛瓦底大陆架的研究中认为陆源有机质主要受沉积物粒度、沉积速率、距物源距离等因素控制;Hu *et al.*^[31]在对渤海和黄海陆架沉积物中有机碳研究中认为,陆源有机质主要受沉积物粒度、水动力条件、物源供应、生物作用等因素控制,不同地区研究结果差异较

大。对于同一地区不同学者也有不同的观点^[36-38],在对长江口及其邻近海域陆源有机质分布研究中,朱纯等^[36]认为陆源有机质主要受水动力类型、水动力强度、与物源距离等因素控制;邵锡斌等^[37]认为陆源有机质主要受盐度、总悬浮颗粒物浓度、生物作用等因素控制;吕艳美等^[38]认为陆源有机质主要受沉积物粒径、水动力强度、距河口距离等因素影响。关于有机质的保存也有学者进行了相关研究,Benner *et al.*^[39]和Hernes *et al.*^[40]认为有机质的降解过程主要包括光降解及生物降解作用,因此影响生物作用的一切环境因素也控制了有机质的保存^[39-40]。已有研究对陆源有机质分布的影响因素认识有所不同,所以对陆源有机质分布控制因素进行系统的归纳探讨显得尤为重要。

结合前人研究,笔者认为陆源有机质分布的控制因素可分为物源条件、搬运与沉积条件、沉积与保存条件三大类。物源条件主要包括碎屑粒度、植物碎屑输入、矿物组成、有机质组成、物源供给等因素,搬运条件主要包括水动力类型、水动力强度及搬运距离等因素,沉积与保存条件主要包括光降解、生物作用、成岩作用、水体盐度、水体pH值、Eh值及温度。且各影响因素相互影响,并非相互独立,其他因素通过对以上因素的控制而影响陆源有机质分布。

3 物源条件对陆源有机质分布的控制作用

在三角洲—浅海沉积体系中,陆源有机质与沉积物一起被水流输送到海洋,绝大部分颗粒有机质会保存在边缘海的沉积物中^[29],而溶解有机质则形成絮凝体或经生物作用形成生物残体或粪球粒进行沉积。有机质通常以吸附态附着在沉积物颗粒表面,所吸附的量与沉积物的比表面积有关^[41-42],因此,物源供给量及物源比表面积相关因素均对陆源有机质分布有控制作用,沉积物比表面积受沉积碎屑粒度、植物碎屑输入、沉积物矿物成分等因素影响。溶解有机质的生物降解过程受初始有机质组成的影响^[28]。

沉积物粒径越小,其比表面积越大,可吸附的有机质越多。因此,一般情况下总有机碳含量与沉积碎屑粒度呈负相关关系,这在诸多实际研究中也得到了证实^[29-31,35-38,43]。李中乔^[29]在对越南红河水下三角洲的研究和Hu *et al.*^[31]在对渤海和黄海陆架沉积物的研究均表明,表层沉积物中TOC与沉积物粒径

呈明显的负相关关系(图 1a, b); Ramaswamy *et al.*^[30]对伊洛瓦底大陆架和王润梅等^[43]对环渤海地区河流河口表层沉积物的研究中,均发现沉积物中黏土含量与 TOC 含量有较好的正相关关系(图 1c),于培松等^[35]对长江口和东海海域沉积物的研究中发现黏土和粉砂含量与 TOC 含量有较好的正相关关系(图 1d),沉积物中黏土与粉砂均为细粒沉积物,其含量与 TOC 含量呈正相关关系进一步印证了沉积物粒度与 TOC 含量呈负相关关系。即有机质具有亲细粒性。

但在现代沉积中,也存在有机碳含量与粒径呈正相关的情况,如来自密西西比河下游的沉积物中发现细粒沉积物含量与总有机碳含量呈正相关(图 2),且颗粒态木质素的 $\Sigma 8$ ($\Sigma 8$ 为每 100 mg 颗粒态样品的酚单体的 S、V、C 系列单体的总和,用于反映木质素含量)与粒度呈正相关关系,说明沉积物中混入了大量的植物碎屑,植物碎屑的粒径很大,但是含有极高的木质素,因此才会出现有机碳和粒径成

正相关的现象^[38]。因此植物碎屑的输入会引起陆源有机质分布规律的异常。

沉积物颗粒的矿物组成是决定颗粒比表面积的重要因素,不同类型矿物的比表面积有较大的差异(表 1)^[45],尤其是黏土矿物,且由于不同黏土矿物的结构与性质差异,对有机质的吸附作用也有一定的差异。已有研究发现海洋沉积物中有机质与黏土矿物关系密切^[46-47],但其对有机质保存的理解仍有争议,部分学者认为矿物对有机质的吸附作用微乎其微^[48],另一部分学者提出有机质与细粒物质的沉积类似,受水动力分异作用控制^[49]。笔者认为,对于陆源有机质而言,黏土矿物对有机质的吸附作用不可忽视且受一定的水动力分异作用控制,已有研究证实土壤及烃源岩中大量有机质都与黏土矿物结合存在^[50-52],这也证实了黏土矿物对有机质吸附作用的重要性;而沉积物存在以分散颗粒状态赋存的有机质^[53-54],也就是说陆源有机质在搬运过程中会受到一定的水动力分异作用。

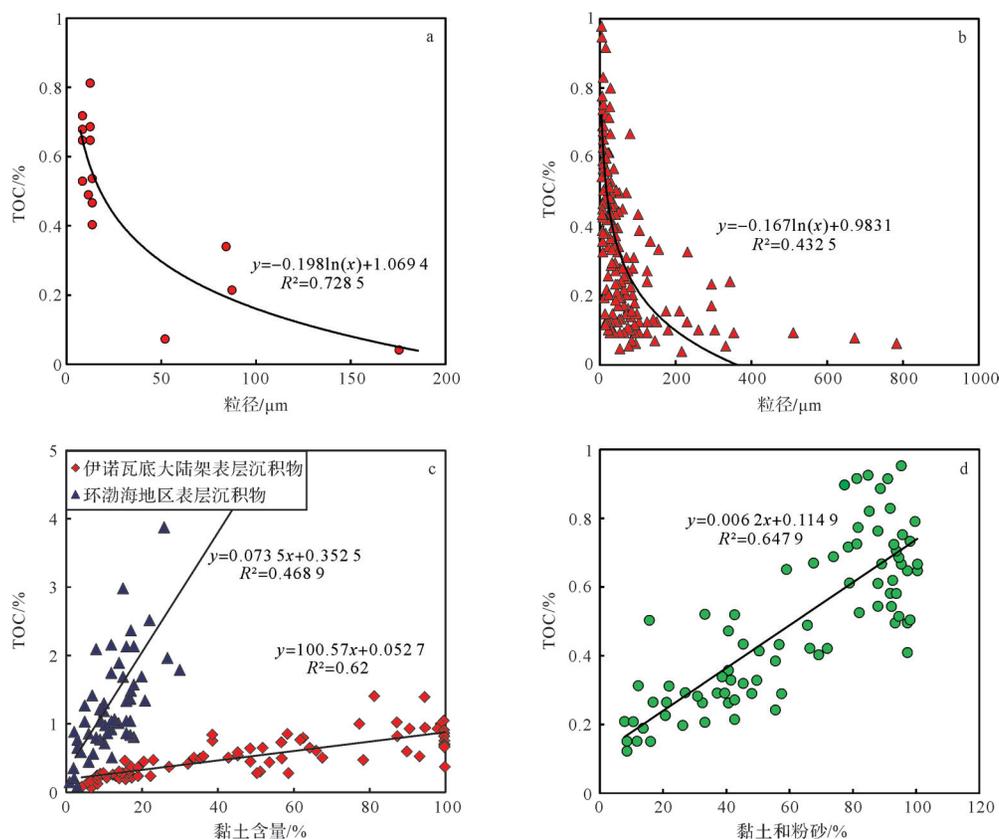


图 1 沉积物粒度与 TOC 关系图

(a) 红河水下三角洲表层沉积物 TOC 与粒径关系(数据来源于参考文献[29]); (b) 渤海和黄海陆架沉积物 TOC 与粒径关系(数据来源于参考文献[31]); (c) 伊洛瓦底大陆架与环渤海地区河流河口表层沉积物 TOC 与黏土含量关系(数据来源于参考文献[30,43]); (d) 长江口和东海海域沉积物 TOC 与细粒含量关系(数据来源于参考文献[35])

Fig.1 Relationship between grain size and total organic carbon (TOC) in sediments

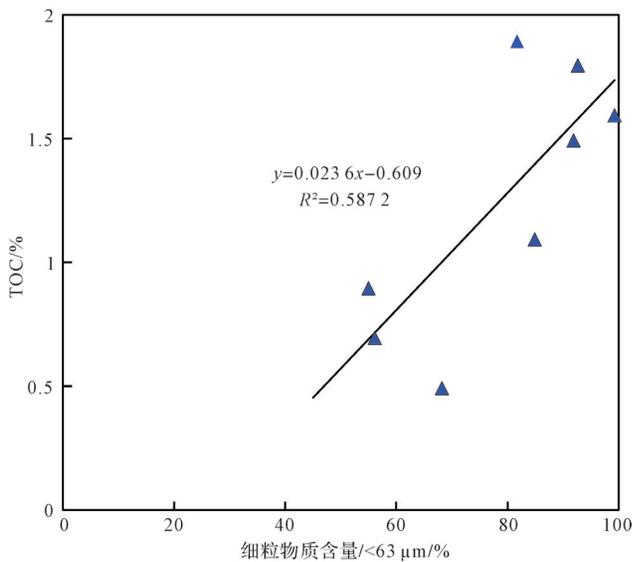


图2 密西西比河下游细粒物质含量与TOC关系图
(数据来源于参考文献[44])

Fig.2 Relationship between fine matter content and TOC in the lower Mississippi River (data from reference [44])

表1 不同矿物比表面积(据朱晓军等^[45])

Table 1 Specific surface area of different minerals
(after Zhu *et al.*^[45])

矿物	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)		
	内表面积	外表面积	总表面积
主要黏土矿物			
蒙皂石	750	50.00	800.00
蛭石	750	1.00	750.00
绿泥石	0	15.00	15.00
高岭石	0	15.00	15.00
伊利石	0	30.00	30.00
主要碎屑矿物			
长石	—	1.60	3.90
石英	—	0.90	6.60
方解石	—	7.45	7.45

有机质组成决定了其生物可利用性,有机质由蛋白质、碳水化合物、类脂类、木质素和丹宁组成^[27],在降解过程中蛋白质和碳水化合物将优先被异养生物利用^[55],溶解有机质被异养生物利用合成结构复杂的有机质或以生物遗体的形式进行沉积,此外,海水中存在大量黏性颗粒物质可使溶解有机质聚合形成絮凝体进行沉积^[27]。同时,溶解有机质与颗粒有机质不断相互转化,只有当有机质聚集形成大颗粒足以克服水体浮力而沉降保存时,才具有石油地质意义。

陆源有机质随物源碎屑搬运入海进而沉积保存,一定程度上受物源的影响,包括物源供给量及有机碳含量,物源供给量较大时,河口处有较大的沉积速率,陆源有机质得以快速埋藏得以保存。除此之

外,物源区岩性、植被、矿物自身性质等因素均可影响以上因素从而对陆源有机质分布间接控制。

4 搬运条件对陆源有机质分布的控制作用

搬运条件控制着沉积物的沉积范围及粒度分布规律^[56-57],因此对陆源有机质分布也有重要的控制作用,包括水动力强度、水动力类型及搬运距离等因素。陆源有机质与物源碎屑随水流搬运沉积,水动力条件及水体自身性质决定了其分布范围。水动力对碎屑颗粒的分选作用使具有亲细粒性的有机质呈现规律性分布。

水动力强度控制着碎屑颗粒可搬运的最远距离,强水动力条件会使颗粒有机质随细粒物质搬运到较远的地方,并且溶解有机质会随水体向更远的地方扩散,从而使有机碳可搬运至较远地区。长江口表层沉积物中陆源有机质表征参数 $\Sigma(C_{27}+C_{29}+C_{31})$ 的含量向远离河口方向呈现明显增大趋势(图3)^[36],与水动力作用下沉积物的沉积规律一致,细粒物质含量向远离河口区增大;珠江口表层沉积物的正构烷烃 C_{29} 含量也呈现出向远离河口区方向增大的规律(图4)^[58],这都证明了水动力分选作用对陆源有机质分布有控制作用。当水动力达到一定强度时,已沉积的细粒沉积物会重新启动发生再搬运向深水区扩散,这是陆源有机质向深水区迁移的重要原因。李中乔等^[34]在对红河水下三角洲表层沉积的研究就发现了向远离河口方向,沉积物粒度呈现突然降低后增大的变化(图5),突然降低是由于水动力的分选作用,之后粒度增大是由于发生了再搬运作用,而木质素 $\Sigma 8$ 含量相应的呈现相反趋势。

潮汐、波浪、沿岸流等对陆源有机质的分布有控制和改造作用^[36,59-61]。Yanagi *et al.*^[59]对东海细粒沉积物研究认为其主要来源于长江细粒物质,或长江口—浙江沿岸软泥区在环流作用下向冲绳海槽运移^[36,60],并有学者通过数值模拟证实了这一观点^[59,62],这可能也是造成深水区存在陆源有机质的主要原因;石晓勇等^[61]发现长江口颗粒有机碳分布受潮汐作用而呈现波浪型分布,这证实了不同类型水动力对陆源有机质分布有改造作用,且不同水动力类型作用机制有所差异。深水区沉积主要受重力搬运和牵引流沉积主导^[63],环流、暖流、沿岸流等对有机质的搬运作用可能是陆源有机质存在于深水区的因素。

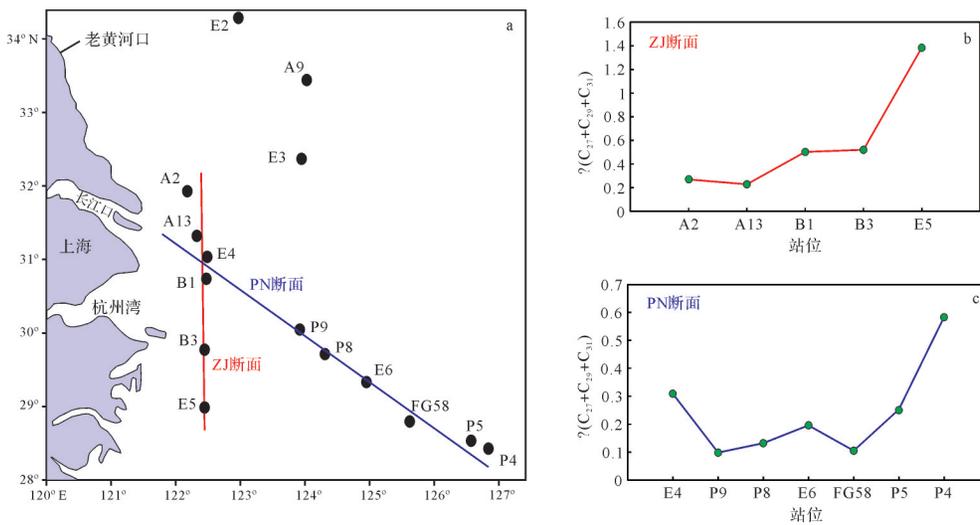


图3 长江口表层沉积物正构烷烃 $\Sigma(C_{27}+C_{29}+C_{31})$ 变化图

(a)长江口观察站位位置图(改自朱纯等,2005);(b)ZJ断面正构烷烃 $\Sigma(C_{27}+C_{29}+C_{31})$ 变化趋势图;(c)PN断面正构烷烃 $\Sigma(C_{27}+C_{29}+C_{31})$ 变化趋势图(数据来源于文献[36])

Fig.3 Variation of *n*-alkanes $\Sigma(C_{27}+C_{29}+C_{31})$ of the surface sediments in the Yangtze Estuary

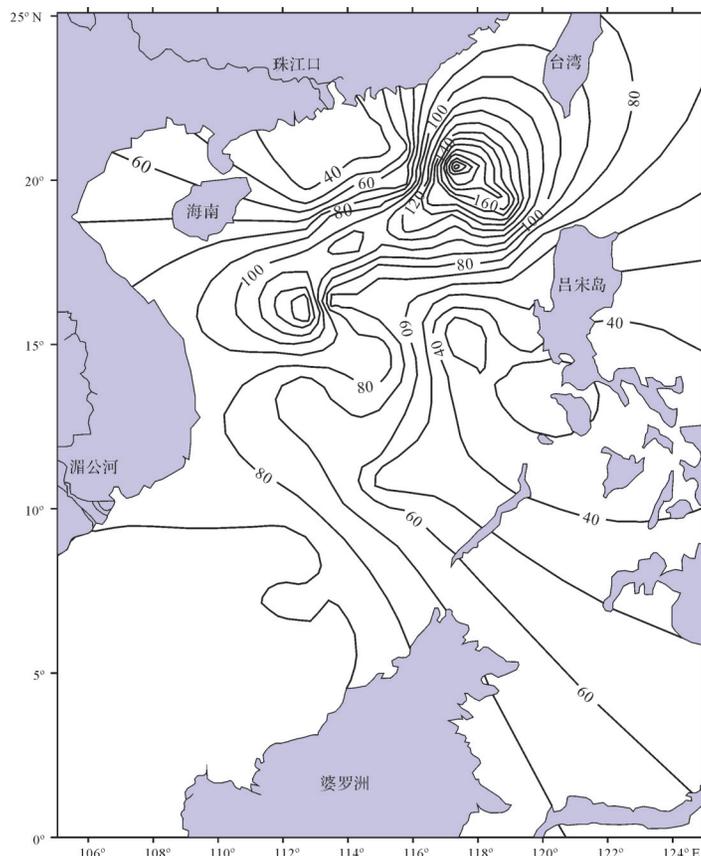


图4 珠江口表层沉积物正构烷烃 C_{29} 分布图(改自 Pelejero^[58])

Fig.4 Distribution of *n*-alkanes C_{29} in surface sediments of the Pearl River Estuary (modified from Pelejero^[58])

在现代沉积河口区,陆源有机质总体呈现明显的近河口富集特征,这可能是由于河口处较大的沉积速率有利于有机质的保存。在我国渤海湾、南黄

海、长江口及珠江口等河口区,表层沉积物陆源有机质分布总体上均呈现向海方向含量降低的趋势^[32-33,35-38,58]。

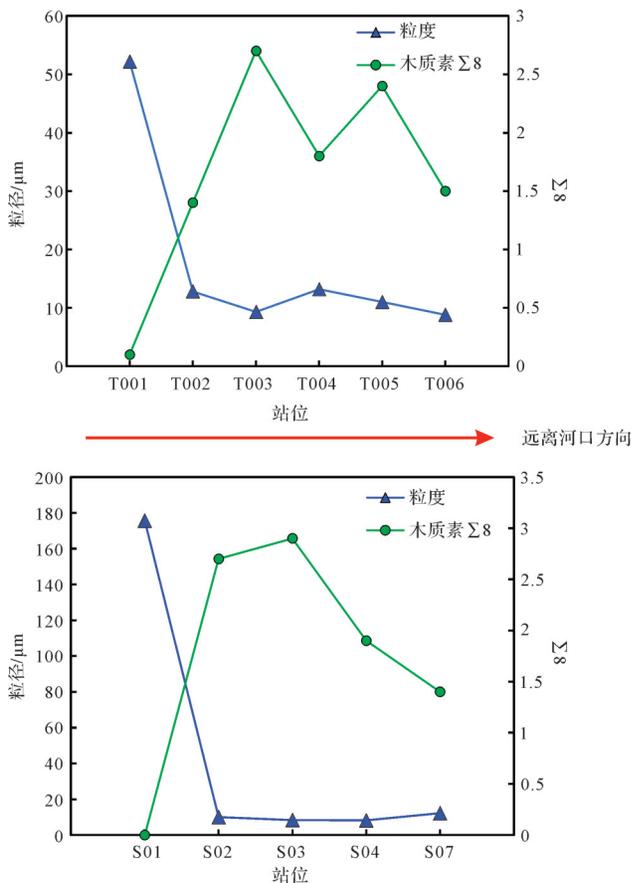


图5 红河水下三角洲表层沉积物粒度及木质素含量变化图(数据来源于参考文献[34])

Fig.5 Variation of grain size and lignin content of surface sediments in the underwater delta of Honghe (data from reference [34])

5 沉积与保存条件对陆源有机质分布的控制作用

陆源有机质随流水进入海洋,由于环境的改变对沉积物及有机质本身进行改造,或影响生物生长,

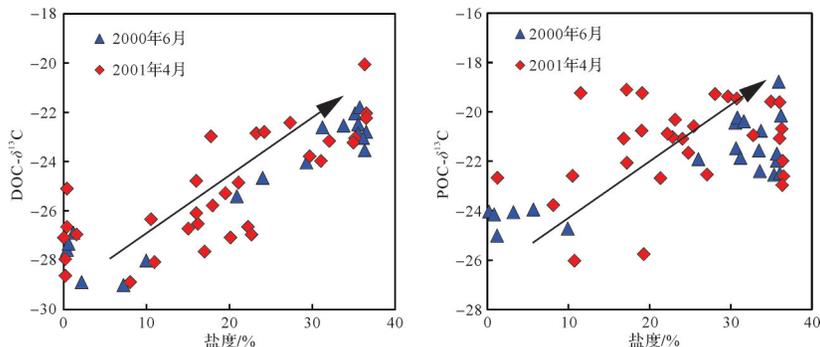


图6 密西西比河口 DOC- $\delta^{13}C$ 、POC- $\delta^{13}C$ 与水体盐度关系图(数据来源于参考文献[64])

Fig.6 Relationship between DOC- $\delta^{13}C$, POC- $\delta^{13}C$, and salinity in the Mississippi estuary (data from reference [64])

从而控制有机质的分布,主要包括水体盐度、pH、Eh及温度。有机质沉积后,会经历一系列的改造和破坏作用,主要包括生物作用、光降解和成岩作用。

水体盐度、pH值及Eh值可通过对沉积物及有机质本身的改造作用从而控制有机质的分布。在密西西比河口沉积物的研究中,发现在咸淡水混合的中盐度区域颗粒有机碳(POC)和溶解有机碳(DOC)均存在转移和溶出的行为,而在高盐度区域出现POC和DOC的 $\delta^{13}C$ 增大的趋势(图6)^[64],表明陆源有机质被大量移除,海洋有机质相对含量增高。Sholkovitz^[65]对河口环境河水与海水混合时有机质絮凝作用的研究中认为,盐度小于20%时絮凝作用随盐度增大而增强。卢龙飞等^[66]认为黏土矿物对有机质的吸附作用与水体pH值有关,pH值在2.74左右吸附量最大。卢双舫等^[69]认为只有当Eh<0时的还原环境有机质才能得以保存。

在三角洲—浅海沉积体系中,生物降解作用及生物现场生产对有机质沉积与保存过程有重要的控制作用,而水体盐度、pH、Eh及温度等环境因素会直接影响生物的种类及其生长。盐度和温度对生物群落结构的分布有着重要的控制作用^[67];随着水体pH的适度增加,生物数量及活性增强,溶解有机质的生物可利用性增强^[55];有机质中易降解成分含量越高,还原性细菌降解速率越快,沉积物Eh值越低,越有利于有机质保存^[68]。浮游生物利用溶解有机质及营养物质转化为自身组成物质和排出的粪球粒从而易于沉积,同时生物食用颗粒有机质时的物理破碎作用也可使颗粒有机质转化为溶解有机质^[27],长江口陆源颗粒有机质就主要来源于浮游植物的现场生产^[29];生物降解作用是陆源有机质移除的重要因素,在东海陆架、渤海海域、长江口及其邻近海域均存在

明显的生物降解现象^[29,43]。

除生物降解作用外,光降解作用是有机质从水体移除的主要因素^[28,69-71],且光照有助于促进细菌对有机碳的利用^[28]。研究表明,海水及海洋沉积物中的陆源有机质不足河流输入量的一半,即大部分在进入海洋后被迅速移除^[72-73],光降解及生物降解作用是否是导致这一现象的主要原因还有待证明。而生物现场生产作用可能成为控制陆源有机质分布关键因素之一,研究表明,长江口、黄河口、红河水下三角洲及密西西比河有机质的分布主要受陆源有机质输入的影响^[34-36,74-75],而美国东海岸约克河口有机质分布则主要受原地生物生产影响^[76]。因此,当环境利于生物生长,陆源有机质组成利于生物利用时,生物生产作用可能成为陆源有机质分布的主控因素。

关于成岩作用对有机质的改造研究较少,Lamb *et al.*^[77]认为成岩作用能降低C/N比,张成君等^[78]证实了这一点,表明了沉积作用早期有机质发生了明显的降解作用,降低了C/N比值;李中乔^[29]对渤海海域沉积物的研究中发现,随埋藏深度的增加,总有机碳先降低后平稳不变的趋势(图7),但研究深度较浅,尚未达到成岩阶段,因此,陆源有机质在地质历史过程中,受成岩作用而发生降解是必然的,但其过程造成的有机质的改造及含量变化规律有待进一步研究。

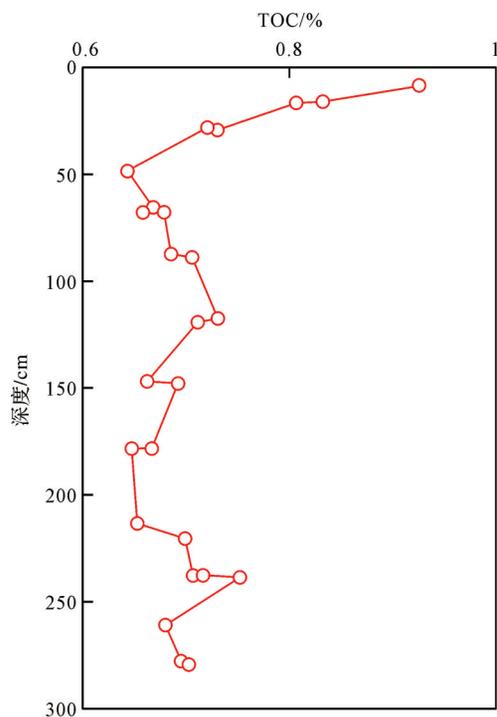


图7 渤海海域沉积物TOC随深度变化图(据李中乔^[29])

Fig.7 Variation of TOC with depth in the Bohai Strait sediments (after Li ^[29])

6 各影响因素间相互关系及主控因素

影响陆源有机质分布的因素较多,且各因素间相互制约、相互影响,陆源有机质分布是各个因素共同作用的结果。碎屑粒度的大小决定了其可被搬运的距离,同时碎屑粒度及搬运距离均受水动力强度的控制;生物作用的强度受水体盐度、pH值、Eh值及温度等环境因素的影响,同时生物作用又对环境因素起调控作用;水动力强度会由于不同类型水动力的相互作用而改变,水流间的相互作用也可产生环流从而改变水动力类型(图8)。但总的来说,以上讨论的各个因素已较全面的概括了陆源有机质分布的控制因素,其他因素均通过对以上因素的影响从而间接控制陆源有机质的分布。

陆源有机质以颗粒有机质和溶解有机质的形式向海洋输送,当物源供给量大,沉积速率快时,颗粒有机质可随沉积物在河口处快速沉积埋藏;而当环境利于生物生长,有机质组成利于生物利用时,生物的现场生产作用可能成为陆源有机质分布的主要控制因素;利于有机质保存的还原、静水环境,决定了其是否有可能成为油气生成的母质。前人研究表明,以溶解态向深水区扩散的陆源有机质被大量移除,其原因有待进一步研究,即以溶解态向海洋中扩散的陆源有机质不足以形成规模性的沉积并成为油气生成的有效母质,但大量勘探实践证明,我国南海深水区崖城组烃源岩以陆源有机质为主^[79-80],且北海、墨西哥湾、巴西及西非等地以深水浊积型烃源岩模式为指导均取得较大突破^[81],因此,环流、暖流、沿岸流等大规模水动力作用对有机质的搬运可能是陆源有机质存在于深水区的因素。

7 结论与认识

三角洲—浅海沉积体系作为一种同时接受陆源物质及海洋生物供给的特殊沉积体系,同时具有陆源有机质和海洋有机质。陆源有机质受碎屑粒度、矿物组成、有机质组成、水动力类型、水动力强度、水体盐度及pH值等多因素控制,本文归纳为物源条件、搬运条件及沉积与保存条件三大类控制因素。目前对陆源有机质分布控制因素的系统研究较为缺乏,且由于地质历史过程中成岩作用对陆源有机质影响的研究难度较大,目前尚且缺乏该方面的研究;

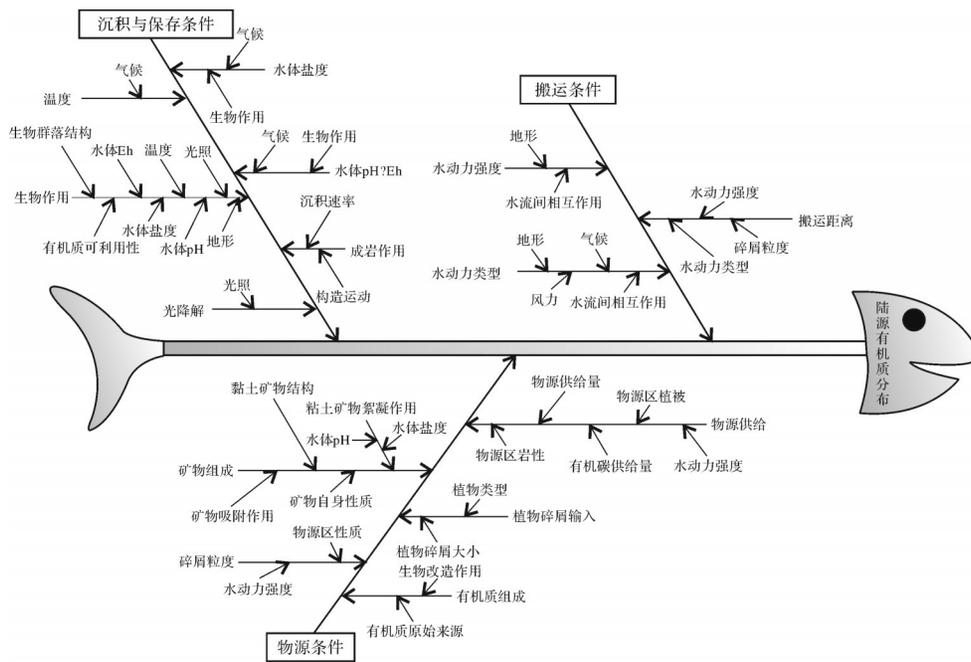


图8 陆源有机质分布控制因素鱼骨图

Fig.8 Fishbone diagram of control factors for terrestrial organic matter distribution

生物作用受环境因素影响较大,且对有机质的沉积与保存过程起重要作用,生物作用对陆源有机质分布的控制作用有待进一步系统研究;搬运条件对陆源有机质分布的控制作用尚缺乏针对性研究,这是陆源有机质在深水区存在的关键因素。因此,应加强水动力强度、水动力类型、有机质组成及生物作用等因素与陆源有机质分布规律的内在联系研究,以明确陆源有机质在深水区存在的原因及条件。

参考文献(References)

[1] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 4版. 北京:石油工业出版社, 2008: 291-318. [Zhu Xiaomin. Sedimentary petrology [M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 291-318.]

[2] 金振奎,高白水,李桂仔,等. 三角洲沉积模式存在的问题与讨论[J]. 古地学报, 2014, 16(5): 569-580. [Jin Zhenkui, Gao Baishui, Li Guizai, et al. Problems and discussions about delta depositional models [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(5): 569-580.]

[3] 顾晓忠,马立桥. 三角洲沉积体系的数值模拟及其应用[J]. 石油学报, 1993, 14(2): 1-11. [Gu Xiaozhong, Ma Li-qiao. Numerical simulation of a delta depositional system and it's applications [J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(2): 1-11.]

[4] 奚方喆,程红战,李俊峰. 三角洲沉积体系的沉积亚相特点及其与能源矿产的聚集关系[J]. 科技致富向导, 2011(26): 116, 199. [Xi Fangzhe, Cheng Hongzhan, Li Junfeng. Sedimentary subfacies characteristics of delta sedimentary sys-

tem and its relationship with energy mineral accumulation [J]. Science and Technology Richness Guide, 2011 (26) : 116, 199.]

[5] 赵玉峰. 川西地区中晚三叠世多重地层划分对比及沉积体系分析[D]. 成都:成都理工大学, 2009. [Zhao Yufeng. Tmultiple stratigraphic division and correlation and depositional system analysis of Middle Late Triassic in west of Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.]

[6] 赵国良,穆龙新,计智锋,等. 苏丹M盆地P油田退积型辫状三角洲沉积体系储集层综合预测[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 125-128. [Zhao Guoliang, Mu Longxin, Ji Zhifeng, et al. Reservoir prediction of the retrogradation braided delta depositional system of P oilfield in the M Basin, Sudan [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6) : 125-128.]

[7] 杨勇. 东营凹陷永安镇油田永3断块沙二段进积三角洲沉积体系[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(2): 27-29. [Yang Yong. The representative prograded delta depositional system in Yong3 fault -block, Yonganzhen oilfield, Dongying Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(2) : 27-29.]

[8] 胡晓强,陈洪德,纪相田,等. 川西前陆盆地侏罗系三角洲沉积体系与沉积模式[J]. 石油实验地质, 2005, 27(3): 226-231, 237. [Hu Xiaoqiang, Chen Hongde, Ji Xiangtian, et al. The Jurassic delta deposit system tract and sedimentation model in the western Sichuan Foreland Basin, China [J]. Petroleum Geology & Experimenty, 2005, 27(3) : 226-231, 237.]

[9] 马维俊. 贵州纳雍地区含煤地层龙潭组中上段三角洲沉积体系[J]. 现代地质, 1990, 4(1): 23-34. [Ma Weijun. Deltaic

- depositional systems in the middle and upper members of Longtan Formation of coal-bearing strata, Nayong district, Guizhou [J]. *Geoscience*, 1990, 4(1): 23-34.]
- [10] 薛良清, Galloway W E. 扇三角洲、辫状河三角洲与三角洲体系的分类[J]. *地质学报*, 1991(2): 141-153. [Xue Liangqing, Galloway W E. Fan-delta, braid delta and the classification of delta systems [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991(2): 141-153.]
- [11] 苏明, 张翠梅. 安棚油田核桃园组三段1油组扇三角洲沉积体系储层精细对比研究[J]. *内江科技*, 2006, 27(5): 142-143. [Su Ming, Zhang Cuimei. Fine-scale comparison of reservoir delta sedimentary system reservoirs in the third member of the oil-bearing group of the Hetaoyuan Formation in Anpeng oilfield [J]. *Neijiang Science and Technology*, 2006, 27(5): 142-143.]
- [12] 杨永兴, 黄琼, 刘万涛, 等. 鄂尔多斯盆地浅水三角洲沉积体系储层非均质性研究: 以马岭油田长8油藏为例[J]. *复杂油气藏*, 2015(3): 39-43. [Yang Yongxing, Huang Qiong, Liu Wantao, et al. Research of reservoir heterogeneity of shallow -water delta system, Ordos Basin: Taking Chang 8 reservoir in Maling oilfield as an example [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2015(3): 39-43.]
- [13] 赵翰卿. 大型河流—三角洲沉积储层精细描述方法[J]. *石油学报*, 2000, 21(4): 109-113. [Zhao Hanqing. Methods for detailed description of large fluvial-delta depositional reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(4): 109-113.]
- [14] 陈欢庆, 穆剑东, 王珏, 等. 扇三角洲沉积储层特征与定量评价: 以辽河西部凹陷某试验区于楼油层为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(1): 14-24. [Chen Huanqing, Mu Jiandong, Wang Jue, et al. Reservoir characteristics of fan delta deposits and its quantitative evaluation: Taking Yulou oil bearing sets in a certain experimental area of west depression in Liaohe Basin as an example [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(1): 14-24.]
- [15] 杨春. 建昌—喀左盆地烃源岩系沉积环境与烃源岩地球化学特征[D]. 长春: 辽宁工程技术大学, 2005. [Yang Chun. The deaositional environment of source rock measure and geochemistry characteristics source rocks in Jianchang-Kazuo Basin [D]. Changchun: Liaoning University of Engineering and Technology, 2005.]
- [16] 傅恒, 刘巧红, 杨树生. 陆相烃源岩的沉积环境及其对生烃潜力的影响: 以准噶尔盆地侏罗系烃源岩为例[J]. *岩相古地理*, 1996, 16(5): 31-37. [Fu Heng, Liu Qiaohong, Yang Shusheng. Sedimentary environments of the limnic source rocks and their influence on hydrocarbon-generating potentiality: An example from the Jurassic source rocks in the Junggar Basin, Xinjiang [J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1996, 16(5): 31-37.]
- [17] 李丹, 杨香华, 常吟善, 等. 澳大利亚北卡那封盆地中上三叠统Mungaroo三角洲陆源有机质分布特征[J]. *古地理学报*, 2014, 16(2): 193-204. [Li Dan, Yang Xianghua, Chang Yinshan, et al. Distribution of the Upper Triassic terrigenous organic matter in Mungaroo delta of North Carnarvon Basin, Australia [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(2): 193-204.]
- [18] 胡忠亚. 沉积有机质的形成作用对沉积有机质物质组成的影响[J]. *硅谷*, 2010(1): 3. [Hu Zhongya. Effect of formation of sedimentary organic matter on composition of sedimentary organic matter [J]. *Silicon Valley*, 2010(1): 3.]
- [19] 卢双舫, 张敏. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 123-124. [Lu Shuangfang, Zhang Min. *Petroleum geochemistry* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 123-124.]
- [20] 许晓明, 胡孝林, 赵汝敏, 等. 澳大利亚北卡那封盆地中上三叠统Mungaroo组油气勘探潜力分析[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(6): 119-127. [Xu Xiaoming, Hu Xiaolin, Zhao Rumin, et al. Exploration potential of Triassic Mungaroo Formation, North Carnarvon Basin, Australia [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2014, 33(6): 119-127.]
- [21] 曹军, 钟宁宁, 邓运华, 等. 尼日尔三角洲盆地超深水原油地球化学特征及盆地原油族群划分新方案[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(4): 1-7, 24. [Cao Jun, Zhong Ningning, Deng Yunhua, et al. Oil geochemistry in ultra-deep water area and a new conception of oil group division in Niger Delta Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26(4): 1-7, 24.]
- [22] 兰蕾, 李友川, 孙玉梅. 南海深水区白云凹陷烃源岩发育与三角洲—滨海相的共生关系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(5): 121-129. [Lan Lei, Li Youchuan, Sun Yumei. Types in source rocks in Baiyun Sag, South China Sea and its bearing on sedimentary facies [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 121-129.]
- [23] 黄保家, 王振峰, 梁刚. 琼东南盆地深水区中央峡谷天然气来源及运聚模式[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(5): 8-14. [Huang Baojia, Wang Zhenfeng, Liang Gang. Natural gas source and migration-accumulation pattern in the central canyon, the deep water area, Qiongdongnan Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26(5): 8-14.]
- [24] 郭召杰. 地质学研究的新思维——历史地质学方法[J]. *地球科学进展*, 1996, 11(1): 59-61. [Guo Zhaojie. A new thought of geology research - historical geology method [J]. *Progress of Geosciences*, 1996, 11(1): 59-61.]
- [25] 吴泰然, 郭召杰, 穆治国, 等. “将古论今”——环境科学研究中的历史地质学方法[J]. *高校地质学报*, 1999, 5(1): 105-109. [Wu Tairan, Guo Zhaojie, Mu Zhiguo, et al. Past is the key to the present: Method of historical geology in environmental sciences [J]. *Geological Journal of China Universities*, 1999, 5(1): 105-109.]
- [26] 高全洲, 沈承德, 孙彦敏, 等. 北江流域有机碳侵蚀通量的

- 初步研究[J]. 环境科学, 2001, 22(2): 12-18. [Gao Quanzhou, Shen Chengde, Sun Yanmin, et al. A preliminary study on the organic carbon weathering fluxes in Bei-jiang River drainage [J]. Environmental Science, 2001, 22(2): 12-18.]
- [27] 蔡进功, 曾翔, 韦海伦, 等. 从水体到沉积物: 探寻有机质的沉积过程及其意义[J]. 古地理学报, 2019, 21(1): 49-66. [Cai Jingong, Zeng Xiang, Wei Hailun, et al. From water body to sediments: Exploring the depositional processes of organic matter and their implications [J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(1): 49-66.]
- [28] 鲍红艳, 吴莹, 张经. 红树林间隙水溶解态陆源有机质的光降解和生物降解行为分析[J]. 海洋学报, 2013, 35(3): 147-154. [Bao Hongyan, Wu Ying, Zhang Jing. Photo-and bio-degradation of dissolved organic matter in mangrove pore-water [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(3): 147-154.]
- [29] 李中乔. 不同典型体系中陆源有机质的分布及影响因素[D]. 上海: 华东师范大学, 2015. [Li Zhongqiao. The distribution and influencing factors of terrestrial organic matter in the typical systems [D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.]
- [30] Ramaswamy V, Gaye B, Shirodkar P V, et al. Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopic signatures in sediments from the Ayeyarwady (Irrawaddy) continental shelf, northern Andaman Sea [J]. Marine Chemistry, 2008, 111(3/4): 137-150.
- [31] Hu L M, Shi X F, Bai Y Z, 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.
- [32] 赵美训, 张玉琢, 邢磊, 等. 南黄海表层沉积物中正构烷烃的组成特征、分布及其对沉积有机质来源的指示意义[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(4): 90-96. [Zhao Meixun, Zhang Yuzhuo, Xing Lei, et al. The composition and distribution of N-alkanes in surface sediments from the South Yellow Sea and their potential as organic matter source indicators [J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(4): 90-96.]
- [33] 陈彬, 胡利民, 邓声贵, 等. 渤海湾表层沉积物中有机碳的分布与物源贡献估算[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(5): 37-42. [Chen Bin, Hu Limin, Deng Shenggui, et al. Organic carbon in surface sediments of the Bohai Bay, China and its contribution to sedimentation [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(5): 37-42.]
- [34] 李中乔, 吴莹, 李珍, 等. 越南红河水下三角洲表层沉积物中有机物分布及来源分析[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(3): 577-583. [Li Zhongqiao, Wu Ying, Li Zhen, et al. Distribution and source of organic matter in the surface sediments from the Red River subaquatic delta, Vietnam [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(3): 577-583.]
- [35] 于培松, 薛斌, 潘建明, 等. 长江口和东海海域沉积物粒径对有机质分布的影响[J]. 海洋学研究, 2011, 29(3): 202-208. [Yu Peisong, Xue Bin, Pan Jianming, et al. Impact of sediment grain size on the distribution of organic matter in Changjiang River Estuary and East China Sea [J]. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(3): 202-208.]
- [36] 朱纯, 潘建明, 卢冰, 等. 长江口及邻近海域现代沉积物中正构烷烃分子组合特征及其对有机碳运移分布的指示[J]. 海洋学报: 中文版, 2005, 27(4): 59-67. [Zhu Chun, Pan Jianming, Lu Bing, et al. Compositional feature of n-alkanes in modern sediment from the Changjiang Estuary and adjacent area and its implication to transport and distribution of organic carbon [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(4): 59-67.]
- [37] 邵锡斌, 吴莹, 胡俊, 等. 颗粒态有机物在长江口及其邻近海域的夏季分布和影响因素初析[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(6): 1288-1294. [Shao Xibin, Wu Ying, Hu Jun, et al. Spatial variability of particulate organic matter in the Changjiang River estuary and adjacent regions in summer [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(6): 1288-1294.]
- [38] 吕艳美, 葛晨东, 高抒, 等. 长江口水下三角洲表层沉积物有机质分布特征[J]. 第四纪研究, 2012, 32(6): 1132-1139. [Lü Yanmei, Ge Chendong, Gao Shu, et al. Distribution patterns of organic matter in the surficial sediment over the Changjiang subaqueous delta [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(6): 1132-1139.]
- [39] Benner R, Benitez-Nelson B, Kaiser K, et al. Export of young terrigenous dissolved organic carbon from rivers to the Arctic Ocean [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(5): L05305.
- [40] Hernes P J, Benner R. Photochemical and microbial degradation of dissolved lignin phenols: Implications for the fate of terrigenous dissolved organic matter in marine environments [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(C9): 3291.
- [41] Galy V, France-Lanord C, Lartiges B. Loading and fate of particulate organic carbon from the Himalaya to the Ganga - Brahmaputra delta [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(7): 1767-1787.
- [42] Tanoue E, Handa N. Differential sorption of organic matter by various sized sediment particles in recent sediment from the bering sea [J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 1979, 35(5): 199-208.
- [43] 王润梅, 唐建辉, 黄国培, 等. 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[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 497-507. [Wang Runmei, Tang Jianhui, Huang Guopei, et al. Provenance of organic matter in estuarine and marine surface sediments around the Bohai Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(3): 497-507.]

- [44] Bianchi T S, Mitra S, Mckee B A. Sources of terrestrially-derived organic carbon in lower Mississippi River and Louisiana shelf sediments: Implications for differential sedimentation and transport at the coastal margin [J]. *Marine Chemistry*, 2002, 77(2/3): 211-223.
- [45] 朱晓军, 蔡进功. 泥质烃源岩的比表面与有机质关系研究进展及意义[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(3): 375-384. [Zhu Xiaojun, Cai Jingong. Progress and significance of research on relation between specific surface area and organic matter in argillaceous source rocks [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(3): 375-384.]
- [46] Mayer L M. Sedimentary organic matter preservation: An assessment and speculative synthesis—a comment [J]. *Marine Chemistry*, 1995, 49(2/3): 123-126.
- [47] Hedges J I, Oades J M. Comparative organic geochemistries of soils and marine sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(7/8): 319-361.
- [48] van Waveren I, Visscher H. Analysis of the composition and selective preservation of organic matter in surficial deep-sea sediments from a high-productivity area (Banda Sea, Indonesia) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 112(1/2): 85-111.
- [49] Tyson R V. The genesis and palynofacies characteristics of marine petroleum source rocks [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1987, 26(1): 47-67.
- [50] Chenu C, Plante A F. Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence: Revisiting the concept of the 'primary organo-mineral complex' [J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 57(4): 596-607.
- [51] Kennedy M J, Pevear D R, Hill R J. Mineral surface control of organic carbon in black shale [J]. *Science*, 2002, 295(5555): 657-660.
- [52] 徐敏. 粘土矿物与有机质的复合及其稳定性研究[D]. 南京: 南京大学, 2013. [Xu Min. Adsorption of organic matter on clay minerals and the stability of the organo-clay composites [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.]
- [53] Bergamaschi B A, Tsamakis E, Keil R G, et al. The effect of grain size and surface area on organic matter, lignin and carbohydrate concentration, and molecular compositions in Peru Margin sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(6): 1247-1260.
- [54] Keil R G, Hedges J I. Sorption of organic matter to mineral surfaces and the preservation of organic matter in coastal marine sediments [J]. *Chemical Geology*, 1993, 107(3/4): 385-388.
- [55] 贾华丽, 郝敏, 孔范龙, 等. 土壤溶解性有机质生物降解研究进展[J]. *生态科学*, 2016, 35(2): 183-188. [Jia Huali, Xi Min, Kong Fanlong, et al. Research progress on the biodegradation of soil dissolved organic matter [J]. *Ecological Science*, 2016, 35(2): 183-188.]
- [56] 曹奇, 雷国良, 蔡炳贵, 等. 福建斗湖表层沉积物的粒度特征及其环境意义[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2018, 13(1): 81-87. [Cao Qi, Lei Guoliang, Cai Binggui, et al. Grain size and environmental significance of lacustrine surface sediment in Lake Douhu, Fujian [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2018, 13(1): 81-87.]
- [57] 程立华, 陈世悦, 姜在兴, 等. 大理盆地隐仙溪河道沉积物粒度分布特征[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(1): 7-11. [Cheng Lihua, Chen Shiyue, Jiang Zaixing, et al. Distribution features of grain size of Yinxian stream sediments in Dali Basin [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2005, 29(1): 7-11.]
- [58] Pelejero C. Terrigenous *n*-alkane input in the South China Sea: High-resolution records and surface sediments [J]. *Chemical Geology*, 2003, 200(1/2): 89-103.
- [59] Yanagi T, Takahashi S, Hoshika A, et al. Seasonal variation in the transport of suspended matter in the East China Sea [J]. *Journal of Oceanography*, 1996, 52(5): 539-552.
- [60] 胡文焯. 西北太平洋悬浮颗粒物的分布、组成及环境演变的初步研究[D]. 北京: 国家海洋局第三海洋研究所, 2016. [Hu Wenyue. The distribution, composition and environmental evolution of suspended particulate matter in the Northwest Pacific [D]. Beijing: Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2016.]
- [61] 石晓勇, 张婷, 张传松, 等. 黄海、东海颗粒有机碳的时空分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2011, 30(1): 1-6. [Shi Xiaoyong, Zhang Ting, Zhang Chuansong, et al. Spatial and temporal distribution of particulate organic carbon in Yellow Sea and East China Sea [J]. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(1): 1-6.]
- [62] Wu Y, Zhang J, Li D J, et al. Isotope variability of particulate organic matter at the PN section in the East China Sea [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 65(1): 31-49.
- [63] 姚根顺, 袁圣强, 吴时国, 等. 琼东南盆地深水区双物源沉积模式及勘探前景[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(6): 685-691. [Yao Genshun, Yuan Shengqiang, Wu Shiguo, et al. Double provenance depositional model and exploration prospect in deepwater area of Qiongdongnan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(6): 685-691.]
- [64] Wang X C, Chen R F, Gardner G B. Sources and transport of dissolved and particulate organic carbon in the Mississippi River estuary and adjacent coastal waters of the northern gulf of Mexico [J]. *Marine Chemistry*, 2004, 89(1/2/3/4): 241-256.
- [65] Sholkovitz E R. Flocculation of dissolved organic and inorganic matter during the mixing of river water and seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1976, 40(7): 831-845.
- [66] 卢飞龙, 蔡进功, 包于进, 等. 粘土矿物保存海洋沉积有机质研究进展及其碳循环意义[J]. *地球科学进展*, 2006, 21

- (9): 931-937. [Lu Longfei, Cai Jingong, Bao Yujin, et al. Summary of processes and significance of clay minerals in marine sedimentary organic matter preservation and in global carbon cycle [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21 (9): 931-937.]
- [67] 范艳君,朱玲,朱伟,等. 珠江口颗粒附着微生物群落沿环境梯度的演替[J]. *渔业科学进展*, 2012, 33 (3): 8-14. [Fan Yanjun, Zhu Ling, Zhu Wei, et al. Succession of particle-attached bacterial community structure along environmental gradient in the Pear River Estuary [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2012, 33(3): 8-14.]
- [68] 丰卫华,王志富,张荣保,等. 宁德海域表层沉积物氧化还原环境特征及其影响因素[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35 (6): 882-887, 907. [Feng Weihua, Wang Zhifu, Zhang Rongbao, et al. The environment characteristics of redox in the surface sediments of Ningde coastal sea area in relation to influence factors [J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35 (6): 882-887, 907.]
- [69] Blair N E, Leithold E L, Aller R C. From bedrock to burial: The evolution of particulate organic carbon across coupled watershed-continental margin systems [J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1/2/3/4): 141-156.
- [70] 陈文昭,易月圆,余翔翔,等. 小球藻来源溶解有机质的光化学降解特性[J]. *环境科学学报*, 2012, 32 (5): 1095-1103. [Chen Wenzhao, Yi Yueyuan, Yu Xiangxiang, et al. Photochemical degradation of autochthonous dissolved organic matter from the culture media of *Chlorella* spp. [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(5): 1095-1103.]
- [71] 丁薇. 高原湖泊陆源有机碳的输入及其碳同位素特征研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2016. [Ding Wei. Input and carbon isotope characteristics of terrestrial organic carbon in plateau lakes [D]. Guizhou: Guizhou University, 2016.]
- [72] 于灏. 颗粒态陆源有机物在长江和东海陆架区的迁移和埋藏[D]. 上海: 华东师范大学, 2007. [Yu Hao. Transport and burial of particulate terrigenous organic matter in Changjiang (Yangtze River) and East China Sea shelf-illustrated by lignin [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007.]
- [73] Benner R. What happens to terrestrial organic matter in the ocean? [J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1/2/3/4): 307-310.
- [74] Liu M, Hou L J, Xu S Y, et al. Organic carbon and nitrogen stable isotopes in the intertidal sediments from the Yangtze Estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52(12): 1625-1633.
- [75] Gordon E S, Goñi M A. Sources and distribution of terrigenous organic matter delivered by the Atchafalaya River to sediments in the northern gulf of Mexico [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(13): 2359-2375.
- [76] Peterson B, Fry B, Hullar M, et al. The distribution and stable carbon isotopic composition of dissolved organic carbon in estuaries [J]. *Estuaries*, 1994, 17(1): 111-121.
- [77] Lamb A, Leng M, Mohammed M U, et al. Holocene climate and vegetation change in the Main Ethiopian Rift Valley, inferred from the composition (C/N and $\delta^{13}\text{C}$) of lacustrine organic matter [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23 (7/8): 881-891.
- [78] 张成君,张菀漪,樊荣,等. 湖泊环境早期成岩作用对沉积物中有机质C/N和碳同位素组成的影响[J]. *地球环境学报*, 2012, 3 (4): 1005-1012. [Zhang Chengjun, Zhang Wanyi, Fan Rong, et al. Early diagenesis impacting C/N and organic isotopic compositions in the lacustrine sediments [J]. *Journal of Earth Environment*, 2012, 3(4): 1005-1012.]
- [79] 曹梦莉,马倩倩,吴莹,等. 南海北部和海南岛附近海域表层沉积物中有机质的分布和降解状态的差异[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48 (2): 258-265. [Cao Mengli, Ma Qianqian, Wu Ying, et al. Difference in organic matter distribution and degradation in surface sediment between northern South China Sea and Hainan Island [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(2): 258-265.]
- [80] 黄保家,李绪深,王振峰,等. 琼东南盆地深水区烃源岩地球化学特征与天然气潜力[J]. *中国海上油气*, 2012, 24 (4): 1-7. [Huang Baojia, Li Xushen, Wang Zhenfeng, et al. Source rock geochemistry and gas potential in the deep water area, Qiongdongnan Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(4): 1-7.]
- [81] 张强,毛超林,贺晓苏,等. 深水浊积型烃源岩的发现与启示[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(2): 71-76. [Zhang Qiang, Mao Chaolin, He Xiaosu, et al. The discovery of deepwater turbidite source rock and its enlightenment [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(2): 71-76.]

Control Factors of Terrestrial Organic Matter Distribution in Delta-shallow Sea Sedimentary System

QU Tong^{1,2}, GAO Gang^{1,2}, XU XinDe³, LIU FengYan⁴

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3. CNOOC China Limited, Zhanjiang Branch, Zhanjiang, Guangdong 524057, China

4. Exploration & Development Research Institute, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China

Abstract: The delta-shallow sea sedimentary system has both terrigenous and marine organic matter, and the distribution of terrestrial organic matter to the deep water is limited. However, more and more deep water oil and gas exploration practices have found the contribution of terrestrial organic matter, which proves its importance to oil and gas development. Based on the systematic analysis of the terrestrial organic matter distribution law, this paper expounds on the relevant factors affecting the distribution of terrestrial organic matter and their interrelationships. The controlling factors of terrigenous organic matter distribution are systematically expounded. The results show that the distribution of terrigenous organic matter is controlled by multiple factors, such as grain size of elastic particles, mineral composition, organic matter composition, hydrodynamic type, hydrodynamic intensity, water salinity, and PH value, and the factors are interrelated and interacted. The control factors can be systematically summarized into sedimentary source condition, transportation condition, and sedimentation and preservation condition. Hydrodynamic type and intensity are the key factors for the existence of terrigenous organic matter in the deep water area. Biological action may become the main controlling factor of terrestrial organic matter distribution. Environmental factors and diagenesis are important factors affecting the preservation of terrestrial organic matter.

Key words: delta-shallow sea sedimentary system; terrestrial organic matter; distribution law; influencing factor