

琼东南盆地古近纪泥炭沼泽破坏与重建作用 对煤型源岩物质形成的控制

李增学^{1,2}, 刘莹^{1,2}, 李晓静^{1,2}, 张功成^{1,2}, 孙瑞^{1,2}, 王东东^{1,2}, 尹露生^{1,2}, 刘佳敏^{1,2}

(1. 山东科技大学 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100010)

摘要:煤系及煤层是重要的烃源岩类型,已引起广泛重视。以中国南海琼东南盆地为例,剖析泥炭沼泽破坏、重建作用与煤及陆源海相烃源岩形成的成因关系,归纳了泥炭沼泽破坏作用与泥炭物质形成和聚集的“源-汇系统”的特点。研究认为风暴事件是异地煤和陆源海相烃源岩形成的主要动力因素之一,并在此基础上建立了中国南海边缘海盆地泥炭风暴沉积模式。泥炭沼泽破坏和重建作用与泥炭物质的形成、分散及聚集过程是相互作用的关系,且具有复杂多变性;泥炭沼泽破坏作用使泥炭物质被大部或全部分解或搬运,而重建作用则是在适宜的气候条件下使泥炭沼泽发育的过程得以恢复;风暴事件是南海新生代盆地泥炭沼泽发生破坏作用以及泥炭物质被远距离搬运并沉积于海相环境的主要动力因素之一。风暴潮强烈地侵蚀和扰动滨岸带泥炭沼泽,导致大量泥炭碎屑物质被掀起而卷入海水中,经由风暴重力流和浊流搬运,最终沉积形成含有陆源海相有机质的烃源岩。

关键词:泥炭沼泽破坏作用;煤系“源-汇系统”;风暴事件;近源沉积;陆源海相烃源岩;琼东南盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

The control of Paleogene peat swamp destruction and reconstruction on the formation of coal-type source material in the Qiongdongnan Basin

Li Zengxue^{1,2}, Liu Ying^{1,2}, Li Xiaojing^{1,2}, Zhang Gongcheng^{1,2}, Sun Rui^{1,2}, Wang Dongdong^{1,2},
Yin Lusheng^{1,2}, Liu Jiamin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Sedimentary Mineralization and Sedimentary Minerals in Shandong Province, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Beijing Research Center, CNOOC, Beijing 100010, China)

Abstract: Coal systems and coal seams have been widely valued as an important type of hydrocarbon source rocks for oil and gas reservoirs. Taking the Qiongdongnan Basin of the South China Sea as an example, this study analyzes the genetic relationship between the destruction and reconstruction of peat swamps and terrigenous marine hydrocarbon source rocks, and summarizes the characteristics of the peat swamp destruction as well as the formation and accumulation of peat substances. It is suggested that storms are one of the main dynamic factors for the formation of different land coal and terrigenous marine hydrocarbon source rocks, and this leads to the proposition of a sedimentation mode for the peat storm in the edge of the South China Sea Basin. The results have shown that an unstable and complex interactive relationship exists between the destruction and reconstruction of peat swamps and the formation, decentralization and aggregation of peat substances. The destruction caused a full or partial decomposition and transportation of the peat substances, while the rebuilding restored the development of peat swamps under the suitable climatic conditions. Storms is behind all these destruction and long-distance transportation of peat substance in the swamps in the Cenozoic basins, South China Sea. With storms violently invading and disturbing the coastal peat swamps, large amount of peat clasts were rooted up and carried away by seawater, transported along with storm gravity flow and turbidity flow, and eventually deposited within source rocks as terrigenous marine organic matter.

收稿日期:2022-03-21;修订日期:2022-09-22。

第一作者简介:李增学(1954—),男,教授、博士生导师,煤地质学、能源地质学与盆地分析。E-mail: lizengxue@126.com。

通讯作者简介:刘莹(1969—),女,高级实验师,能源地质与实验地质。E-mail: liuying-69@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42072188,41872172)。

Key words: peat swamp destruction, coal-system source-sink system, storm, near-source deposition, terrigenous marine hydrocarbon source rocks, Qiongdongnan Basin

引用格式:李增学,刘莹,李晓静,等. 琼东南盆地古近纪泥炭沼泽破坏与重建作用对煤型源岩物质形成的控制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1309-1320. DOI: 10. 11743/ogg20220603.

Li Zengxue, Liu Ying, Li Xiaojing, et al. The control of Paleogene peat swamp destruction and reconstruction on the formation of coal-type source material in the Qiongdongnan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1309-1320. DOI: 10. 11743/ogg20220603.

自从煤型油气被发现以来,煤层、煤系作为重要的油气烃源岩类型而被广泛重视^[1]。煤型烃源岩,实际上不是一种单纯的烃源岩概念。煤是一种具有鲜明特色的生烃源岩。而煤系实际上是一个具有复合性含义的概念,属于生烃源岩的岩系,除了煤之外,还有炭质泥岩、含炭质细粒岩等,是与煤的形成具有同源、同环境的沉积型源岩。

泥炭沼泽是成煤盆地中的一种特殊的沉积相类型。成煤环境重塑是煤地质学研究的重要理论与内容^[2],尤其是泥炭沉积环境、泥炭堆积古地理特征及背景条件的恢复,泥炭形成过程中生物群的相互作用等^[3]。

泥炭沼泽一般在潮湿气候条件下比较容易发育^[2],但有些泥炭是在相对干燥的条件下形成的,如与河流供给有关的淡水沼泽^[4]。形成泥炭的植被结构与气候变化存在明显响应关系^[5]。受温暖干燥的气候影响,地下水位下降,导致泥炭物质分解加剧^[6],这是泥炭沼泽发生破坏的方式之一。

有关泥炭沼泽环境的破坏和重建作用的研究尚没有形成很成熟的理论。国外学者认为在进积过程中,碎屑沉积物的掩埋作用使泥炭沉积物得以保存,区域构造作用和海平面变化、沉积物压实作用等是重要的控制因素^[7-10]。可以看出,这里仅仅指出了泥炭物质保存的一种机制及控制因素,并没有指出泥炭沼泽环境的破坏和重建的作用过程及机制。

泥炭形成与聚集的有利地带一般是有海侵作用发生的海岸湿地和三角洲平原,泥炭沼泽随着植物碎屑在横向或纵向上有规律的变化而发生改变,即随着海平面上升由潮汐沼泽过渡为淡水沼泽^[11-12]。

泥炭沼泽破坏与重建在泥炭物质的聚集与分散过程中是一种相互作用的关系,是成煤环境分析的重要组成部分。泥炭沼泽的破坏作用是一个复杂的过程,而破坏过程为泥炭物质的另一种聚集方式(如分散漂移、重力流携带等)创造了条件。如在中国南海新生代成煤时期的海相沉积中发育大量陆源有机质^[13-14],即是泥炭沼泽破坏的结果。“源-汇系统”理论^[15-20]阐明了包括地貌演化、源-沉积体系响应及其耦合模式^[21-22],以及深水

源-汇响应多尺度气候变化过程产物链接及反馈机制^[23]等,为泥炭沼泽破坏后泥炭物质运移、再分配机制研究提供了理论支持。

泥炭沼泽被破坏是泥炭形成与堆积的可容空间发生突然变化的结果。可容空间(accommodation space)是层序地层学概念体系中的关键术语,指的是盆地底面到基准面(近似于海平面、湖平面、潜水面)之间的空间。由于泥炭沼泽具有一种特殊的地理特征,因此可以认为泥炭沼泽的可容空间的顶界面是泥炭所能聚集的最大高度^[24]。但该最大高度是动态的,尤其是当地质事件或气候发生突变时,可容空间会随之发生变化。正常情况下,在泥炭聚集期间,盆地基准面变化速率受控于盆地基底沉降作用,基准面变化又控制着可容空间的增大或减少^[25-27]。在风暴潮活动时期,浪基面发生剧烈变化,风暴浪基面比正常浪基面要深的多。随之基准面发生很大的变化,导致可容空间发生变化。

近年来,煤地质学家及沉积学家对不同盆地厚煤层中反映气候变化的天文周期信息开展了研究,已经注意到厚煤层的形成与天文周期变化的密切关系^[28],发现厚煤层中煤岩显微组分以及灰分在垂向上的周期性变化和沉积间断面的存在,是多期次泥炭沼泽叠加形成厚煤层的重要依据。这可能是泥炭沼泽破坏与重建作用受气候周期性变化影响的例证。

泥炭沼泽发育与泥炭生产、聚集始终处于敏感状态,即对气候变化和地质背景条件具有很强的敏感性,因此有很多因素会造成泥炭沼泽的破坏,如泥炭沼泽古地理条件和水介质性质的突变,极端气候变化(诸如风暴事件^[29-30]、洪水事件)等。泥炭沼泽可能在任何地理背景下发育,最适宜的地带是陆地与水域的结合带,或者过渡带,如盆地的斜坡带(缓坡带、陡坡带、构造活动区相对稳定带)。

泥炭沼泽的破坏是一种地质作用机制,一方面可以造成泥炭沼泽原有状态发生变化,另一方面可以使已经形成的泥炭物质发生不同程度的迁移,使泥炭物质重新分布,进而可以导致一种新的沉积作用发生,如在海相沉积环境中有大量泥炭物质聚集。

1 煤型烃源岩:煤、煤系与陆源海相烃源岩

1.1 琼东南盆地地质概况

琼东南盆地处于南中国海北部大陆边缘的西段,是古近纪—第四纪形成的被动大陆边缘盆地。盆地经历了多期构造与沉积演化,古近纪始新世—渐新世盆地处于断陷期,新近纪—第四纪盆地处于拗陷期^[31]。渐新世早期,盆地主要为海—陆过渡相沉积,沉积了崖城组。渐新世晚期—第四纪盆地主要为海相沉积,自下而上依次沉积了陵水组、三亚组、梅山组、黄流组与莺歌海组等^[32-33](图1)。钻探岩心、测井资料和地震探测资料证实,崖城组的煤层厚度薄,最厚不超过40 cm(图2),具有层数多、稳定性差、难以对煤层进行横向对比等特点^[34-35]。

1.2 泥炭沼泽破坏、重建作用与煤及陆源海相烃源岩的成因关系

古气候和古植物是成煤的必要条件。古构造控制含煤沉积旋回和成煤作用的强度。古地理是泥炭沼泽

发育和泥炭聚集的控制条件^[36]。古沉积是泥炭沼泽被破坏后泥炭物质远距离聚集的控制因素,与古水文和水介质特征密切相关。泥炭层中一部分泥炭物质在原地或搬运一定距离后形成单独的煤层,另一部分泥炭物质则可能搬运到较远甚至盆地深水区而沉积下来,形成“陆源海相烃源岩”。

根据前人煤层厚度划分标准^[1]和陆源有机质占总有机质的比例^[37](表1),结合泥炭沼泽破坏与重建机制的概念,归纳出几种成煤与陆源海相烃源岩的成因理论。

1) 成煤好且陆源有机质好,即有利的成煤环境下形成较厚的煤层,有充足的泥炭碎屑物质供应,利于陆源有机质在深水区沉积。其特点是,泥炭堆积连续性好、稳定,但泥炭沼泽也发生过破坏作用,源源不断的泥炭或碎屑快速搬运,如异重流,对于成煤和深水陆源有机质堆积都有利。

满足植物繁盛的有利气候条件,泥炭形成与堆积的速率较大。泥炭堆积带的基底沉降速率较小,接受了大量的泥炭。但是,潮湿的气候可以有足够的水源,古地理条件有利于形成大型的冲积体系,会有部分泥炭沼泽被破坏,从而造成泥炭堆积不断地被搬走,甚至会有较多的泥炭搬运至深水地带。深水沉积混合有大

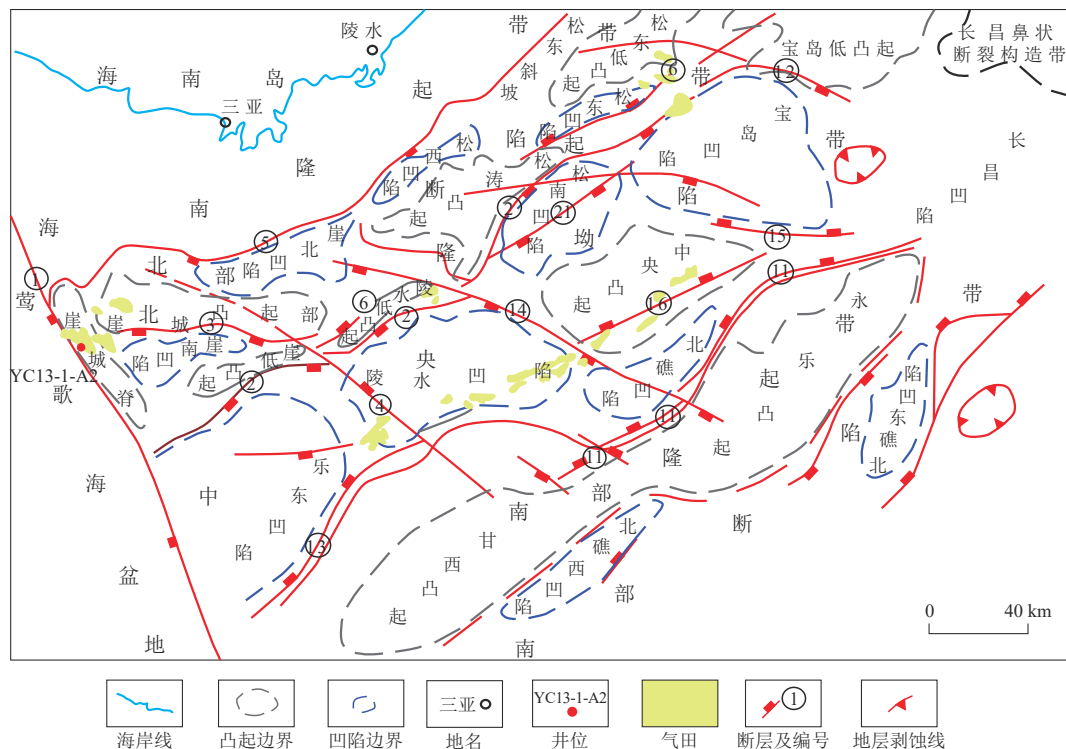


图1 琼东南盆地构造格局与气田分布(据参考文献[30,31,33]修改)

Fig. 1 Sketch map showing the tectonic layout and gas field locations in the Qiongdongnan Basin (Modified from [30,31,33])

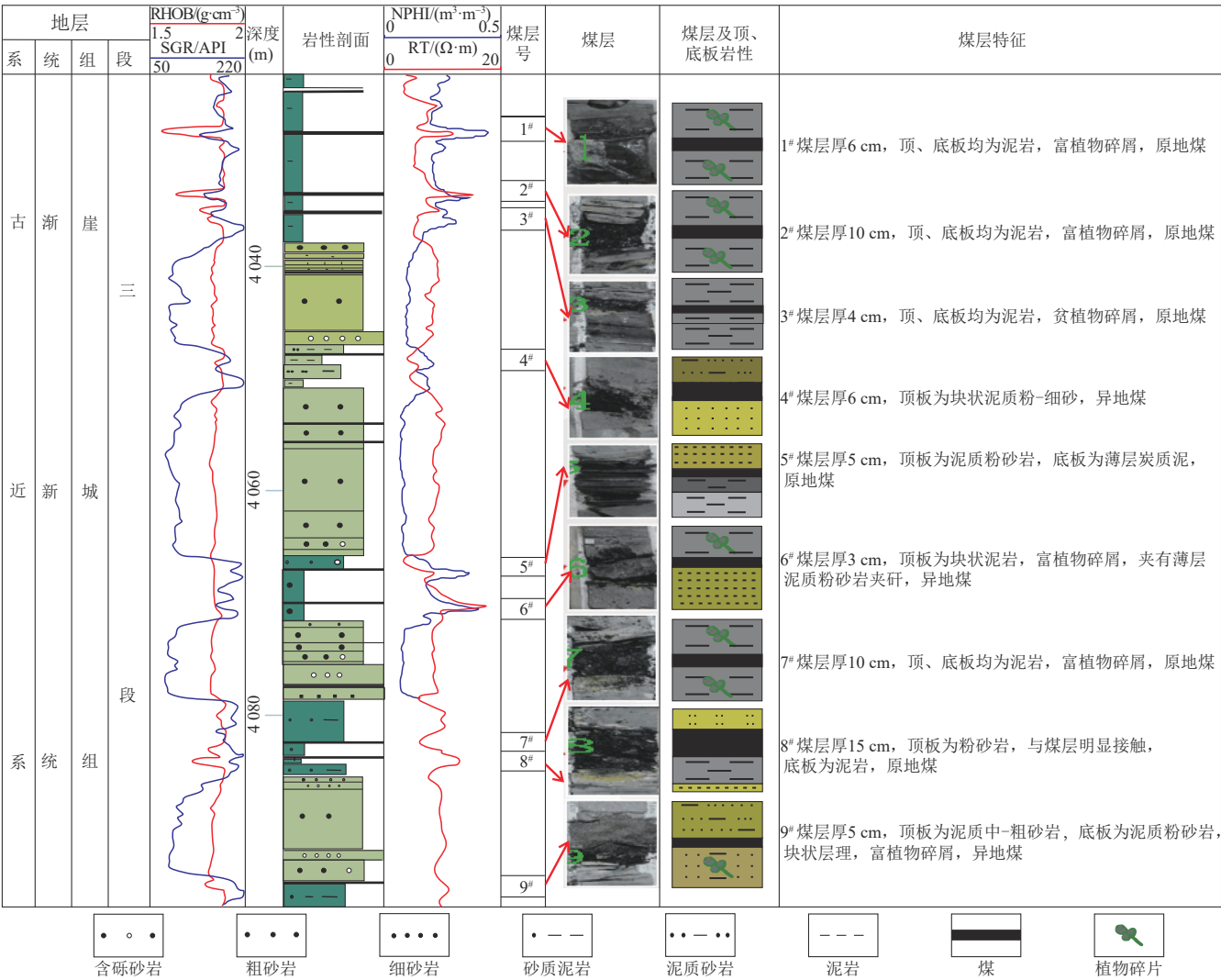


图2 琼东南盆地 YC13-1-A2 井原地煤与异地煤地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column showing autochthonous and allochthonous coals in Well YC13-1-A2, Qiongdongnan Basin

表1 煤层厚度分级和成煤及陆源有机质评价标准
Table 1 Coal seam thickness grading and non-marine organic matter assessment

煤层			陆源有机质	
分级	厚度/m	评价结果	占总有机质比例/%	评价结果
煤线	<0.3	成煤不好	边界值<40	不好
极薄煤层	0.3~0.5			
薄煤层	0.5~1.3			
中厚煤层	1.3~3.5	成煤好	边界值>40	好
厚煤层	3.5~8.0			
巨厚煤层	>8.0			

量陆源有机物质。

2) 成煤好但陆源有机质不好,即有利的成煤环境下形成较厚的煤层,但没有较为充足的泥炭碎屑物质供应至盆地深水区沉积。此种情况下泥炭沼泽基准面

下降与泥炭物质供应具有好的适应性,原地堆积持续时间较长。其特点是,泥炭堆积连续性好,但泥炭沼泽局部被破坏,泥炭或碎屑生产少,搬运或漂移至盆地深水区的陆源有机质更少。

满足植物繁盛的有利气候条件,泥炭形成与堆积的速率与基底沉降速率处于均衡状态,且保持时间较长,接受了大量的泥炭堆积且被保存下来。泥炭沼泽被破坏的程度较弱,有较少的泥炭被流体搬运至深水地带。或者泥炭沼泽发生破坏作用,而泥炭在被搬运过程中损失殆尽,很少部分搬运到较远地带以及深水区。

陆相湖泊盆地中泥炭沼泽环境的破坏作用有利于厚层泥炭的形成,但泥炭多被搬运至一定距离后迅速堆积和保存,从而形成巨厚层异地煤。因为原地厚层泥炭层难以支撑后续的泥炭形成和可持续性连续堆积,此外天然火灾事件也会频频发生,导致泥炭原地堆

积中断。

3) 成煤不好但陆源有机质好,大量陆源有机质形成于盆地深水区,成为优质煤型烃源岩。泥炭堆积虽然不连续,但是泥炭沼泽因破坏作用产生大量泥炭或碎屑,它们被及时搬运或漂移至较远地带。这种古地理条件虽然有较好的成煤气候条件,但泥炭沼泽基准面变化不利于泥炭在原地堆积下来,时而发生的洪水将泥炭及时搬运至远处沉积下来,有利于陆源有机质堆积。

煤系沉积序列中煤层不发育,或者厚度较薄,可以见到较多的煤层,甚至很多煤线。盆地深水沉积中有大量的陆源有机质,呈聚集态势,分布范围较广,可以成为优质的煤型烃源岩。搬运的机制可能包括冲积扇或者重力流,甚至是大面积的面流。最具代表性的是中国南海新生代成煤环境及陆源有机质的形成机制。

4) 成煤不好且陆源有机质不好。泥炭堆积生产不具连续性,成煤环境不稳定,而且时常发生的构造与沉积事件使泥炭沼泽常被破坏,导致泥炭碎屑生产量较少或很少,不能被及时被搬运至较远的地带沉积。

气候条件不利于植物生长,古地理条件不利于煤的沉积,泥炭堆积速率大于基底沉降速率,泥炭很快被分解,并且又没有搬运介质将泥炭物质搬运至有利的保存地带。

5) 不成煤但在沉积物质中有少量陆源有机质。由于开放性环境持续时间较长,已经形成的泥炭物质,不断被分解殆尽,仅有少部分泥炭物质被流体带走在深水区沉积下来。

通过钻井岩心和测井数据,以及煤岩组分和关键煤质指标(如灰分)含量的分析,对琼东南盆地原地煤与异地煤进行了识别(图2)。

原地煤(主要烃源岩类型)的识别标志有:泥炭沼泽中,植物残体在原地堆积,形成单独层位;煤层底板为泥岩,可见植物根系(根土岩),煤层与底板为渐变沉积;煤层的结构构造完整,光泽较强;煤的灰分产率相对较低,平均为22%。

异地煤(次要烃源岩类型)的识别标志有:植物残体或泥炭被搬运至植物生长地之外的地区,再次堆积,形成单独层位;煤层底板为砂岩等,底板中无植物根系(根土岩),煤层与底板呈突变接触;煤层的结构构造较破碎,光泽较暗淡;煤的灰分产率相对较高,平均为52%。

陆源分散有机质(陆源海相泥岩),即植物碎屑或泥炭物质被搬运至植物生长地之外的地带,呈碎屑或细粒状态,与碎屑物质混合沉积,不能形成单独的煤

层。其特点是有机质丰度较高,以陆源高等植物有机质为主,海源有机质较少;陆源有机质在泥岩和砂岩中均有分布,但多以泥岩为主,多呈分散状出现,地层厚度大。

2 泥炭沼泽破坏作用的原因

导致泥炭沼泽破坏的原因很多,如剧烈的构造活动、动荡的水文条件(风暴、气候变化导致的洪水事件)等。破坏作用导致泥炭物质的产生、搬运与聚集。泥炭物质与细粒沉积物以及泥质等混合,被水流带到较远的地方,甚至汇水盆地较深水地带再次沉积。因此,在搬运过程中呈分散状态的泥炭物质是与细粒及泥质沉积物不断混合的,形成含陆源有机质沉积的深水沉积。需要指出的是,泥炭沼泽破坏作用的程度是千差万别的。

泥炭沼泽严重破坏,是指泥炭沼泽几乎全部被破坏,泥炭物质几乎全部被搬运或分解掉。如强大的风暴潮导致巨浪向岸边推进,侵袭的海水淹没处于发育期的泥炭沼泽,回流强烈的侵蚀作用将已经堆积的泥炭物质挖蚀、搬运。在此种情况下,不可能形成较厚的煤层,可能形成薄煤层或煤线,其顶底板比较杂乱。

泥炭沼泽的破坏作用并不是一种完全进行到底的过程,但原有泥炭形成与聚集的环境已被打破,泥炭物质可能大部或全部被分解掉或搬运走。而重建作用则是在适宜的气候条件下,泥炭沼泽恢复发育的过程。

2.1 古地理条件

比较而言,在盆地陡坡带植物碎屑或泥炭物质易发生异地堆积,形成异地泥炭堆积层,陆源碎屑成分较多,成熟度较差。

泥炭物质在陡坡带发生同盆异地聚集是异地成煤的形式之一。已经成型的泥炭沼泽及其堆积成层的泥炭,受突发性洪水冲击作用、河道侧蚀作用以及决口作用等影响,会被冲蚀或者侧蚀引发坍塌,从而被水流带至其他稳定环境中聚集沉积。如果这种稳定的环境能保持持续较长时间,则泥炭物质会发生连续堆积作用,进而形成异地泥炭堆积。此种情况下,水体带来的不完全是泥炭物质,可能夹杂着较多的陆源物质(图3)。

在盆地演化过程中最稳定时期,原地堆积易发生在缓坡地带,三角洲体系也证明是最好的成煤沉积体系。在陡坡地带,泥炭或植物碎屑受自身的重力作用,

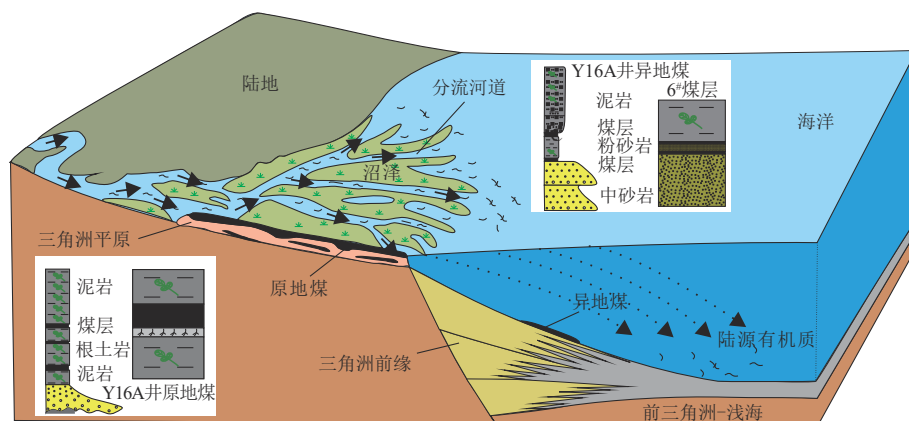
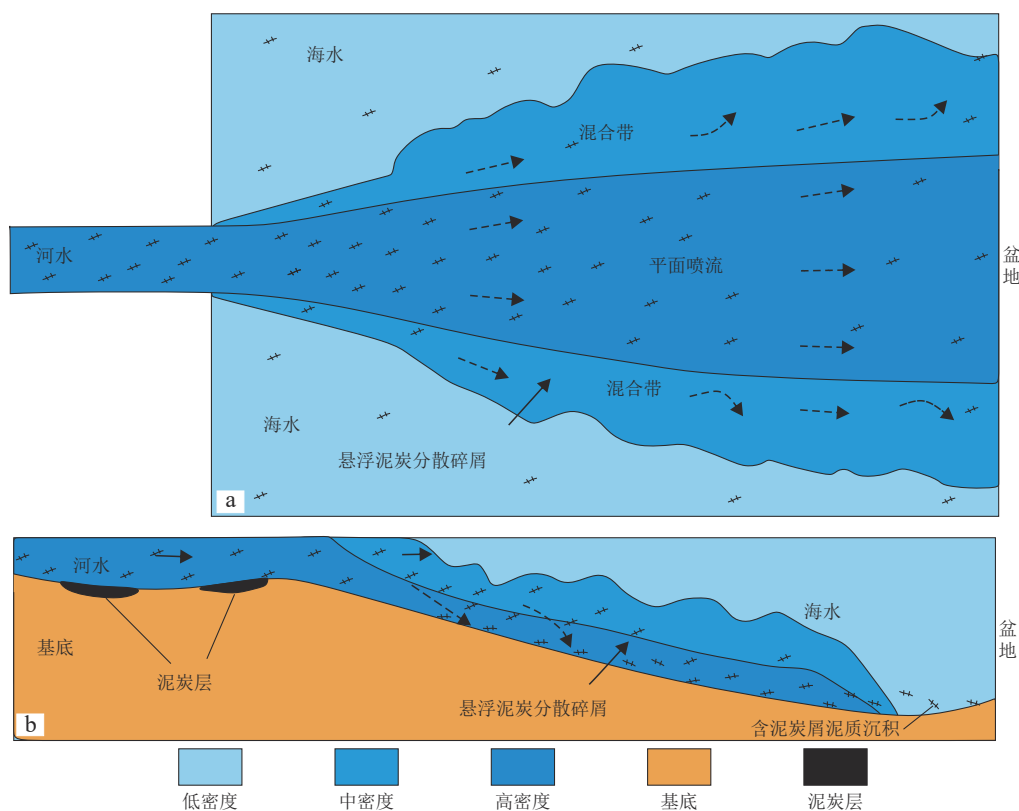


图3 琼东南盆地泥炭聚集模式

Fig. 3 Proposed model showing peat accumulation in the Qiongdongnan Basin

图4 河水密度大于海水密度时泥炭物质随河水沿基底呈轴状沉积^[38-39]Fig. 4 Proposed model showing the peat material being carried away by river water and axially depositing along the basement when the river water surpassing sea water in terms of density^[38-39]

a. 平面图; b. 剖面图

或者受辫状河流水的动力作用,可沿陡坡向盆地内部滑落聚集,发生盆内异地泥炭聚集作用。

2.2 水动力与水密度

泥炭物质的运移是一个复杂的过程。陆源有机质搬运至深水区的路径主要有扇三角洲、辫状河三角洲以及三角洲分流河道等,搬运的主要动力形式有单

向流、双向流、面流、风暴旋流、重力流、突发性洪水、河道侧蚀作用、决口作用、构造活动(包括地震)以及风暴流等。泥炭沼泽会遭受多期次的破坏作用,同时也会发生持续的破坏作用;在破坏的过程中,泥炭沼泽还会有增生发育,使得泥炭物质得到一定程度的补充(图4)。

正常细粒三角洲的水流状态有3种:高密度流、等

密度流和低密度流^[38-39]。由于河口处单向流的喷射作用,使得水动力条件发生显著改变,被水流携带来的泥炭呈不均匀分散状漂移。在盆地中,这类密度流会导致不同的细粒物质的分布与沉积特点。当泥炭沼泽被破坏时,进入盆地的水流密度与动力不同,泥炭物质的搬运与沉积分布也会有较大的差异。

泥炭被汇水盆地水流携带的过程是比较复杂的,受以下因素影响:河流水体与海水密度差、潮汐流作用、沿岸流强度、波浪波及强度与深度、风暴流(特别是风暴潮回流)等。如果泥炭沼泽被破坏的动力是风暴流,那么风暴潮回流可以将泥炭携带到盆地深水地带。有利于分散有机质沉积的可能区域是:正常浪基面以下、风暴浪基面以下,甚至浊流沉积中也含有数量不等的陆源有机质。

河流水体与海水密度差是影响分散有机质沉积范围及分布状态的主导因素,其他因素如潮汐流、沿岸流和波浪强度等因素,对分散有机质分布有改造作用。

当河流水体密度大于海水密度时,水体携带由三角洲平原区冲蚀而来的泥炭物质,迅速下沉并随河水沿基底呈轴状向盆地撒开状沉积,但距离不会很远。当河流水体密度小于海水密度时,泥炭物质随河水沿盆地水面呈轴状向盆地内部散开,并逐渐沉积下来。此种情况下,泥炭物质在盆地水体中漂移较长距离,而后与其他细粒或泥质一起发生沉积,其范围及形态大致呈扇状。当河流水体与海水密度基本相等时,河流与盆地水体发生混合,此时泥炭物质也会随河水与盆地水体混合,其分散状态一般呈面状沿岸漂移,与其他物质如细粒或泥质一起沉积。此种情况下,泥炭物质不会漂移很远,其多为沿岸呈短轴状分布。

最有利于泥炭物质在盆地内远距离搬运、且可能保存最完整的动力形式是高密度流,特别是风暴流导致泥炭沼泽被破坏,风暴潮回流携带大量泥炭物质,可能混入更多的无机物质,呈混合状态,沿着盆地底部形成平面扩散的喷流和重力流,形成陆源海相有机质分布带。而等密度流和低密度流所携带的泥炭物质的搬运与沉积,受正常河口动力和盆地内部水动力条件的限制,泥炭物质的漂移、分散以及沉积需要较长时间在有氧参与的条件下进行,被分解的过程复杂。因此,这两种情况下海相沉积中含有陆源有机质的数量要比高密度流的少很多。因此在扇三角洲前缘以陆源海相烃源岩为主,这类烃源岩含有河流输入的丰富的陆源有机质^[40]。

2.3 风暴事件

南海是全球台风活动频繁的主要区域之一,一年四季均有台风活动。研究南海活动的台风(包括南海生成的台风和西北太平洋移入南海的台风),对掌握南海台风活动规律及对海底沉积物控制作用和影响是十分必要的。

据气象统计,在南海活动的热带气旋占整个西北太平洋地区生成的热带气旋总数的42.5%,其中台风占41.1%。近30年在南海共出现360余次台风,平均每年11.1次;热带低压148次,平均每年4.5次。由此可见,在南海活动的热带气旋主要是台风,占总数的71.2%,其中强台风198次,平均每年6.0次,占总数的38.5%,热带低压仅占总数的28.8%。将今论古,可以推测在古近纪,南海风暴潮应该频繁发生,影响和改造着沿岸泥炭沼泽。

2.3.1 风暴沉积与风暴异地煤

在陆地环境和海洋环境中均可以发生突发性的事件沉积。在海洋环境中,最普遍的事件沉积是风暴沉积和重力流沉积(风暴浊流)。在中国南海盆地含煤沉积以及含陆源有机质的沉积中,可以证实风暴事件的存在。

风暴流除了在风暴潮发生时对海底沉积物进行扰动、破坏外,还在风暴潮的推动下,通过推向岸边的海浪对泥炭沼泽产生极大的破坏作用。风暴潮回流对滨岸带有很大的侵蚀作用。风暴事件是侵蚀到再沉积的改造过程,从风暴早期的高峰到晚期的衰退,表现出从高能到低能的变化。在风暴高峰时悬浮物质中含有粗碎屑物质、细粒物质(包括泥炭物质),一旦风势衰退或平息,立即发生沉积分异,形成明显的从粗变细的韵律层。如果风暴潮回流裹挟的泥炭物质比较丰富,就可能形成一定厚度的异地泥炭层堆积,最终形成异地煤。

通过陆表海盆地与边缘海盆地成煤特征的比较分析^[41],发现在中国南海琼东南盆地古近系崖城组发现的异地煤,也具有稳定陆表海盆地中泥炭沼泽被破坏形成的风暴异地煤的基本特征(图2)。但是琼东南盆地古近系崖城组中发育的主要是薄煤层,甚至是极薄煤层、煤线,因此其形成机制更复杂。

2.3.2 风暴潮回流破坏泥炭沼泽

通过对海岛、海洋沉积和海岸带及其岛屿的沉积过程进行研究,发现南海海啸事件在沉积序列中留下了记录^[42]。通过分析琼东南盆地陡坡区重力流的沉

积特征,认为浅水底流与峡谷中浊流的相互作用,导致了峡谷不同区带表现出不同的沉积样式。在峡谷头部区域,浅水底流比浊流的作用更加强烈^[43-44]。这些研究佐证了风暴浊流沉积的存在。因此,可以认为在南海古近纪和新近纪的极端气候条件下,泥炭沼泽被破坏,风暴潮回流形成的重力流进入深水是一个极有可能的地质事件。

风暴对陆地与海洋之间的过渡带,即泥炭沼泽发育的地带,有极大的破坏作用。但不是所有的泥炭沼泽都被破坏,进而导致泥炭的生产停滞。本文认为,风暴沉积有几个重要的作用,即过渡带的破坏侵蚀作用、风暴潮回流在风暴衰退期的近源沉积作用,以及深水的远源细粒陆源有机质的沉积作用,典型的是风暴浊流沉积和含陆源有机质的正常海洋沉积。胡益成等^[29-30]对河南地区晚石炭世含煤地层中风暴沉积进行研究,认为其应该属于风暴潮回流的近源沉积类型。在中国南海盆地发现的陆源海相有机质是生烃源岩的重要组成部分,对整个风暴沉积的成因机制应有更科学合理的解释。需要指出的是,由于其与在琼东南盆地发现的异地煤仅具有一定的相似性,因而只能作为近源风暴沉积的佐证之一,并不具有完全对应的价值。其与琼东南盆地异地煤的主要差异是煤层厚度不同,这种差异主要是由盆地坡度与泥炭物质供应关系不同造成的。

综上分析,本文提出了琼东南盆地风暴作用形成陆源海相烃源岩的模式(图5)。强烈的风暴潮是重要的地质作用,以其巨大的威力侵蚀海岸,不仅通过风暴涡流对海底沉积物进行搅动、挖掘和改造,更重要的是,强烈的潮流向岸进袭,甚至达到陆上很远的地方,风暴流对滨岸沉积物进袭侵蚀、破坏,回流进行挖蚀和快速搬运。尤其是沿岸及过渡带泥炭沼泽的破坏很严重,强烈地侵蚀和扰动滨海泥炭层和淹没的泥炭层,并使大量的泥炭物质被掀起而卷入于海水中。在风暴高峰过后,随着底摩擦作用的增强和风暴作用的减弱,向岸推进的风暴流达到极限^[30]。继而出现的是携带着大量泥炭物质的风暴潮回流,在重力作用下,流速不断增大,被搬运走的泥炭物质可以在适合的地理部位聚集,形成风暴异地煤。异地煤是风暴近源沉积的典型类型(图5)。

风暴停止,但回流的作用并没有随之停止,形成的重力流持续沿着盆地斜坡向深部推进,其所携带的泥炭在深水区与泥质一起沉积下来,形成含有陆源有机质的海相沉积。泥炭沼泽被破坏的结果是泥炭堆积间断甚至终止,泥炭物质被分解,并有一部分远距离漂移

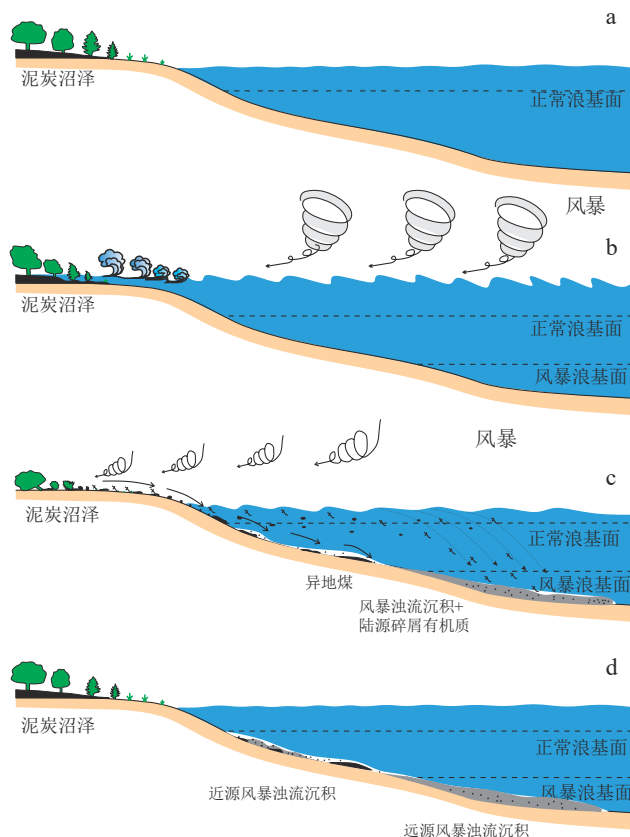


图5 中国南海边缘海盆地风暴沉积模式

Fig. 5 Proposed model showing the storm deposits in basins at the edge of the South China Sea

a. 正常天气海岸带及海洋盆地特征;b. 海洋风暴向海岸带移动;c. 风暴潮对海岸带及近岸带强烈侵蚀,风暴潮回流携带泥炭、泥沙等物质向海盆地方向搬运;d. 风暴潮退却期,形成近源风暴沉积、远源浊流沉积

搬运,形成好的烃源岩。

2.4 陆源分散有机质分布范围

极端气候导致泥炭沼泽被破坏,泥炭物质被风暴潮回流或洪水带走进入盆地水域,甚至深水区,盆地基底坡度(或为陡坡或为缓坡)是最为关键的影响因素。

以(扇)三角洲坡度的估算作为示例。根据平衡剖面把陵水组三段顶界面拉平,找出扇三角洲前缘+前三角洲的高度差(A)和延伸距离(B),坡度角 α 的值为 $\arctan(A/B)$ (图6,图7);计算发现琼东南盆地区(扇)三角洲坡度在 $0.08^\circ \sim 2.68^\circ$,一般小于 1° 。

据此估算扇三角洲分散有机质分布范围。首先量取扇三角洲各朵叶体的坡度,其次计算各坡度对应的陆源分散有机质的范围(扇三角洲需要进行校正),然后在扇三角洲平面图上量取分散有机质的分布范围(扇三角洲平原与前缘分界线位置)。

计算发现,琼东南盆地渐新统(扇)三角洲区域陆源有机质厚度分布在9.7~44.3 km,校正后为5.8~

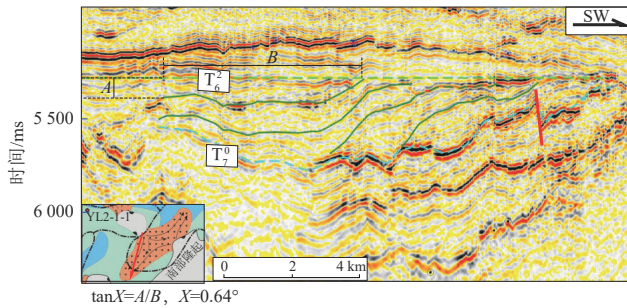


图6 琼东南盆地渐新统扇三角洲坡度计算示例

Fig. 6 Example of slope calculation for the Oligocene fan delta in the Qiongdongnan Basin

44.3 km,最大值出现在松北凹陷陵三段三角洲前侧。

2.5 泥炭沼泽破坏作用与煤系“源-汇系统”

在泥炭沼泽破坏作用与泥炭物质运移的“源-汇系统”中,“源”的问题相对比较简单,即在沼泽中形成的泥炭物质,是一种属于“自生”产物。

来自于泥炭沼泽的泥炭碎屑物质,其运移距离与沉积聚集需要特定条件:有利植物繁殖的持续时间和适宜的气候;泥炭的生产量大于供应量;水动力强度和方式(如单向流、双向流、面流、风暴旋流、重力流);盆地坡度与水体密度;泥炭碎屑在细粒及泥质沉积中的混合程度;泥炭碎屑分散漂移的最大距离及损失量等。

陆源泥炭物质的沉积(汇聚)位置主要包括:正常浪基面以下的斜坡部位,风暴浪基面以下的深水区,以及风暴潮回流形成的浊流沉积区。泥炭物质被搬运与再次聚集沉积,经历了水动力分选、泥炭物质与细粒或泥质等混合,再被水流带到较远的汇水盆地静水环境

中,甚至较深水区域(还原环境)。由此使得被保存下来、呈分散状态的泥炭物质,成为海相细粒和泥质沉积物中陆源有机质的主要组成部分。

琼东南盆地含煤沉积中,煤层多为薄煤层和极薄煤层,层数多而分布不集中、煤质指标中灰分产率很高,说明泥炭聚集最终成煤的地质背景是很不稳定的。可以推测当时泥炭沼泽发育的继承性和连续性较差,时常受到破坏。

泥炭沼泽和已经发生堆积的泥炭物质被破坏成碎屑状态,为盆地分散有机质沉积提供了物源,动力条件构建了分散有机质到达聚集区的运移路径。因此,煤系、煤层(原地泥炭聚集和异地聚集)、陆源分散有机质沉积,3个层次的汇聚,构成一种复杂的煤系“源-汇系统”(图8)。

1) 物质同源:无论是原地堆积还是异地堆积,或者是分散有机质,其总的有机质具有同源性,即适合泥炭沼泽发育和植物生长的地貌环境单元。图8中的冲积平原、三角洲-海岸平原,是煤系在“源-汇系统中”形成与发育的“源”,由冲积沉积体系及内部各种亚相、扇/辫状河三角洲沉积体系及内部各种亚相等构成,泛滥平原、分流间洼地等微环境单元是最先发育泥炭沼泽环境单元,是泥炭物质形成“源”。

2) 有机质运移过程(渠):原地垂向堆积、流动水体携带到相对稳定区域、远距离分散漂移与其他物质混合搬运等3种形式。

3) 汇聚形式:原地垂向加积,离开植物生长地由流动水体携带到相对稳定区域聚集成层(异地),以及泥炭物质呈分散漂移状态与其他细粒物质混合沉积于较深水盆地等3种形式。

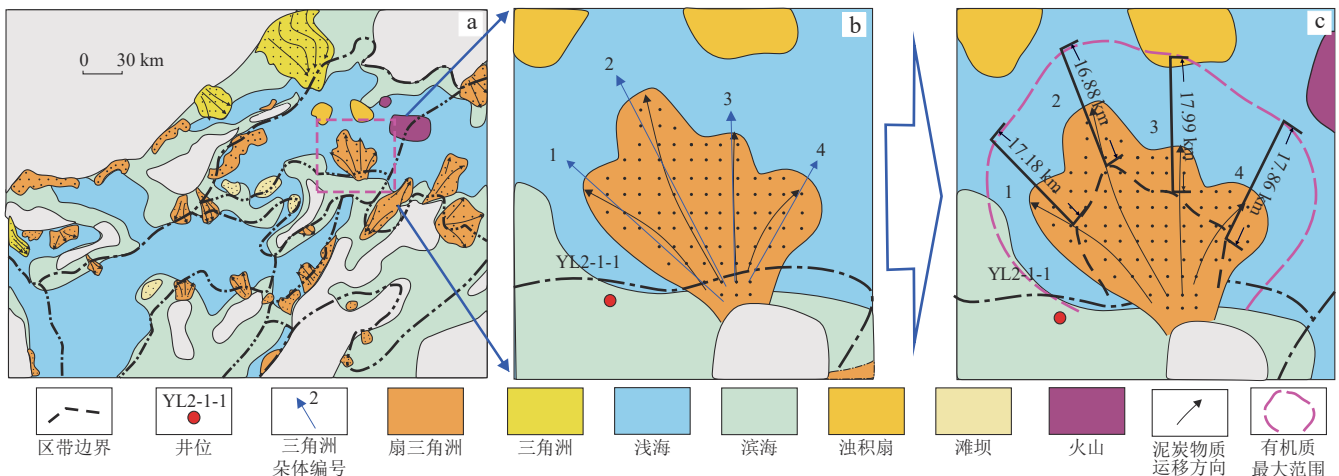


图7 琼东南盆地渐新统扇三角洲陆源分散有机质分布范围示例

Fig. 7 Example of delineation of distribution of terrigenous dispersed organic matter in the Oligocene fan delta of the Qiongdongnan Basin

a. 陵水组三段沉积相;b. 计算三角洲朵体的坡度示意图;c. 圈定分散有机质范围

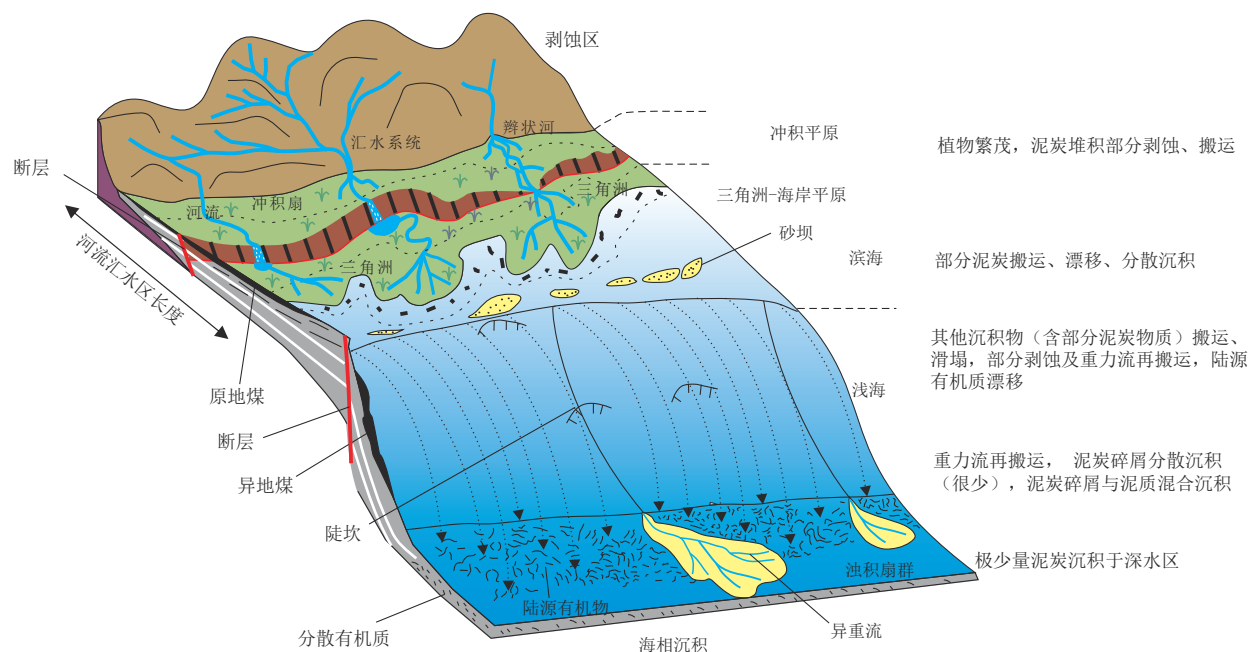


图8 煤系源-汇系统与烃源岩生烃母质分布模式(据文献[45]修改)

Fig. 8 Source-to-sink system of coal measures and distribution mode of hydrocarbon parent material of source rocks (modified from [45]).

3 结论

1)泥炭沼泽环境的破坏与重建作用,对于泥炭物质的聚集与分散过程来说是一种相互作用甚至并存的关系,煤与非煤系中陆源海相烃源岩的形成,是泥炭沼泽环境被破坏的结果,具有复杂性。基于中国南海琼东南盆地泥炭沼泽形成与发育的研究,本文总结出了5种有关煤层发育与陆源海相烃源岩成因的关系。

2)泥炭沼泽的破坏,不可能是一种完全进行到底的作用过程,虽然泥炭沼泽原有的环境被打破,大部或全部泥炭物质可能被分解或搬运至较远的地方,但泥炭沼泽古地理环境是仍然存在的。因而在适宜的气候条件下泥炭沼泽则可以继续恢复发育,即实现泥炭沼泽的重建。

3)导致泥炭沼泽环境被破坏、泥炭物质被远距离搬运的因素很多,但在一个具体的盆地中,有其主要控制因素。因此,本文认为风暴事件是中国南海新生代盆地泥炭沼泽破坏与泥炭物质远距离搬运并沉积于海相环境的主要动力因素之一。

参 考 文 献

[1] 张功成,陈莹,李增学,等. 中国海域煤型油气成因理论[J]. 石油与天然气地质,2022,43(3):553-565.
Zhang Gongcheng, Chen Ying, Li Zengxue, et al. Theory on

genesis of coaliferous petroleum in the China Sea[J]. Oil & Gas Geology,2022,43(3):553-565.

- [2] 杨起,韩德馨. 中国煤田地质学(上册)[M]. 北京:煤炭工业出版社,1979,1-261.
Yang Qi, Han Dexin. Coal geology China (Volume 1) [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1979, 1-261.
- [3] Dai Shifeng, Achim Bechtel, Cortland F. Eble, et al. Recognition of peat depositional environments in coal: A review [J]. International Journal of Coal Geology,2020, 103383:1-67.
- [4] Irina Delusina C A, Scott W S, Kenneth L V. Environmental evolution of peat in the Sacramento-San Joaquin Delta (California) during the Middle and Late Holocene as deduced from pollen, diatoms and magnetism [J]. Quaternary International, 2022: 50-61.
- [5] Torsten U, Abdul R A, Andrea K K, et al. Diversity patterns in microfloras recovered from Miocene brown coals of the lower Rhine Basin reveal distinct coupling of the structure of the peat-forming vegetation and continental climate variability [J]. Geological Journal, 2021, 56(2):768-785.
- [6] Yan Zhang, Chuanyu Gao, Shaoqing Zhang, et al. Significance of different n-alkane biomarker distributions in four same-age peat sequences around the edges of a small maar lake in China[J]. The Science of the Total Environment, 2022:154137.
- [7] Prokopovich N P. Subsidence of peat in California and Florida [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1985, 22:395 - 420.
- [8] Van Asselen S, Stouthamer E, Van Asch T W J. Effects of peat compaction on delta evolution: A review on processes, responses, measuring and modeling [J]. Earth Science Review, 2009, 92:

- 35-51.
- [9] Van Asselen S, Stouthamer E, Smith N D. Factors controlling peat compaction in alluvial floodplains: A case study in the coal-temperate Cumberland marshes, Canada[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80:155-166.
- [10] Flores R M. Coal and coalbed gas: Fueling the future [M]. Elsevier, San Diego, 2014.
- [11] Doyle T W, Krauss K W, Conner W H, et al. Predicting the retreat and migration of tidal forests along the northern Gulf of Mexico under sea-level rise[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259:770-777.
- [12] Fagherazzi S, Anisfeld S C, Blum L K, et al. Sea level rise and the dynamics of the Marsh-Upland boundary [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00025>.
- [13] Wang Dongdong, Zhang Gongcheng, Li Zengxue, et al. The development characteristics and distribution predictions of the Paleogene coal-measure source rock in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2021, 95(1): 105-120.
- [14] 张功成,李增学,王东东,等. 中国南海海域煤地质特征[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(11):3864-3878.
- Zhang Gongcheng, Li Zengxue, Wang Dongdong, et al. Characteristics of coal geology in South China Sea[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(11):3864-3878.
- [15] Meade R H. Sources, sinks, and storage of river sediment in the Atlantic drainage of the United States[J]. *The Journal of Geology*, 1982, 90(3): 235-252.
- [16] Sømme T O, Hellandhansen W, Martinsen O J, et al. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source-to-sink systems: A basis for predicting semi-quantitative characteristics in subsurface systems [J]. *Basin Research*, 2009, 21(4): 361-387.
- [17] Sømme T O, Jackson C A L, Vaksdal M. Source-to-sink analysis of ancient sedimentary systems using a subsurface case study from the Mor-Trondelag area of southern Norway: Part 1-depositional setting and fan evolution [J]. *Basin Research*, 2013, 25(5): 489-511.
- [18] Anthony E J, Julian M. Source-to-sink sediment transfers, environmental engineering and hazard mitigation in the steep Var River catchment, French Rivera, southeastern France [J]. *Geomorphology*, 1999, 31(1): 337-354.
- [19] Leeder M R. Sedimentary basins: Tectonic recorders of sediment discharge from drainage Catchments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22(3): 229-237.
- [20] 林畅松,夏庆龙,施和生,等. 地貌演化、源—汇过程与盆地分析[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 9-20.
- Lin Changsong, Xia Qinglong, Shi Hesheng, et al. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 9-20.
- [21] 庞雄,彭大钧,陈长民,等. 三级“源—渠—汇”耦合研究珠江深水扇系统[J]. *地质学报*, 2007, 81(6): 857-864.
- Pang Xiong, Peng Dajun, Chen Changmin, et al. Three hierarchies “source-conduit-sink” coupling analysis of the Pearl River deep-water fan system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(6): 857-864.
- [22] 朱红涛,徐长贵,朱筱敏,等. 陆相盆地源—汇系统要素耦合研究进展[J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1851-1870.
- Zhu Hongtao, Xu Changgui, Zhu Xiaomin, et al. Advances of the source-to-sink unites and coupling model research in continental basin[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1851-1870.
- [23] 龚承林,齐昆,徐杰,等. 深水源—汇系统对多尺度气候变化的过程响应与反馈机制[J]. *沉积学报*, 2021, 39(1):231-252.
- Gong Chenglin, Qi Kun, Xu Jie, et al. Process—product linkages and feedback mechanisms of deepwater source-to-sink responses to multi scale climate changes [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1):231-252.
- [24] 邵龙义,鲁静,汪浩,等. 中国含煤岩系层序地层学研究进展[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 904-914.
- Shao Longyi, Lu Jing, Wang Hao, et al. Developments of coal measures sequence stratigraphy in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 904-915.
- [25] 邵龙义,鲁静,汪浩,等. 近海型含煤岩系沉积学及层序地层学研究进展[J]. *古地理学报*, 2008a, 10(6): 561-570.
- Shao Longyi, Lu Jing, Wang Hao, et al. Advances in sedimentology and sequence stratigraphy of paralic coal masures [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008a, 10(6): 561-570.
- [26] 邵龙义,肖正辉,汪浩,等. 沁水盆地石炭—二叠纪含煤岩系高分辨率层序地层及聚煤模式[J]. *地质科学*, 2008b, (4): 157-171.
- Shao Longyi, Xiao Zhenghui, Wang Hao, et al. High resolution sequence stratigraphy and coal accumulation model of Carboniferous-Permian coal-bearing rock series in Qinshui Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2008b, (4): 157-171.
- [27] 李增学,吕大伟,王东东,等. 多元聚煤理论体系及聚煤模式[J]. *地球学报*, 2015, 36(3): 271-282.
- Li Zengxue, Lv Dawei, Wang Dongdong, et al. The multiple coal-forming theoretical system and its model [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(3): 271-282.
- [28] 邵龙义,党星宇,高祥宇,等. 厚煤层成因机制——天文周期控制的多期次泥炭沼泽叠加模式[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 186-195.
- Shao Longyi, Dang Xingyu, Gao Xiangyu, et al. Genetic mechanism of thick coal seams; astronomical-forcing superimposed multi-staged swamp model [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 186-195.
- [29] 胡益成,苏华成. 河南晚石炭世含煤地层中的风暴异地煤[J]. *煤田地质与勘探*, 1992, 20(3): 1-5.
- Hu Yicheng, Su Huacheng. The storm allochthony coal of late carboniferous coal-bearing formation in Henan Proynce [J]. *Coalfield Geology and Exploration*, 1992, 20(3): 1-5.
- [30] 胡益成,廖玉枝. 华北盆地南部早二叠世早期聚煤作用的成因机制[J]. *地学前缘*, 1999, 6(增刊): 111-115.
- Hu Yicheng, Liao Yuzhi. Genetic mechanism of early Permian

- coal accumulation in the Southern North China basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(Suppl.): 111–115.
- [31] 李绪宣. 琼东南盆地构造动力学演化及油气成藏研究[D]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所, 2004.
- Li Xuxuan. Study on structural dynamics and hydrocarbon accumulation in Qiongdongnan Basin [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [32] 张功成, 米立军, 陶维祥, 等. 深水区-南海北部大陆边缘油气勘探新领域[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 15–21.
- Zhang Gongcheng, Mi Lijun, Tao Weixiang, et al. Deepwater area-the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 15–21.
- [33] 蔡国富, 邵磊, 乔培军, 等. 琼东南盆地古近纪海侵及沉积环境演化[J]. *石油学报*, 2013, 34(增2): 91–101.
- Cai Guofu, Shao Lei, Qiao Peijun, et al. Marine transgression and evolution of depositional environment in the Paleogene strata of Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(S2): 91–101.
- [34] 李增学, 宋广增, 王东东, 等. 琼东南盆地渐新统煤系-扇-辫状河三角洲特征[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3471–3484.
- Li Zengxue, Song Guangzeng, Wang Dongdong, et al. Characteristics of (fan) braided river delta in Oligocene coal measures of Qiongdongnan Basin [J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3471–3484.
- [35] 刘莹, 刘海燕, 杨海长, 等. 琼东南盆地古近纪煤沉积体系类型及特征[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(1): 142–151.
- Liu Ying, Liu Haiyan, Yang Haizhang, et al. Types and characteristics of Paleogene coal-forming sedimentary systems in Qiongdongnan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(1): 142–151.
- [36] Li Zengxue, Zeng Qingbo, Xu Meng, et al. Peat formation and accumulation mechanism in northern marginal basin of South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40(2): 95–106.
- [37] Wang Dongdong, Zhang Gongcheng, Li Zengxue, et al. The development characteristics and distribution predictions of the Paleogene coal-measure source rock in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2021, 95(1): 105–120. DOI: 0.1111/1755-6724.14625.
- [38] Bates C C. Rational theory of delta formation [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1953, 37: 2119–2162.
- [39] Fisher W L, McGowen J H. Depositional system in the Wilcox Group (Eocene) of Texas and their relationship to occurrence of oil and gas [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1969, 53(1): 30–54.
- [40] 刘仕友, 陈泓燕, 李德勇, 等. 琼东南盆地陵水凹陷渐新统陵水组沉积特征及烃源岩发育模式[J]. *海相油气地质*, 2019, 24(1): 63–70.
- Liu Shiyou, Chen Hongyan, Li Deyong, et al. Sedimentary characteristics and source rock development model of the Oligocene Lingshui Formation in Lingshui Sag, Qiongdongnan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(1): 63–70.
- [41] Zhao Honggang, Li Ying, Chang Xiangchun, et al. A comparative study of the coal-forming characteristics of marginal sea basins and epicontinental sea basins [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2021, 95(1): 121–130.
- [42] 杨文卿, 谢周清, 孙立广. 南海古海啸重建与海啸沉积研究进展[J]. *地学前缘*, 2021, 28(2): 246–257.
- Yang Wenqing, Xie Zhouqing, Sun Liguang. Research progress in the reconstruction of paleotsunami in the South China Sea and the tsunami deposit characteristics [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(2): 246–257.
- [43] 陈欢庆, 朱筱敏, 张功成, 等. 井震结合深水物源分析——以琼东南盆地深水古近系陵水组为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(4): 552–558.
- Chen Huanqing, Zhu Xiaomin, Zhang Gongcheng, et al. Material source analysis in deep water area based on well to-seismic integrated studies—a case study on Lingshui Formation of Paleogene in deep water area in southeast Hainan Basin of South China Sea [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(4): 552–558.
- [44] 何云龙. 琼东南盆地陆坡区重力流沉积特征及其成因机制[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- He Yunlong. The characteristics and mechanism of sediment gravity flow in slope area in Qiongdongnan Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.
- [45] Li Zengxue, Li Ying, Wang Dongdong, et al. Source-to-sink system for peat accumulation in marginal basins of the South China Sea with the Qiongdongnan Basin as an example [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2021, 68(3): 421–439.

(编辑 董立)