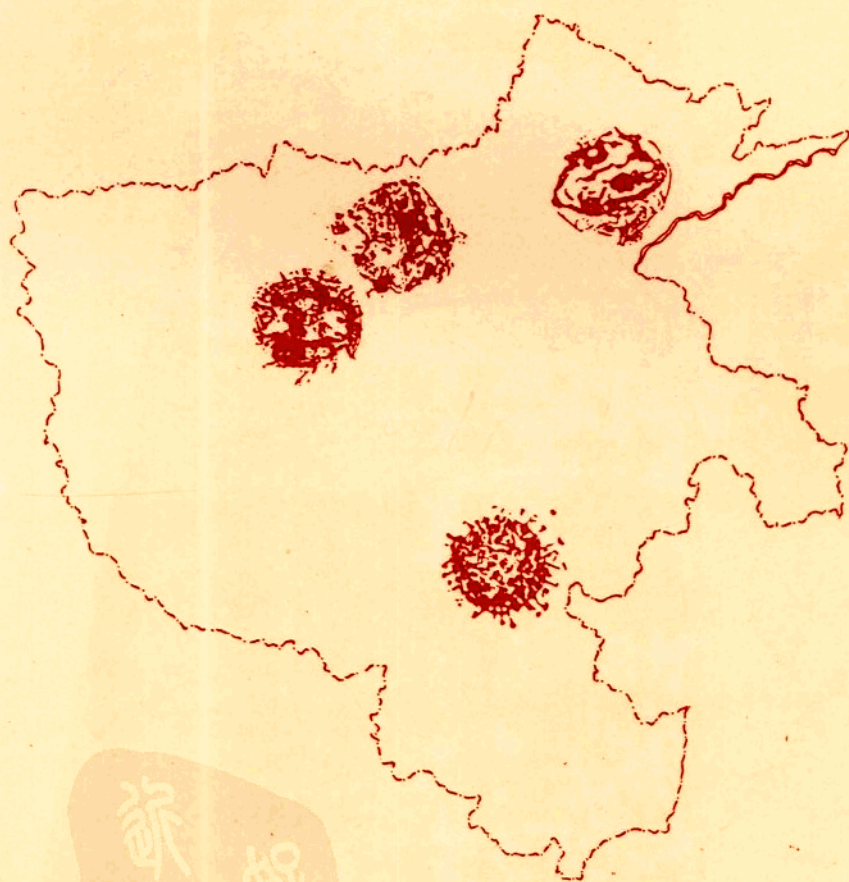


国家自然科学基金资助项目

# 河南早第三纪 陆相沟鞭藻及其他 浮游藻类与油气勘探

茅绍智 等著



中国地质大学出版社

## 目 录

|                                      |          |
|--------------------------------------|----------|
| 引言.....                              | 茅绍智(1)   |
| 河南早第三纪陆相沟鞭藻和其他浮游藻类的分布及古生态.....       | 茅绍智等(3)  |
| 现代淡水沟鞭藻热模拟实验与油气生成 .....              | 童林芬等(12) |
| 河南下第三系含沟鞭藻和其他浮游藻类的有机质类型及其生烃意义 .....  | 王从凤等(21) |
| 河南早第三纪沟鞭藻的分类、命名及形态研究.....            | 茅绍智等(30) |
| 河南中、南部地区早第三纪陆相沟鞭藻及其他浮游藻类的生物地层研究..... | 毛国兴等(67) |
| 河南东濮凹陷早第三纪陆相沟鞭藻及其他浮游藻类与古沉积环境研究 ..... | 朱神照等(80) |
| 英文摘要 .....                           | (98)     |
| 图版说明及图版.....                         | (101)    |

# EARLY TERTIARY TERRIGENOUS DINOFLAGELLATES AND OTHER PLANKTONIC ALGAE FROM HENAN PROVINCE AND THEIR SIGNIFICANCE IN OIL/GAS PROSPECTING

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                      |                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Preface .....                                                                                                                                                        | Mao Shaozhi(1)                   |
| Distributions and paleoecology of Early Tertiary terrigenous dinoflagellates and other planktonic algae from Henan province .....                                    | Mao Shaozhi <i>et al.</i> (3)    |
| Thermo-simulating test of modern fresh water dinoflagellate <i>Peridinium pusillum</i> , related to the formation of liquid and gas hydrocarbon .....                | Tong Linfen <i>et al.</i> (12)   |
| Organic matter types of Early Tertiary strata bearing dinoflagellates and other planktonic algae from Henan province, and their importance in source potential ..... | Wang Congfeng <i>et al.</i> (21) |
| Early Tertiary dinoflagellates of Henan province: classification, nomination and morphological study .....                                                           | Mao Shaozhi <i>et al.</i> (30)   |
| Early Tertiary terrigenous dinoflagellates and other planktonic algae from central and southern Henan province .....                                                 | Mao Guoxing <i>et al.</i> (67)   |
| Early Tertiary terrigenous dinoflagellates and other planktonic algae from Tongpu depression, northern Henan province and paleoenvironmental study .....             | Zhu Shenzhao <i>et al.</i> (80)  |
| Abstract .....                                                                                                                                                       | (98)                             |
| Plates explanations and Plates .....                                                                                                                                 | (101)                            |

## 引 言

本书为国家自然科学基金资助项目“河南第三纪非海相沟鞭藻及其和油气的关系”的研究成果。

我对陆相沟鞭藻的认识经历了近15年的漫长历程。70年代中期,在参加“黄骀坳陷砂体成因”的课题中首次遇到了渤海沿岸地区早第三纪的沟鞭藻。当时,国内外只有海相地层的沟鞭藻的报道或研究,西方的沟鞭藻化石专家们也公认化石沟鞭藻为海相的标志化石。在这种思潮影响下,尽管自己曾注意到了黄骀坳陷的沟鞭藻组合面貌明显不同于同时代海相沟鞭藻组合,但还是用“海侵”或“海侵影响”的产物来解释这些化石。以后,又在不同程度上违心地以“海侵影响”观点来解释产自广东三水、湖北江汉盆地上白垩统沟鞭藻,虽然自感“理不直、气不壮”,又因以后在渤海沿岸地区产这些沟鞭藻的层位中发现了极少量(属种单调或侏儒型)的有孔虫和钙质超微化石支持了“海侵”观点,但始终感到“海侵”说法矛盾重重。1986年余静贤在产著名的“热河动物群”的阜新组中发现沟鞭藻一事可说对我是一个大的转折,使我对陆相沟鞭藻的认识从彷徨犹豫开始走向坚定。这些产自阜新组的沟鞭藻不大可能是“海侵影响”的产物,却是实实在在的陆相沟鞭藻。由于这类化石外壁极薄易皱、古口常不显示等原因,研究起来非常困难。当时正值沟鞭藻专家、加拿大的Lentin访华,余静贤和我决定和她合作。通过大量扫描电镜的观察和照相才揭露出这些化石的形态特征细节。研究成果报道于1988年澳大利亚布里斯班(Brisban)召开的第七届国际孢粉大会上,引起了国际同行的极大关注,1989年美国著名的地学杂志《Geotimes》(34卷2期)有专文报道了此事,“中国近年来在早白垩世湖泊沉积中发现非海相角甲藻型沟鞭藻,说明在湖泊沉积中的沟鞭藻可能较人们当前对它的认识更有应用价值。”同年10月,美国阿姆科(Amoco)石油公司休斯顿研究中心专门邀请笔者对非海相沟鞭藻作专题报告。此后,逐渐坚定了我对渤海湾沿岸地区和本区早第三纪沟鞭藻的“非海相”性的看法,并进一步认识到研究本区非海相沟鞭藻的重要性。三年来,通过课题组全体成员的辛勤工作,使我对本区这些浮游藻类的“陆相”性质、形态特征、地层价值、沉积环境再造中的作用及生烃潜力等方面有了较前更深入的认识。尽管化石沟鞭藻已有一个世纪以上的研究历史,但人们对这类化石的认识基本上根据海相沟鞭藻的研究。迄今,只有为数不多的陆相化石沟鞭藻的报道。现在看来,我国可能是世界上产陆相沟鞭藻最丰富的国家。也是这类沟鞭藻在油气生成和勘探中最发挥作用的国家,我们有责任把我们的研究成果公布于众,以丰富沟鞭藻的知识宝库,并为陆相地层的油气勘探提供有价值的信息。

本书在学术观点、理论分析和技术方面具以下特色:

一、迄今,我国非海相沟鞭藻的专著已有三部,即《渤海沿岸地区早第三纪沟鞭藻类和疑源类》(1978)、《东濮地区早第三纪沟鞭藻及其他藻类》(1989)和《下辽河拗陷早第三纪沟鞭藻类及其他藻类》(1992),这些专著大都侧重于系统的古生物描述。本书侧重于将陆相沟鞭藻的研究服务于油气勘探,这在一定程度上和我大学所学专业为石油地质,对油气勘探有本能的偏爱有关。例如,本次工作从现代陆地淡水沟鞭藻的热模拟入手,从实验上证实了陆相沟鞭藻的生烃能力和其生液态烃的能力高于植物孢粉和其他藻类,如小颤藻、丛粒藻,

但生气态烃的能力低于后者；对本区有机质类型的分类研究查明有利于生烃的有机质类型与沟鞭藻和其他浮游藻类的产出、丰度之间的关系。这些研究都说明了沟鞭藻及其他浮游藻类是形成本区油气、尤其是油的主要来源。

二、介绍了目前世界上最新的、集化石和现代沟鞭藻于一体的分类(1993)，并将之应用于本区，以此回顾、评论了本区和邻区已出版的成果。从实际应用出发，本次工作合并了某些过细且无地层意义，在实际鉴定中又难以区分的种(亚种)，否定了某些不符合严格定种规范的单标本种，修订、补充了某些属(种)的重要特征，总结了鉴定本区沟鞭藻属、种的实际方法。这些不仅有益于后人的工作，也提高了本区陆相沟鞭藻的分类和形态研究的程度，新建立的渤海藻亚科还为上述最新分类增添了新的内容。

三、化石沟鞭藻的古生态学迄今仍为一门需不断完善而不成熟的学科分支。近30年来，世界上许多从事沟鞭藻工作的学者一直在探索沟鞭藻(海相)及其不同类别的发育、衰退与海水的温度、盐度、深度、透明度及水动力强度等物理化学条件和距岸远近等因素的关系，以此推测古沉积环境。本次工作除参考、借鉴这些前人成果于本区陆相沟鞭藻的古生态研究外，主要根据本区沟鞭藻和其他浮游藻类的纵、横向变化特点结合本区两个主要油田岩相研究的成果进行综合分析，建立了4个生物-沉积相带，识别出这些藻类及其不同类别兴衰与环境变迁的关系和不同类别的古生态特征。这些不仅丰富了陆相沟鞭藻和其他浮游藻类的古生态知识，还为寻找有利于成油的沉积环境提供有价值的信息。

本书是1990~1994年全体成员工作的成果，这些成员来自中国地质大学(茅绍智、童林芬、马欣祥)、地质矿产部无锡中心实验室(王从凤、熊玉文)、中原油田勘探开发研究院(朱神照、林桂芳)和南阳油田勘探开发研究院(毛国兴、曲新国)，他们虽然遥遥相隔，但互相配合默契，甚至其中有些人后期已退休或已离任，仍一致为完成课题、编写好本书尽最大努力。此外，两个油田勘探开发研究院的各级有关领导给予了大力支持，为本书编写提供了大量内刊的地层、岩相和古生物等资料，院属化验室的某些同志参加了前期的化石鉴定工作。笔者在此一并深表谢意。

笔者衷心感谢国家自然科学基金委员会给予的资助。还应感谢中国地质大学出版社在本书出版中给予的支持和协助。

衷心希望从事沟鞭藻研究的专家们和从事油田工作的读者们在阅读本书后能提出他们的诚恳批评和宝贵意见。

茅绍智

# 河南早第三纪陆相沟鞭藻 和其他浮游藻类的分布及古生态

茅绍智 朱神照 毛国兴 王从凤 童林芬  
熊玉文 曲新国 林桂芳 马欣祥

## 一、前言

本课题为自然科学基金资助项目。研究区范围主要为河南省,也包括部分山东、安徽省内约有第三纪的大小凹陷数十个。研究区自东向西分为东部(Ⅰ)、中部(Ⅱ)和西部(Ⅲ)三个地质构造单元(图1),沟鞭藻和其他浮游藻类化石主要集中在中部构造带,本次工作的重点为此带北部的东濮凹陷和南部的南阳、泌阳等凹陷。

本次工作系统研究了本区早第三纪的沟鞭藻和其他浮游藻类,搜集了十余年积累的成果,并对近50口井上千块样品的鉴定成果进行了统计与分析,在此基础上对本区沟鞭藻和其他浮游藻类的分布规律和古生态特征作如下的总结。

## 二、本区陆相沟鞭藻及其他浮游藻类的特征及纵、横向分布规律

### 1. 本区沟鞭藻的特征

本区沟鞭藻为非海相沟鞭藻,与世界上已报导的海相沟鞭藻相比,明显不同于以下方面:

(1) 属种类型相对单调,属种分异度低,且随水体含盐度的增高而增加,反之亦然。属种优势度较为明显,化石总的丰度较低。《东濮地区早第三纪沟鞭藻及其他藻类》一书共描述了来自始新世沙河街组四段至渐新世东营组的沟鞭藻35属、108种(经本次工作复查、修订,种数将减少1/3)。南阳地区始新世大仓房组上段至渐新世廖庄组产出的沟鞭藻属种数远小于东濮地区(见本书)。这个数字与英国东南部始新统中产出53属140种(Bujak *et al.*, 1980)、我国新疆塔里木盆地喀什地区中始新世乌拉根组产出40属、85种相比,都大为逊色。但本区沟鞭藻组合的优势度却十分明显,往往沟鞭藻组合总量由一二个类别、一个或几个种占统治,如东濮地区始新世沙河街组三段和南阳地区始新世核桃园组中的渤海藻、东濮地区渐新世沙河街组一段中的多刺甲藻。另一重要的特征是化石丰度总的较低,如个别出现高丰度的样品,也往往是单个种或个别种丰度高。笔者之一曾在乌拉根组中见到高丰度的样品,于一个视域(物镜倍数×目镜倍数为20×10时)内可见到多种多样类型的孢囊个体数十个,在加拿大某地上侏罗统和南极地区始新统中,也有类似的或较此丰度更高的情况。然而在本区,几乎难以见到一个视域内有超过5个或10个以上个体的,经常是整个薄片只有几十个或更低数量的沟鞭藻,在少数情况如东濮地区沙河街组三段个别样品,每个薄片可统计到上百个沟鞭藻化石,但其中绝大多数为渤海藻,其他属种个体数量很少。

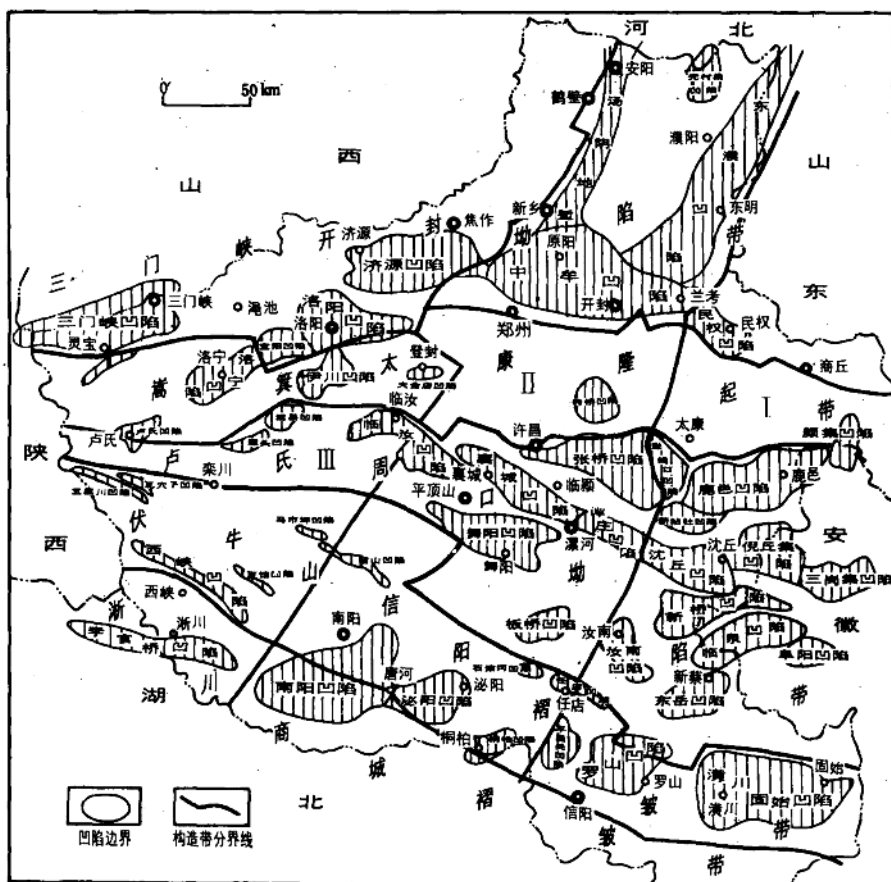


图1 河南省构造区划图

(2) 多甲藻型孢囊和旋沟藻型孢囊中具顶古口的近似孢囊或近似一刺孢囊(突起长度<孢囊中心体最小直径的30%)常占组合的优势,尤以前者为甚,具沟前古口的类型和具长突起的刺孢囊始终居次要地位,含量往往低,保存也远远劣于海相组合中的同类分子,未见具复杂突起加横络的类型。刺孢囊类型中个体常较同一属的海相种为小,如本区的管球藻、稀管藻、繁棒藻属的种其个体均为小一中等,从未见大于 $60\mu\text{m}$ 者,多数仅30余微米。多甲藻型孢囊中具复合古口的类型远远超过具单一前间古口的类型,如渤海藻、副渤海藻、黄河藻、副多甲藻、中原藻、三水藻、曙藻、菱球藻等均为具复合古口的类型。现代淡水沟鞭藻的重要分子多甲藻属(*Peridinium*)也为具复合古口的多甲藻类。

(3) 外壁往往较薄,显示单层的原层式外壁占主要,双层具腔孢囊(如曙藻)较少见,双层式外壁的内、外层常由于薄而分化不清。此外,特征地具有像黄河藻、中原藻、莱氏藻和副多甲藻的色素沉着,致使外壁虽薄却呈褐色,这种具色素沉着的孢囊在现代海洋的原多甲藻属(*Protoperidinium*)中十分常见。

(4) 古口显示常不清。这一点可能和外壁薄有关,由于外壁薄,极易起皱、重叠,以致掩盖古口缝线,或可能脱囊后依连的囊盖重新合上,古口缝线被褶皱掩盖。这一特征造成我们对

这些陆相沟鞭藻进行形态研究较之对海相沟鞭藻更为困难。

(5) 地方种常占组合的优势。这些地方种仅见于我国东部、中部晚白垩世—早第三纪的非海相凹陷、盆地内。

## 2. 本区沟鞭藻及其他浮游藻类的生物地层学

本区的浮游藻类组合在纵向上的分布可归纳为以下几个阶段（从老→新）：

(1) 三水藻-盘星藻 (*Sanshuia-Pediastrum*) 组合。分布于研究区北部的沙河街组四段和中、南部的大仓房组上段。化石丰度较低，藻类分布的范围也较小。在凹陷的中央地区以古多甲藻亚科的三水藻、曙藻 (*Luxadinium*)、古多甲藻 (*Palaeoperidinium*) 和渤海藻 (*Bohaidina*)、副渤海藻 (*Parabohaidina*) 等为主要成分，凹陷的边缘以盘星藻为主要成分，各种圆球类藻广泛分布于盆地中。这一组合和渤海沿岸地区的沙河街组四段可以对比，时代为中始新世。

(2) 渤海藻-副渤海藻 (*Bohaidina-Parabohaidina*) 组合。分布于北部地区的沙河街组三段和中、南部地区的核桃园组下、中段。化石丰度和属种分异度都较下伏组合明显提高，藻类分布范围远远大于前一组合，为本区浮游藻类的第一繁盛期。渤海藻和副渤海藻在此达到了发育的顶峰；三水藻、曙藻等古多甲藻亚科分子继续存在；北部地区凹陷中央还伴随有少量的旋沟藻型刺孢囊分子如管球藻 (*Hystichosphaeridium*)、繁棒藻 (*Cleistosphaeridium*)、心球藻 (*Cordosphaeridium*)、口盖藻 (*Operculodinium*)、稀管藻 (*Oligosphaeridium*) 等，北部地区凹陷靠近边缘的浅水区和中部、南部凹陷中心以外地区伴随有较丰富的褶皱藻；以光面、粒面球藻为主的圆球类藻广泛发育；中、南部凹陷边缘还发育丰富的盘星藻。这一组合和渤海沿岸地区的沙河街组三段可以对比，时代为中—晚始新世。

(3) 褶皱藻—多刺甲藻/褶皱藻—开口藻 (*Campenia-Sentusidinium/Campenia-Porosphera*) 组合。分布于北部地区的沙河街组二段和中、南部地区的核桃园组上段—廖庄组。化石丰度低，藻类分布范围较前缩小，而且北部和中、南部的组合成分明显分化，后者化石丰度更低于前者，使藻类化石的直接对比发生困难，只能根据其他门类的化石进行地层对比。北部地区组合下部以褶皱藻、上部以多刺甲藻和繁棒藻发育于凹陷中心和粒面、光面、网面等圆球藻的普遍繁盛为特征。中、南部地区组合以褶皱藻和疑源类的开口藻为主要成分，绿枝藻科的粒面球藻 (*Granodiscus*) 和双星藻科的光对裂藻 (*Psiloschizosporis*)、卵形藻 (*Ovoidites*) 等明显参与。沟鞭藻见于沉积中心，除副渤海藻和少量渤海藻外，其他成分均消失。绿枝藻科的其他各种圆球类属在全区普遍产出，并具相当含量。北部地区的组合和渤海沿岸地区的沙河街组二段相当，时代为渐新世。

(4) 多刺甲藻-副多甲藻 (*Sentusidinium-Paraperidinium*) 组合。仅发育于北部地区的沙河街组一段。中、南部地区的褶皱藻-开口藻组合上部可能相当本组合，因彼此相同成分太少，中、南部地区的沟鞭藻又十分贫乏，故而难以准确对比。本组合的化石丰度和属种分异度再次上升，构成北部地区浮游藻类的第二繁盛期。在凹陷中央水体较深、盐度较高地区，旋沟藻型近似一刺孢囊的多刺甲藻极度繁盛，多甲藻型近似孢囊的副多甲藻 (*Paraperidinium*)、黄河藻 (*Huanghedinium*)、中原藻 (*Zhongyuandinium*)、锥藻 (*Conicoidium*) 等积极参与，时而伴随少量旋沟藻型刺孢囊如繁棒藻、疏管藻 (*Paucibucina*)、稀管藻等为特征；凹陷边缘繁盛大量光面、粒面、网面球藻和疑源类的棒球藻 (*Filisphaeridium*)。这一组合和渤海沿岸地区沙河街组一段可以对比，时代为渐新世。

(5) 穴沟藻—粒面球藻 (*Lacunodinium-Granodiscus*) 组合。分布限于北部地区，范围大大

缩小,藻类丰度和属种分异度都大大下降。厚壁旋沟藻型、圆球形的近似孢囊穴沟藻和绿藻门的粒面球藻居组合首位;其次为具低饰的网面球藻(*Dictyotidium*),光面球藻已极为罕见;沟鞭藻除穴沟藻和少量的副渤海藻、拟箱藻(*Pyxidinosia*)外,其他成分均消失。这一组合和渤海沿岸地区的东营组可以对比,时代为渐新世。

### 3. 本区非海相沟鞭藻的性质

本次工作之前,《东濮地区早第三纪沟鞭藻及其他藻类》一书为唯一对本区限于(北部东濮地区)早第三纪的研究成果。该书认为东濮地区在早第三纪时期曾受到两次海侵的影响,即沙河街组三段和沙河街组一段的沟鞭藻为海侵作用下的产物。本次工作的结论是河南省早第三纪的沟鞭藻系内陆湖泊经历不同程度的咸化环境下的产物,与海侵没有关系。下面将从不同方面的理由、证据来阐述。

(1) 距可能的古海岸线太远,海侵的影响不可能如此深入。本区距现今海岸线最短的直线距离在500—600km以上。迄今,还未见有关于早第三纪大规模海侵、东部或东南部沿海陆地沦为水下大陆架,或东部、东南部沿海存在一系列受海侵影响的盆地的报道,尽管在这些地区存在许多早第三纪的凹盆、盆地。还有人臆测为“海泛”,意指海侵时海水沿低凹水道泛入。提出这种说法的人并没有具体说明,海水通过什么渠道泛入?如果我们根据今天的地理格局看,北部的黄河和南部的淮河似乎是最好的通道,如果是这样的话,靠近这两条河和越向东的地方应比远离这两条河和越向西的地方受海侵影响更大,然而本区的事实并非如此,含丰富的沟鞭藻的凹陷主要集中在中部构造带而不是在东部构造带。再举一个现代马拉开波湖的例子,该湖为加勒比海沿海的一个内陆淡水湖泊,北端瓶状出口外为一面积比该湖更大的委内瑞拉海湾,湖的南端距加勒比海为350 km,只有在最北端与海湾连接的小范围内湖水的盐度增高,马拉开波湖的主体为一淡水湖泊。从这个例子可以看出,用海侵影响来解释本区产出沟鞭藻是有点牵强,主要受“沟鞭藻是海相指示者”的传统观念的束缚。赵志清等<sup>①</sup>是唯一提出海水通道的文章,该文从构造资料提出“聊兰断裂贯穿东濮凹陷、莘县凹陷和济阳凹陷。该断裂带从沙河街组沉积初期强烈活动,形成较大的落差,为海水的进入提供了良好的古构造和古地理条件。”该文还图示了可能的海水通道。根据这个解释,通道所经之处和通道上更近海的那些凹陷,应该有比东濮凹陷更为丰富的沟鞭藻,然而事实并非如此,而且以马拉开波湖的例子来看,海侵的影响不可能深入到那么远的地方。

(2) 微量元素测试。有不少文章提出以Sr、B等微量元素的测试数据或Ca/Mg值来指示海、陆相。本区用沙河街组三段和沙河街组一段的介形虫和泥岩测试的结果表明,这些值介于渤海和陆地淡水湖泊的值之间<sup>②</sup>,似乎可作为半咸水过渡相的证据。然而,后来的研究根据对我国高原盐湖及温泉的测试结果对用微量元素测试来鉴别海、陆相的方法提出了质疑(孙镇城等,1992)。看来,这些测试只能对水体盐度提供证据,不能对盐度的来源提供线索。本区产沟鞭藻的凹陷已证明当时是高盐或咸化湖泊(赵志清、吕红玉,1988;王云飞等,1990)的环境,这一点是毋庸置疑、众所周知的。

(3) 有孔虫和钙质超微化石的产出。有孔虫和钙质超微化石的产出一般是海相或海侵的指示,这一点是人们推测本区沙河街组三段和沙河街组一段(富含沟鞭藻化石的层段)遭受

<sup>①</sup> 赵志清、彭辉、聂郁胜、周开义、蒋飞虎,1990,第三系古生态、古地理、古气候。刊于:赵志清、孙永才等:中原油气区第三系,中原石油勘探局勘探开发研究院院刊。

<sup>②</sup> 赵志清、彭辉、聂郁胜、周开义、蒋飞虎,1990,第三系古生态、古地理、古气候。刊于:赵志清、孙永才等:中原油气区第三系,中原石油勘探局勘探开发研究院院刊。

海侵的重要证据。青海省柴达木盆地小柴旦盐湖第四纪晚期沉积内发现海相世系的有孔虫化石希望虫 (*Elphidium* sp.) 与典型盐湖介形类肥胖真星介 (*Eucypris inflata*) 共生 (孙镇城等, 1992), 他们的研究指出, 如果在含盐岩系中出现少量广盐性有孔虫或其他海相世系生物化石, 不一定全都是海侵或残留海的证据, 需要作具体分析。本区东濮凹陷沙河街组三段的藻灰岩中产有 *Cladosiphonia sinensis*, 钙质页岩中产有鱼类化石 *Knights* sp.。前者为一种造礁绿藻类化石, 而现代造礁绿藻多生活于亚热带的宁静海、潮间带的岩石上; 与后者相近的现代属在浅海及河口集群生活, 它们都是公认的广盐性海生生物<sup>①</sup>。东濮凹陷内除这些广盐性海生生物外, 还在沙河街组三段及一段内发现了钙质超微化石 (朱神照, 1990)。与东濮凹陷相邻约200余公里的济阳凹陷沙河街组一段内发现了钙质超微化石 (姚益民等, 1992), 他们的研究指出, 这些具低分异度的钙质超微化石与典型陆相生物共生时, 代表了大型封闭古含盐湖生物群的特色, 存在于水进初期的碳酸盐—石膏沉积系列中, 又随水体加深而消失。成鑫荣等 (1993) 对该区5个含这些钙质超微化石的样品进行了锶同位素组分分析, 表明 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.711$ , 此值与现代河水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7076\sim0.7084$ 较为接近, 他们认为这反映了“沙一段沉积时期济阳凹陷为陆相环境, 钙质超微化石的存在与海水的侵入无关, 只与当时水体化学条件关系密切。”本区北部产出的钙质超微化石类型单调, 仅有 *Reticulofenestra* 的地方种 *R. bohaisensis* 和 *Sphenolites*, 产于薄层白云岩中, 和大量以华北介地方种为主的陆相介形虫、轮藻、腹足动物共生, 这与上述济阳凹陷的情况类似, 介形虫和轮藻化石的  $\text{Ca}/\text{Mg}$  测定及螺旋细胞微量元素含量测定也指示水体为钙含量高的咸水湖<sup>②</sup>。

(4) 本区沟鞭藻组合和海侵影响下滨海盆地的非海相沟鞭藻组合不同, 在数量上多甲藻型孢囊大大超过旋沟藻型孢囊, 多甲藻型中具复合古口的分子占绝对的优势, 这一点与现代陆地水体沟鞭藻组合的特点相似。此外, 本区的组合以地方种占统治地位, 严格地讲, 没有一个真正的海相种, 那些已出版文献中所定的海相种, 如果把它们和模式标本进行比较, 都具有明显的区别, 或者是个体明显小, 或者是见不到模式标本所具有的重要特征, 这一点在《东濮地区早第三纪沟鞭藻及其他藻类》一书中 (15页) 也早已有阐述。

根据以上四点理由, 我们认为本区的沟鞭藻为内陆咸化湖的产物, 其发育与繁盛主要受控于水体盐度, 与海水的侵入无关。事实上, 现代的沟鞭藻在海洋和半咸水体、淡水水体中都有分布, 虽以海洋中为最丰富, 且种类繁多, 是构成现代海洋中食物链的重要基础部分, 但这些微体浮游类也见于淡水湖泊、河流、污水池塘、阴沟、小塘和半咸水湖泊中, 甚至在雪和海洋、湖泊沙滩的间隙水中存在。现在的1000余种的沟鞭藻约有不到200个种生活于陆地淡水 (Tappan, 1980)。既然现代的沟鞭藻能正常地生活于陆地水体, 为什么人们一直把沟鞭藻化石作为海相或海侵的指示者呢? 主要原因是本世纪70年代以前人们从未发现过非海产的化石沟鞭藻、80年代中期以前从未有产自中生界的陆相沟鞭藻的报道。

### 三、本区沟鞭藻的古生态学

迄今, 已有众多的学者对现代沟鞭藻的生态 (例如 Williams, 1971; Harland, 1983) 和

① 赵志清、彭辉、聂郁胜、周开义、蒋飞虎, 1990, 第三系古生态、古地理、古气候。刊于: 赵志清、孙永才等: 中原油气区第三系, 中原油油勘探局勘探开发研究院院刊。

② 赵志清、彭辉、聂郁胜、周开义、蒋飞虎, 1990, 第三系古生态、古地理、古气候。刊于: 赵志清、孙永才等: 中原油气区第三系, 中原油油勘探局勘探开发研究院院刊。

化石沟鞭藻的古生态(例如 Downie *et al.*, 1971; Mao and Norris, 1988)作过工作,他们研究的共同结论是沟鞭藻的生产力(丰度)、属种分异度和不同类别的分布受水体的物理条件(如水深、水温、水的透明度、水动力条件等)和化学条件(如水的含盐度、酸碱度、含磷、氮等溶解性元素和其他有机营养物等)的控制。Harland (1988)还发现,沟鞭藻并非全为光合作用自己制造食物的自营藻类,其中的旋沟藻型为自养型沟鞭藻,而多甲藻型为异养型沟鞭藻类,偏爱于距离陆地较近、有机物较丰富的地方。他还曾提出以旋沟藻型/多甲藻型的比值作为推测距陆地(海岸线)远近或含盐度高低的参数(Harland, 1973)。水的透明度(和含泥沙量有关)对自养型沟鞭藻的繁盛和分布有重大影响,携带大量泥沙的河口入海处,沟鞭藻甚至可以完全绝迹。上涌洋流发育的地方,沟鞭藻的丰度大大提高,特别对异养型的多甲藻型沟鞭藻。即使对于自养型的沟鞭藻,仅有阳光是不够的,还需要有溶解性的氮、磷等元素和维生素等才能生存,远离大陆,不含营养物的大洋盆中,沟鞭藻也会消失。他们的研究还发现化石沟鞭藻(即沟鞭藻合子的休眠孢囊)的形态特点在一定程度上反映了当时的水体沉积环境。例如具厚壁的孢囊发育于动荡的水体或寒冷的高纬度地区(Vozzhenikova, 1965; Mao and Mohr, 1995);具低饰或短刺状突起的沟鞭藻孢囊常在距离陆地较近的大陆架内带发育,而具长大管状或长而纤细、突起复杂并具横络的沟鞭藻孢囊在距陆地较远、水体清澈的大陆架外带繁盛,那里沟鞭藻组合的属种分异度远高于大陆架内带的。

以上结论均为据海相沟鞭藻研究而得出,对我们研究陆相沟鞭藻会有一定的借鉴作用。本区的沟鞭藻为陆相湖泊的产物,因而在应用这些结论时需要结合具体情况分析。

本区地域不大,从南至北纬度仅差 $5^{\circ}$ ,始新世时全区同处于中亚热带,渐新世时也同属此亚热带(赵秀兰等, 1992),因而在纵、横向上水温变化不会太大,对本区浮游藻类的分布也不会有明显影响。只是本区中、南部地区在始新世时气候较北部地区为干旱,氧化和水动力条件可能也较强些,反映在岩性上大仓房组上段和核桃园组下、中段的红色、褐色及较粗粒沉积物多于北部地区相当时代的沙河街组四段和三段,可能是导致大仓房组上段和核桃园组下、中段沟鞭藻丰度和属种分异度低于沙河街组四段和三段的原因之一。除此之外,影响本区沟鞭藻丰度、属种分异度和类型的最主要因素为水的含盐度、水深和距岸远近。

含盐度或许是控制本区非海相沟鞭藻的丰度、属种分异度和类别的首要因素。尽管本区从老到新早第三纪各层段均产浮游藻类,但含沟鞭藻最丰富的为水体含盐度最大的沙河街组三段、沙河街组一段和核桃园组下、中段。从平面上对比,本区中、南部地区核桃园组泥岩的Sr含量测量为 $491 \times 10^{-6}$ (南阳油田化验室资料),而北部东濮凹陷沙河街组三段泥岩Sr含量的平均值为 $925 \times 10^{-6}$ <sup>①</sup>,均高于淡水,低于海水,并反映中、南部凹陷的含盐度低于北部的东濮凹陷,这可能是南阳、泌阳凹陷的沟鞭藻远不如东濮凹陷的发育之主要原因,这里的绿藻门各科分子常常超过沟鞭藻。北部的沙河街组二段及东营组含盐度降低为接近淡水或淡水(赵志清, 1994),沟鞭藻的丰度和分异度也随之大大下降,让位于绿藻门诸科的各种圆球藻类、褶皱藻和盘星藻。南阳、泌阳凹陷的核桃园组上段只在湖盆中心的半深湖、深湖区才见少量沟鞭藻,其他水浅的边缘地区完全缺失。同一凹陷的不同部分,也是含盐度较高的湖盆中央的半深湖和大部分深湖区比含盐度较低的浅湖区的沟鞭藻要发育,但绿藻门的浮游藻类在浅湖区要比在前者繁盛。

水深及距湖岸远近,这是两个互相有关的对沟鞭藻的丰度及属种分异度有影响的因素。同

<sup>①</sup> 赵志清、彭辉、聂郁胜、周开义、蒋飞虎, 1990, 第三系古生态、古生理、古气候, 刊于: 赵志清、孙永才等; 中原油气区第三系, 中原石油勘探局勘探开发研究院院刊。

时,这两个因素和水的含盐度也有一定的关系。一般说距湖岸越近的湖盆边缘水的深度越浅,远离湖岸、越向湖盆中心,水的深度越大。同时,湖岸边缘基底的坡度对水的深度也有一定影响,坡度太小的湖盆,缺乏或贫含浮游藻类、缺失沟鞭藻的滨浅湖区的范围会大大增加。距湖岸近的滨浅湖区,不仅水浅,含盐度可能会受到河流进入湖泊的影响而降低,水动力条件也会增强,例如本区中、南的廖庄组沉积时,整个湖盆进入萎缩期,整个湖盆深度较小,只有扇三角洲和滨浅湖两个环境区,前者由于水动力条件太强,各种浮游藻类均很稀少,后者虽然水动力条件稍弱,但水体深度太浅,而且为淡水水质,沟鞭藻几乎全部绝灭,剩下的绿藻门的褶皱藻和粒面球藻也极不发育。本区浮游藻类发育的沙河街组三段、沙河街组一段和核桃园组下、中段沉积时的沿湖岸的滨湖区,一般只有少量绿藻如盘星藻、圆球类藻;再向内的浅湖区,水体深度加大,环境也较滨湖区平静,绿藻门的浮游藻大量繁盛,沟鞭藻中广盐度或喜爱低盐度的类别出现;至湖盆中心深度大的半深湖—深湖区,沟鞭藻得到了最大发育,丰度及分异度均趋高,刺孢囊分子也多半出现于此区,绿藻门的浮游藻类则大大降低丰度。

根据本次工作及前人研究,这里将对本区几种重要的沟鞭藻及其他浮游藻类的古生态作进一步的探讨:

(1) 渤海藻类 本文作者之一曾认为渤海藻类是一能忍受较为宽的盐度的类别,可生存于微咸水—半咸水(徐金鲤、茅绍智,1989)。渤海藻和副渤海藻属是本区横向、纵向分布最广泛的沟鞭藻属,从含盐度高的沙河街组三段、沙河街组一段和核桃园组下、中段至含盐度低的沙河街组二段、东营组和核桃园组上段均有产出,这二属既可和旋沟藻型刺孢囊属如稀管藻、管球藻、心球藻和古多甲藻亚科的古多甲藻、三水藻、曙藻等共生,又可与少量的褶皱藻、盘星藻在一起。在东濮凹陷含高盐度的沙河街组三段、一段中,渤海藻、副渤海藻含量最高、种数最多,还伴生有钙质超微化石。以上事实再次证实了徐金鲤等(1989)的看法。此两属中,副渤海藻忍受低盐度的下限可能比渤海藻的更低,如在沙河街组二段和东营组,渤海藻属已消失时,副渤海藻仍可见少量;在核桃园组上段,渤海藻仅见少量,而副渤海藻仍保持相当的含量。渤海藻类的黄河藻、副多甲藻和中原藻属主要见于本区北部的凹陷之沙河街组一段,在本区中、南部的凹陷仅在大仓房组上段和核桃园组下、中段稀少见到。从介形虫壳体所测微量元素Ca/Mg值分析<sup>①</sup>,沙河街组三段水体含盐度略高于沙河街组一段,可能水体盐度只是因素之一,还有其他未查明的因素在控制这一类渤海藻亚科分子中起重要作用。除含盐度外,渤海藻类诸属对水体深度也有一定的要求,在沙河街组三段和一段及核桃园组中、下段,水质为微咸水但深度为较小的浅湖区,这类藻仅少量产出,只有在水体深度较大的半深湖、深湖区才大量繁盛。光面的渤海藻能在滨湖区以稀少的量残存。

(2) 旋沟藻型近似一刺孢囊的多刺甲藻和小个体、突起较短的繁棒藻。这两属仅见于北部凹陷含盐度较高、水深较大的半深湖—深湖区,未产出于中、南部凹陷中。说明它们要求微咸—半咸水、相当深度的水体和较为平静的环境。多刺甲藻属始现于沙河街组二段,特别繁盛于沙河街组一段,未见于沙河街组三段,可能说明除了盐度和水深两个条件外,还有一些其他未了解的控制因素。

(3) 旋沟藻型刺孢囊的稀管藻、心球藻、管球藻、疏管藻、刺甲藻等属。这些具长管或大管状突起的类型仅见于本区北部盐度高、水体深的半深湖和深湖区,在本区含量一般不高,发育也远不如其海生种为好,似乎要求更高的更靠近海洋盐度的水体。然而,在山东济阳凹陷沙

<sup>①</sup> 赵志清、彭辉、聂郁胜、周开义、蒋飞虎,1990,第三系古生态、古地理、古气候,刊于赵志清、孙永才等,中原油气区第三系,中原石油勘探局勘探开发研究院院刊。

河街组三段中、上部,发现了丰富的这种类型的刺孢囊心球藻、稀管藻和半囊藻(*Homotryblium*)属,未见有孔虫和钙质超微化石(徐金鲤,1995,个人交流),说明了除含盐度外,可能还有其他因素,如湖盆的封闭性(姚益民等,1992)控制了这些类别的分布,该沟鞭藻组合以低的分异度、少数属种的高优势、大量个体为特征,或许指示某种特化条件。

(4) 绿藻门的褶皱藻。分布于本区北部凹陷沉积沙河街组三段下部及顶部、沙河街组二段及沙河街组一段和核桃园组各段的浅湖区,最佳发育条件为淡水的浅湖,也能忍受微咸水和渤海藻类共生,少量产出。

(5) 绿藻门绿枝藻科的各种圆球藻类。从它们在全区的分布看,淡水、各种深度的水体均能生存,微咸的水质也能忍受,尤其是粒面球藻,以淡水的浅湖区为最佳生存环境。其中的光面球藻最喜爱平静的环境,而粒面球藻、网面球藻、皱面球藻等可在近岸水动力条件稍强的水体中大量繁盛。

(6) 绿藻门的盘星藻。现代盘星藻都为淡水浮游藻,生长于营养盐较丰富的水体中,水体的pH值一般为中性偏碱(刘志礼,1990)。本区的盘星藻化石基本发育于靠近湖岸、水较浅的淡水滨湖区,如沙河街组四段、沙河街组三段下部、沙河街组一段下部、大仓房组和核桃园组下、中部的滨浅湖区,少量可发现于微咸水的浅水区。

(7) 疑源类具短棒的棒球藻(*Filisphaeridium*)。此属在本区广泛分布,从沙河街组四段和大仓房组上段至沙河街组一段、核桃园组上段都有产出,但未见于东营组和廖庄组。最繁盛的为以上各段的半深湖—深湖区,滨湖区含量极为稀少,说明此属疑源类为广盐度分子,微咸—半咸水为最佳盐度条件,并对水深有一定的要求,太浅的淡水体不适合它的生存。

## 四、结 论

1. 本区的沟鞭藻是内陆湖盆咸化条件下的产物,与海水的侵入无关,故为陆相沟鞭藻。

2. 本区的陆相沟鞭藻以多甲藻型在数量上占优势,其中的具联合古口的类型相当发育,旋沟藻型的沟鞭藻中以具短突起或低饰的近似一刺孢囊和近似孢囊为主要成分,具长突起的刺孢囊的属种一般含量较低。新修订的渤海藻亚科是我国东部地区早第三纪陆相沟鞭藻的特有类型。

3. 本区浮游藻类的古生态研究表明,水体含盐度和水体深度是控制这些藻类分布的主要因素。富含沟鞭藻的、微咸—半咸水的半深湖(深湖)是本区的高产油(气)区。沟鞭藻还可为沉积环境的研究提供重要的信息。

4. 沟鞭藻在油气生成及勘探开发中有着重要的作用。不仅可用以对比地层、确定地层时代、研究沉积环境,尤其在生、储、盖自生配套的凹陷盆地中,丰富的沟鞭藻产出必然带来有工业价值的油(气)田。

## 主要参考文献

- 成鑫荣、刘传联,1993,济阳拗陷沙一段钙质超微化石的锶同位素组分及其地质意义。复式油气田,4(1)。  
刘志礼,1990,化石藻类学导论。北京:高等教育出版社。  
孙镇城、曾学鲁、陈克造、王蓓、李瑜,1992,柴达木盆地盐湖有孔虫的发现及其地质意义。石油学报,13(2)。  
王云飞、王苏民、马敏,1990,泌阳凹陷下第三系核桃园组湖相隐藻层纹石岩的发现及其环境意义。沉积学报,8(4)。

- 徐金鲤、茅绍智, 1989, 对渤海藻类的新认识。植物学报, 31(3)~31(4)。
- 姚益民、徐金鲤、单怀广、李经荣, 1992, 山东济阳坳陷早第三纪海侵的讨论。石油学报, 13(2)。
- 赵志清, 1994, 晚始新世至渐新世轮藻植物群及其古环境探讨。微体古生物学报, 11(1)。
- 赵志清、吕红玉, 1988, 东濮盆地晚始新世生物群及其古环境的探讨。微体古生物学报, 5(3)。
- 赵秀兰、赵传本、关学婷、唐升原、傅智雁, 1992, 利用孢粉资料定量解释我国第三纪古气候。石油学报, 13(2)。
- 朱神照, 1990, 微古生物化石丰度与油气藏生成。石油学报, 13(2)。
- Bujak, J. P., Downie, C., Eaton, G. L. and Williams, G. L., 1980, Dinoflagellate cysts and acritarchs from the Eocene of southern England. The Palaeontological Association, Special Papers in Palaeontology, 16.
- Downie, C., Hussian, M. A. and Williams, G. L., 1971, Dinoflagellate cyst and acritarch associations in the Paleogene of southeast England. Geoscience and Man, 3.
- Harland, R., 1973, Dinoflagellate cysts and acritarchs from the Bearpaw Formation (Upper Campanian) of southern Alberta, Canada. Palaeontology, 16.
- , 1983, Distribution maps of Recent dinoflagellate cysts in bottom sediments from the North Atlantic Ocean and adjacent seas. Palaeontology, 26(2).
- , 1988, Dinoflagellates, their cysts and Quaternary stratigraphy. New Phytology, 108.
- Mao Shaozhi and Norris, G., 1988, Late Cretaceous—Early Tertiary dinoflagellates and acritarchs from the Kashi Area, Tarim Basin, Xinjiang Prov., China. Royal Ontario Museum, Life Sciences, Contributions 150.
- and Mohr, B., 1995, Middle Eocene dinocysts from Bruce Bank (Scotia Sea, Antarctica) and their paleoenvironmental and paleogeographical implications. Review of Paleobotany and Palynology, 86.
- Schull, B. J., Felix, C. J., McCaleb, S. B. and Shaw, W. G., 1966, The inter-discipline approach to paleoenvironmental interpretations. Transactions, Gulf-Coast Association of Geological Societies, 16.
- Tappan, H., 1980, The Paleobiota of Plant Protists. Freeman, San Francisco.
- Williams, D. B., 1971, The distribution of marine dinoflagellates in relation to physical and chemical conditions. In: Funnel, B. E. and Ridel W. R. (eds.), Micropaleontology of Oceans. Cambridge University Press.
- Возженикова, Т. Ф., 1965, Введение в изучение ископаемых перидинеевых водорослей. Наука.

# 现代淡水沟鞭藻热模拟实验与油气生成

童林芬 马欣祥 茅绍智 王从凤 熊玉文

## 一、前言

目前为指导油气的勘探与开发,对石油成因理论、有机质类型与热演化、生烃热模拟等方面开展了深入研究。国际上不少学者从研究孢粉壁的化学成分和孢粉热演化的模拟实验入手,来探讨孢粉与油气生成的关系。如 Silverman (1964) 的研究指出,类脂化合物包括树蜡、脂肪、挥发油和色素是石油化合物的主要族,与生物类脂化合物之间在化学结构上有很大的相似性。对现代孢粉和藻类所做的热模拟结果均证明了孢粉和藻类等所形成的有机质是最好的生油母质,Comboz (1971) 对 *Tasmanites* 藻外壁加热,证明其热解作用产物所得的红外光谱和原油的红外光谱相似。Brooks 和 Shaw (1972) 对单细胞藻类、细菌和高等植物孢粉外壁分析研究得出,孢粉素是形成石油烃类的原始物质。他们的实验证明,现代和化石的真菌、藻类、孢子和花粉外壁的孢粉素均由  $\beta$  胡萝卜素和类胡萝卜素脂的氧化共聚物所组成,它们在热解条件下产生烃类,为石油提供了油质、脂肪质和蜡质。Lijembach (1975) 曾对卡塔尔西部 Faishakh 近代藻类的群体加热实验,当加温至 300℃ 时,用氯仿抽提,结果得到了烃类。我国学者贾荣芬等 (1981) 对现代海水马尾藻在  $500 \times 10^5 \text{Pa}$  下作加热实验,当加热至 250~300℃ 之间时,烷烃的产出量最大,与 Harwood (1977) 所做的未成熟干酪根的热解实验得出 250~350℃ 之间为主要成油阶段的结论一致。陆杰、盛国英等 (1987) 对泥炭藓植物形成的煤模拟实验结果表明,随着热化程度增高,生油、气的潜力也随着提高。吴庆余等 (1987) 对现代浮游蓝藻小颤藻 (*Oscillatoria tenuis*) 热解实验,发现其细胞壁、蛋白质和叶绿素在不同热解温度阶段,均能产生烃类。赵传本 (1988) 对现代花粉模拟加热实验,同样证实孢粉生油的主要温度范围为 300~400℃,而以 350℃ 产出烃量最多,且主要由孢粉素裂解生成。王开发等 (1989) 对现代孢粉热解研究,也证明孢粉的生油机理相当 II 型干酪根,300~400℃ 为主要产烃高峰期。

以上研究均是以现代孢粉和海水藻类为对象,而对淡水沟鞭藻热模拟与生烃的研究,尚未见正式报导。本研究课题为探索陆相沟鞭藻的生油潜力,首次对现代淡水沟鞭藻进行热模拟实验,观察在不同温度下,沟鞭藻形态等一系列的变化,测定热变过程中各种产物的组分、量值等。这对研究地质历史时期成岩过程中沟鞭藻化石经受长期的热变质作用,从而引起一系列变化并生成油气和油气分析,具有一定的参考价值。为进一步证实淡水沟鞭藻的生烃潜力,本文对现代淡水沟鞭藻微小多甲藻 *Peridinium pusillum* 进行了热解模拟实验,并对其在热变中的形态、结构、产物、组分等进行了观察、分析、鉴定,结果证实了淡水沟鞭藻在烃资源生成中具有重大作用。

## 二、热模拟实验

### (一) 实验材料

模拟样品选用的是甲藻门 (Pyrrophyta) 之微小多甲藻 *Peridinium pusillum*, 系由中国科学院武汉水生生物研究所藻种室培养的纯种藻。所用的培养基配方为:  $\text{NaNO}_3$  50mg/L,  $\text{MgSO}_4$  15mg/L,  $\text{CaCl}_2$  10mg/L,  $\text{KHCO}_3$  10mg/L,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  5mg/L,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  7mg/L,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  5mg/L,  $\text{Fe-EDTA}$  1mL,  $\text{MnSO}_4$  0.1mL, 维生素 0.3mL, 土壤清除液 30mL。培养时间为一年。所培养的藻液经高速离心沉淀, 获纯湿藻, 再经冰冻干燥, 制成黄灰色生物絮状干藻粉 1.4g。其中孢囊占总量的 10%~20%。

*Peridinium pusillum* 的形态特征: 细胞卵形, 背、腹扁平, 横沟环形, 上甲略呈圆锥形, 小于下甲, 下甲大半球形。板式为 4', 2a, 7'', 5'', 2'''. 甲表面光滑或具很浅的窝纹。色素体黄绿色或褐色 (见图版 I, 图 7, 图 8)。

### (二) 实验方法及结果

将 *Peridinium pusillum* 的干样 1.4g, 装入硬质玻璃管中, 抽真空后放入高温炉中加热。从 100~400℃ 间, 分 6 个温度点 (150℃、200℃、250℃、300℃、350℃、400℃), 后补充 100℃, 370℃ 两个温度点, 进行加热模拟实验, 升温速率为 6℃/min, 间隔温度为 50℃。每个温阶恒温 12h。分别取出不同温度产生的气体, 在气相色谱仪上进行气体分析。对可溶有机质氯仿沥青 “A” 进行了族组分析。对不溶有机质固体残余物进行了形态特征热变化的观察和统计。结果获得了丰富可靠的数据。由于样品量有限, 未能进行红外光谱分析及 C、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 元素分析。现将各项实验结果分析如下:

#### 1. 气态烃产物分析

*Peridinium pusillum* 在各温度点和常压下热解的烃类气态产物进行气相色谱分析 (见表 1)。气态产物中烃类气体 (不包括非烃类气体) 类型有 15 种。分析结果明显表明烃类气体主要是低分子量的轻烃类气体 C<sub>1</sub>~C<sub>6</sub> 的化合物。热解 200℃ 以前烃类气体的产气率很低, 均小于 0.2。可能主要产出的是非烃类气体。从表 1 可见烃类气体中以 CH<sub>4</sub> (甲烷)、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (乙烷)、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (丙烷) 为主。200℃ 时, CH<sub>4</sub> 为 0.11mL/g, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 为 0.01mL/g, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 为 0.006 mL/g, 此时其他气体含量也较低。温度升至 250℃ 时气态烃开始逐渐增高, 产气率达 2.57mL/g, 此时 CH<sub>4</sub> 增至 0.65mL/g, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 增至 0.05mL/g, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 增至 0.04mL/g。250~350℃ 阶段, C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub> 化合物的含量继续增加, 其他气体的含量也有明显升高。升温至 400℃ 时气态烃含量达高峰, 产气率为 11.36mL/g, 为 250℃ 时的 5 倍多。此时 CH<sub>4</sub> 为 6.38mL/g, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 增至 1.93mL/g, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 增至 1.35mL/g。其他气体略有降低的趋势。主要气态烃成分 (C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 和 C<sub>3</sub> 的化合物) 随温度升高含量增多、质量提高。这一点可从 *Peridinium pusillum* 在不同温度点的产气率及 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub> 含量变化曲线图上显示出 (图 1, 图 2)。图中 C<sub>1</sub> 代表 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub> 为 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub> 为 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> + C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>。

以上结果与吴庆余等 (1987), 对 *Oscillatoria tenuis* 热解产气分析结果相似。*O. tenuis* 热解后在 250℃ 以前产气率很低。250℃ 时开始有较大产气率 (44mL/g), 350℃ 产气率提高一倍多 (98~100mL/g)。此时气态烃组分 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 的含量明显增高, 相当 250℃ 时的 5

表 1 *Peridinium pusillum* 热解气态烃组分表

(样品 119.72mg 干藻粉)

| 热解<br>温度<br>(°C) | 产气率*<br>(mL/g) | 气 态 烃 组 成 (mL/g) |                               |                               |                               |                                 |                                 |                                |                                |                                 |                                 |                                 |                                 |
|------------------|----------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                  |                | CH <sub>4</sub>  | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | iC <sub>4</sub> H <sub>8</sub> | nC <sub>4</sub> H <sub>8</sub> | iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | iC <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | nC <sub>6</sub> H <sub>14</sub> |
| 150              | 0.044          | 0.009            | 0.006                         | 0.005                         | 0.002                         | 0.001                           | 0.001                           | 0.001                          | 0.001                          | 0.003                           | —                               | —                               | 0.001                           |
| 200              | 0.401          | 0.11             | 0.01                          | 0.02                          | 0.008                         | 0.003                           | 0.002                           | 0.003                          | 0.01                           | 0.04                            | —                               | 0.002                           | 0.18                            |
| 250              | 2.57           | 0.65             | 0.05                          | 0.07                          | 0.04                          | 0.02                            | 0.002                           | 0.007                          | 0.002                          | 0.03                            | —                               | —                               | —                               |
| 300              | 4.14           | 2.74             | 0.28                          | 0.18                          | 0.31                          | 0.09                            | 0.12                            | 0.06                           | 0.02                           | 0.15                            | —                               | 0.001                           | 0.003                           |
| 350              | 9.8            | 5.24             | 1.16                          | 0.35                          | 1.14                          | 0.22                            | 0.39                            | 0.15                           | 0.06                           | 0.41                            | —                               | 0.06                            | 0.09                            |
| 400              | 11.36          | 6.38             | 1.93                          | 0.28                          | 1.35                          | 0.20                            | 0.34                            | 0.07                           | 0.06                           | 0.14                            | 0.05                            | —                               | —                               |

\* 不含非烃组分