

科学出版社

徐永昌 刘文汇 沈平
吴铁生 王万春 朴明植 著

辽河盆地天然气的形成与演化



前 言

天然气作为一种优质常规能源和基础化工原料在世界能源构成和化学工业中愈来愈占有重要地位。国外工业发达国家在近 20 年间都极大地强化了天然气的勘探与开发。相应地对天然气地球化学特征、成因分类、气藏形成等问题也予以极大的关注,而这些问题对天然气工业无论在理论上还是在实践中均具有重要意义。

本世纪中叶至今,天然气地球化学已成为地球化学一门新兴分支的学科,形成了自己的理论体系。70 年代,稳定同位素运用于天然气地球化学研究,依据甲烷同位素组成及其变化,甲、乙烷同位素差值随天然气“成熟度”改变而改变的认识,对天然气的来源及演化历史进行研究 (Stahl, 1974, 1976, 1977); 利用天然气分子组成 (C_1 / C_{2-3}) 与甲烷 $\delta^{13}C$ 值关系识别天然气成因; 根据 $\delta^{13}C$ 值与生气母质的镜质组反射率 (R^0) 及甲烷干燥系数 ($C_1 / \sum C_n$) 之间有良好的相关性的认识, 利用 $\delta^{13}C_1 - R^0$ 关系追踪气源岩 (Stahl, 1976); 利用甲烷的 $\delta^{13}C$ 和 δD 进行天然气分类 (Stahl and Garey, 1975; Schoell, 1983) 等。近年来, 利用天然气形成作用中的活化能关系, 研究不同母质类型形成的天然气演化的特征 (Galimov, 1988), 并对西西伯利亚超大型天然气藏成因进行了重新认识, 认为该气田并非生物成因或高温热解成因, 而是腐殖型母质在演化早期阶段的产物, 从而改变了世界天然气资源中不同成因类型所占的份额。

80年代以来,我国天然气地球化学的分析、研究有迅速发展,并取得很大成就。国内外学者将天然气化学组成特征和同位素组成特征用于识别母质类型,进行成因分类^{①②}(沈平等,1987),应用各种组分之间的碳同位素自然分区值与源岩成熟度的内在联系,确定天然气热演化程度(James,1983)。辽河油田是70年代发展起来的石油、天然气勘探新区,天然气资源十分丰富而成因比较复杂。因此,对该盆地进行系统全面的天然气地球化学研究,不仅有助于探讨陆相沉积盆地天然气的成因机理,也将为该盆地天然气的进一步勘探与开发提供有价值的信息。在以往的工作中,对天然气进行了分析、研究,在天然气地球化学方面积累了较多的分析数据和研究资料,我们在1986—1987年完成的“辽河盆地天然气地球化学特征初探”的研究中,对该区天然气的地球化学特征、成因及气源对比方面作了初步的探讨。研究成果不仅在油气勘探中得到了验证,而且对天然气的勘探起到了一定的指导作用。经国内同行专家的评审,认为该报告对天然气地球化学作了全面、综合性研究,可靠地判识了天然气成因类型,首次提出了生物-热催化过渡带气。作为一种气体成因类型,对辽河盆地天然气资源量的评价和勘探具有实际的经济和社会效益。

为了进一步对辽河盆地天然气、原油及凝析油的地球化学特征及成因机理作系统的探讨,对该区油气勘探提供更多有价值的信息,于1988—1989年开展了“辽河盆地油气地球化学特征”的研究。本研究共采集天然气样55个,原油样56个,凝析油样8个,源岩样31块,系统地进行了天然气组分、碳、氢、氦、氮同位素,原油、凝析油、气源岩碳氢同位素,有机质组分及色谱、色-质联用测定等分析共1521项次。全面开展了气源岩、天然气地球化学特征的研究。结合地质背景,系统、深入地总结了辽河盆地天然气形成、演化和成因类型,获得了具有重大理论和实践意义的新的认识和新的发现。以

①徐永昌等,1985,煤成气地球化学,中国科学院兰州地质研究所。

②廖永胜,1988,天然气研究新进展,中国石油天然气总公司科技发展部。

此理论为指导,在辽河盆地发现了工业气井,为天然气勘探开发提供了有重要指导意义的科学信息。

本专著共分六章,各章编写人员为:第一章 吴铁生、顾志明;第二章 沈平、朴明植、吴铁生;第三章 王万春、刘文汇;第四章 沈平;第五章 刘文汇、徐永昌;第六章 徐永昌、刘文汇。

初稿完成后由沈平和刘文汇对全文进行审阅和修改。

参加此项工作的主要科技人员有:

中国科学院兰州地质所:徐永昌、刘文汇、沈平、王万春、王先彬、陈践发、李晓明、钟山、文启彬、孙明良、彭韵硕、潘旭、毛曼君、申建中、胡秀英、杨辉、邵波和徐胜。

辽河石油勘探科学技术研究院:吴铁生、朴明植、李瑞塘、刘德英、顾志明、许茂芬、宋俊、郭忠贵和郭克园等。

全书由荣光华编辑,刘欣莲绘图。

本著作编写得到黄第藩教授的指导并提出很多宝贵意见,同时也得到原石油工业部和辽河油田的大力协助,在此一并表示感谢。

目 录

前 言

1	盆地概貌	1
一、	构造单元	1
二、	盆地发育和演化	3
(一)	盆地基底	3
(二)	新生代裂谷发育与演化	5
三、	盆地的基本结构与格局	9
2	气源岩地球化学特征	13
一、	气源岩分布	13
(一)	前第三系	13
(二)	下第三系	15
二、	气源岩的地球化学性质	17
(一)	有机质丰度	17
(二)	有机质类型	18
(三)	有机质热演化特征	29
3	天然气地球化学特征	38
一、	天然气气体组分特征	38
(一)	气态烃组分特征	38

(二) 天然气组分分布特征	40
(三) 甲烷与其同系物比值关系	43
二、天然气中碳、氢同位素组成特征	49
(一) 天然气烃类组分与甲烷碳同位素分布的关系	50
(二) 甲烷碳、氢同位素组成特征	54
(三) 天然气甲、乙、丙烷碳同位素组成特征	58
三、天然气中非烃及稀有气体地球化学特征	60
(一) 非烃气体组分特征	60
(二) 稀有气体同位素组成特征	64
四、天然气分布规律	71
4 液态烃地球化学特征	74
一、轻烃地球化学特征	74
(一) 轻烃的烃类组分特征	75
(二) 芳烃化合物特征	80
(三) 凝析油、轻质油中碳、氢同位素组成	87
二、原油同位素组成特征	88
5 天然气形成、演化及成因分类	92
一、天然气形成的一般特征	92
二、气、液、固(源岩)地球化学特征及天然气的形成	96
(一) 固、液、气的同位素分布特征	96
(二) 天然气的形成演化	98
(三) 不同母质天然气的演化特征	108
三、天然气成因分类	111
(一) 气体成因类型划分	111
(二) 不同母质类型天然气及其伴生液态烃的同位素组成 分布模式	112
(三) 辽河盆地天然气的成因类型及特征	113
6 专题讨论	116
一、生物-热催化过渡带气	116

(一) 过渡带气的提出	116
(二) 过渡带气的存在是客观规律	117
(三) 过渡带气形成机制探讨	121
(四) 小结	123
二、天然气运移	124
(一) 天然气运移机理	124
(二) 气体运移过程中的组分变化	126
(三) 运移气体的同位素组成特征	130
结 语	134
参考文献	138

盆地概貌

辽河盆地是一个新生代沉积盆地,位于辽宁省境内的辽河下游平原,其范围北抵沈阳以北,南至辽东湾,东西大致以沈大、沈山铁路线为界,陆地面积约 $12\,400\text{km}^2$ 。

多年研究表明,辽河盆地是属于大陆裂谷盆地,与辽东湾合称辽河裂谷,是渤海裂谷系的北部分支,具有与渤海湾油气区共同的发育演化史和构造—沉积特征,有着丰富的油气资源。

辽河盆地于 50 年代中期开始以找油为目的的地球物理勘探,特别是 70 年代以来的勘探开发,油田生产长期以较高速度发展,在油气储量和产量方面,已成为我国重要的石油天然气生产基地之一。

一、构造单元

辽河盆地由七个一级构造单元组成(图 1)。其中负向单元是:西部凹陷、东部凹陷、大民屯凹陷、沈北凹陷;正向单元有:中央凸起、西部斜坡、东部斜坡。斜坡曾有一度称之为凸起,实际上,它是两侧古隆起与裂谷主体之间的过渡区域,并为上第三系覆盖。它与凸起相似,普遍缺失下第三系,以其明显的斜坡状形态为特征;凹陷则是早期发育,长期沉陷的区域,沉积层层系全、厚度大、分布广,与凸起(或斜坡)之间呈断层接触或呈次一级斜坡过渡。由于块断活动的差

异性,各凹陷具有不同的“基底”埋深及其形态特征。

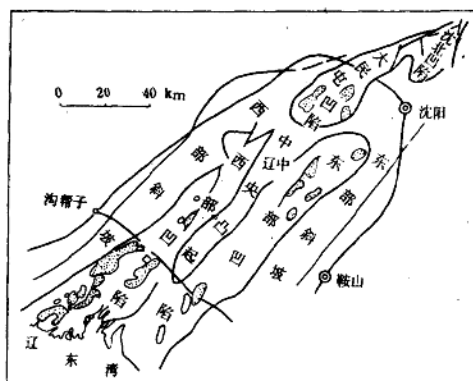


图1 辽河盆地一级构造单元划分图

西部凹陷面积 2600km^2 , 是北东向展布的狭长形凹陷。自北而南发育三个次一级的单元: 台安洼陷“基底”最大埋深 5000m , 盘山洼陷“基底”最大埋深 5200m , 清水洼陷“基底”最大埋深 8000m 。总的凹陷形态是东陡西缓的箕状凹陷(图2)。

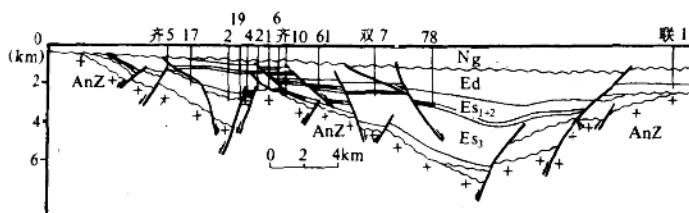


图2 西部凹陷南部地区(齐5-联1)构造、(油)气藏剖面图

东部凹陷面积 3300km^2 , 与西部凹陷平行展布, 自北而南发育牛居、沙岭、驾掌寺、二界沟等四个次级洼陷, “基底”最大埋深分别为 7500m 、 6000m 、 7200m 和 8000m 。凹陷形态狭长, 南北差异明显, 为复杂箕状“V”字型形态。

大民屯凹陷面积 800km^2 , 是一个周边为断层切割的三角形地堑式凹陷, “基底”最大埋深 7000m 。

沈北凹陷面积 400km^2 , “基底”埋深浅, 最大埋深位于凹陷南侧, 小于 2000m 。

在一级负向单元内部又有众多的次一级正向构造单元, 多以复式圈闭带的形式出现, 如周生背斜带 (包括披覆、滚动及隐刺穿背斜带)、褶皱背斜带、鼻状构造带、断块构造带等, 它们以东北向展布为主, 分布为凹陷的特定部位, 为油气聚集提供广阔的空间。

二、盆地发育和演化

(一) 盆地基底

辽河盆地是在古隆起背景上发育的新生代沉积盆地。前新生代地层均是盆地基底, 它们经历了漫长的地史演变, 构成盆地复杂的基底结构 (图 3)。

1. 前中生代地质时期

现盆地分布范围与华北地区是一个整体, 具有华北区相似的地质发育和区域构造特征, 既有东西向延展的隆起和拗陷, 又有近南北向的早期古基岩断裂, 使基底组成有明显东西差异:

西区 位于西部凹陷西侧以西地区, 基底主要是太古界、中上元古界。

东区 位于东部凹陷东侧以东地区, 基底组成主要是太古界、下元古界, 局部地区有中上元古界、古生界分布, 如太子河拗陷, 向盆地延伸至三界泡地区。

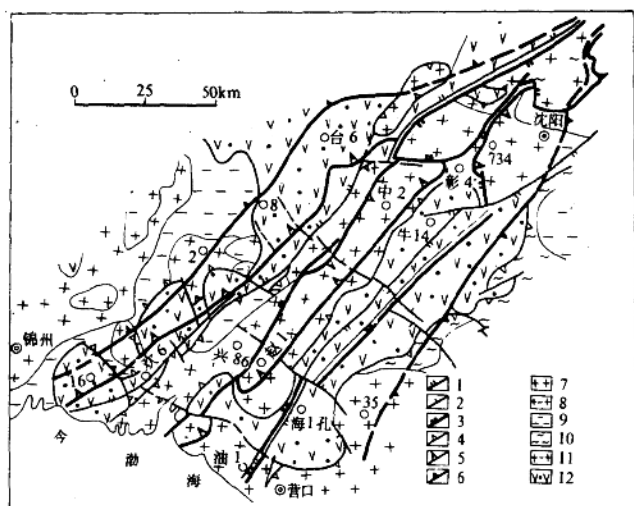


图3 辽河盆地前第三纪基底结构简图

1. 中生代主断裂；2. 中生代断裂；3. 新生代主断裂；4. 侏罗系缺失线；
5. 下第三系缺失线；6. 上第三系缺失线；7. 太古代花岗岩；8. 早元古代
花岗片岩；9. 中、下元古界；10. 古生界；11. 燕山期花岗岩；12. 中生界

中区 界于东西区之间的地区,基底组成主要是太古界、下元古界。

2. 中生代地质时期

随着构造运动体制的变移,区内出现北东向展布的构造体系。中部为长期隆起区,东西两侧发育众多的断陷盆地,地壳强烈块断,伴随有强烈岩浆活动,广泛分布岩浆侵入岩系、中酸性喷发火山岩系和陆相碎屑岩沉积。上侏罗统至下白垩统一般厚度可达 1000—3000m。中生代晚期整体抬升,处于隆起剥蚀状态。

(二) 新生代裂谷发育与演化

新生代辽河裂谷的发育与演化,经历了地壳拱张、裂陷和拗陷三大地质发育阶段(图4),其中裂谷阶段又可分为初陷、深陷、衰减和再陷四个时期。不同阶段或时期具有不同的构造、沉积演化特点。

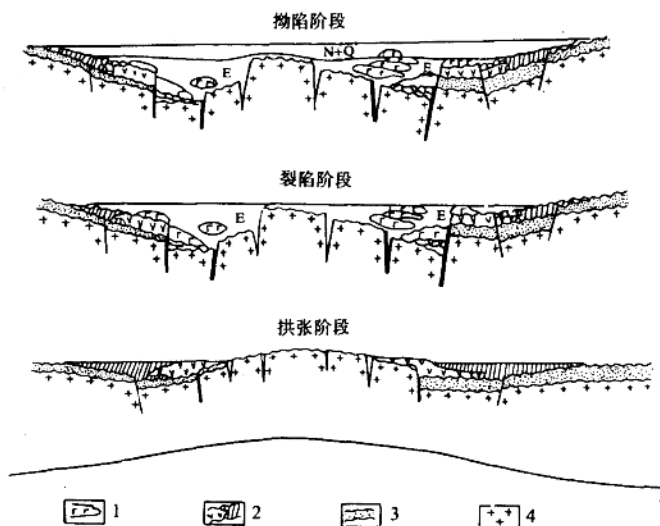


图4 辽河裂谷演化剖面图

1. 玄武岩; 2. 上侏罗系; 3. 前中生代沉积; 4. 花岗岩质地壳

1. 拱张阶段

古新世早期,本区地壳区域拱张,主干断裂系统产生,并具有深断裂性质,伴有全区性的碱性玄武岩喷发(图5),在相对低洼地,普遍发育红色粗碎屑沉积。

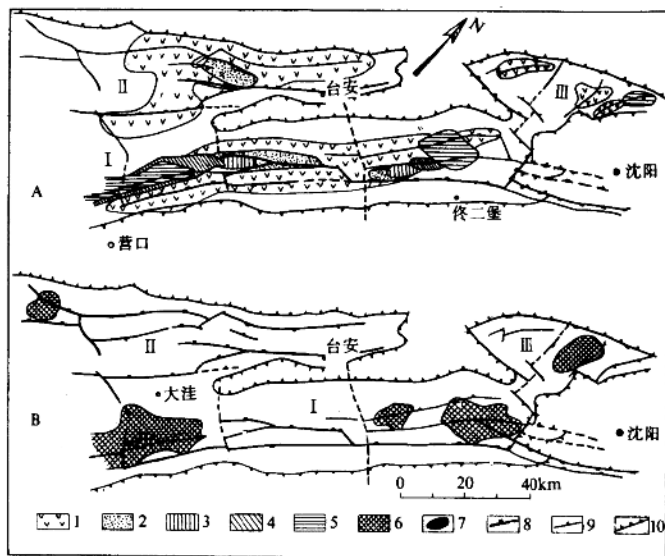


图 5 辽河裂谷火山岩分布图

I. 东部凹陷; II. 西部凹陷; III. 大民屯凹陷

1. 高升期火山岩; 2. 热河台期火山岩; 3. 于楼期火山岩; 4. 黄金带期火山岩;
5. 桃园期火山岩; 6. 大平房期火山岩; 7. 田庄台期火山岩;
8. 主干断裂; 9. 断裂; 10. 下第三系尖灭线

2. 裂陷阶段

(1) 初陷期 始新世早期(相当于沙四段沉积时期),随着块断活动增强,基底出现差异裂陷,大民屯、西部凹陷首先处于沉陷状态,在不同地区亦存在内部差异,西部凹陷的北部——牛心坨地区相对较早沉陷。该期总的看是呈现浅湖陆相沉积环境,局部可呈现半深湖沉积。暗色泥岩、油页岩、砂质页岩发育,湖盆边缘发育小型扇三角洲伸入厚层暗色泥岩之中,构成自生自储的成油气组合。

(2) 深陷期 始新世中晚期(相当沙三段沉积时期),处于强烈块断、快速扩张、大幅度下陷的变动时期。三个凹陷的主干断裂都发生大规模拉张裂陷活动。各湖盆均呈现深水沉积环境,发育浊流沉积体系,至沙三段沉积时期东部凹陷、大民屯凹陷在过补偿条件下,出现河流沉积体系,发育三角洲和泛滥平原沉积。

深陷期以大幅度裂陷为特征,大民屯凹陷沉降中心由北向南转移至法哈牛地区,最大沉降幅度为 3000m;西部凹陷沉降中心位于凹陷东侧清水地区,最大沉降幅度达 3200m;东部凹陷沙三早期开始沉陷,沙三中期强烈块断裂陷,最大沉降幅度大于 2000m,并伴有强烈的玄武岩浆喷发,分布在青龙台至黄金带广大地区。

另一方面,基底断块体的翘倾活动,导致盆地盖层在重力均衡作用下,发育一组东倾的同生断层和相应的同生构造。

(3) 衰减期 渐新世早期(相当沙一、二段沉积时期),此时裂陷速度相对变小,东西两凹陷出现浅湖环境,发育扇三角洲;大民屯凹陷短暂的浅湖环境,很快为河流体系代替,发育泛滥平原沉积。

此时,一些同生背斜构造在该阶段进一步加强,断裂活动除原有的倾向沉降中心、走向北东的派生断裂继续活动外,另有一组倾向洼陷的近东西走向的断裂发育,它们切割北东向构造,在一定范围内控制沉积。在东部凹陷的黄金带地区有火山活动。

(4) 再陷期 渐新世中晚期(相当东营组沉积时期),块断活动增强,扩张陷落加剧,以东部凹陷、西部凹陷最明显,沉陷幅度达 2600m,略次于深陷期幅度。在沉降中心存在浅湖沉积环境外,其他广大地区均在过补偿条件下,发育河流沉积体系,三角洲、沼泽、泛滥平原并存,后者更为发育。

随着主干断裂块断活动增强,派生断裂活动再次活跃,既有继承性,又有新生性。这些晚期断裂改造了原有油气分布面貌,同时亦形成新的圈闭,尤其是在渐新世末期,由于区域应力场的转变,一些主干断裂产生右行平移活动,如牛居-荣兴屯、台安-大洼、边台等主干断裂都曾发生不同程度平移,形成了一系列与平移活动有关的断裂构造,不仅对油气的再分配有控制作用,而且为生物气、过渡带气提

供了聚集空间。

本期岩浆活动亦再次增强,主要表现在东部凹陷,不仅在牛居、大平房地区有多次玄武岩喷发,而且在驾掌寺地区有超基性辉绿岩侵入体。

3. 拗陷阶段

始于晚第三纪早期,辽河盆地整体沉陷,上第三系覆盖在不同构造单元、不同时代岩层之上。沉降中心在盆地南部,最大沉降幅度达1500m,向海域增大。

综上所述,辽河盆地的发育演化具有下列几个明显特点:

(1)三个凹陷都经历了拱张、初陷、深陷、衰减、再陷和整体拗陷的发育过程,但不同时期各凹陷的发育程度、沉积环境、沉积体系方面又有差异。西部凹陷是长期发育;大民屯凹陷是早期发育后期衰退;东部凹陷是沙三早期开始发育,中后期强烈裂陷的凹陷。在沉积环境与沉积体系方面,早期大民屯凹陷与西部凹陷相似,中晚期大民屯凹陷与东部凹陷相似。

(2)三个凹陷在发育过程中基本上长期处于分隔状态,凹陷间的构造—沉积环境差异导致源岩分布、母质类型、油气性质的差异,凹陷是独立的成油气单元。

(3)纵向上不同层系之间,除上下第三系之间有明显的区域不整合外,基本上是连续的沉降、堆积过程,导致成岩作用的单旋回特点和完整的热演化序列。持续沉降、多旋回的沉积特点,决定盆地有两种基本的生储盖组合:

①不整合面分隔的组合,分两种情况:前第三系古潜山(Ar、Pt)油气藏属新生古储组合;上第三系油气藏为古生新储组合。

②连续型的组合,即自生自储,下第三系即是属这一类型,但各层组之间又有差列:

沙三、沙四段属典型自生自储组合。

沙一、沙二段以自生自储为主,亦有来自下伏层油气源的古生新储组合。

东营组,既有自生自储组合,更多的是来自下伏层油气源的古生新储组合。

(4)块断裂陷是早第三纪构造运动的主导形式,断裂活动贯穿裂谷发育的始终。按其机制,可分为主干断裂和派生断裂两类:前者一般是长期活动,规模大,可断开莫霍面,伴有岩浆喷溢。其主要作用是控制裂谷的发生、发展,决定凹陷形态、沉积环境、构造、沉积及地球化学模式;派生断裂是盆地中普遍存在的类型,具有同生断裂性质,主要控制凹陷内二、三级和四级构造单元的形成和展布,在不同时期或地质条件下,既可作为油气运移的通道,又可起遮挡、封储作用,控制油气的运移、聚集和富集。不同时期、不同产状的断层相互交切,使盆地内不同成因的油气具有复杂的分布面貌。

在强烈块断过程中,主干断裂常伴有岩浆喷溢。三个凹陷都存在,而以东部凹陷最强烈。据统计,自古新世至上新世(相当沙四段至明化镇组沉积时期),至少有七期较大规模的岩浆喷发活动。这些深大断裂的活动,不仅控制裂谷的发育,而且有可能成为深部幔源气向上运移的通道。

(5)盆地内三个凹陷多属小凹陷,东部、西部两凹陷范围稍大,但多为狭长形,每个凹陷不同地段都有各自的沉降中心,它们又是沉积中心和生油气中心,小凹陷、多中心生油气的特征,决定凹陷内的油气运移多属短距离运移特征。

三、盆地的基本结构与格局

主干断裂的发育与展布,控制了凹陷的结构和盆地的宏观构造格局。西部凹陷及东部凹陷的主干断裂分布在凹陷东侧,或临近东侧,呈现不对称的箕状阶梯形态(图6),其东侧与凸起之间多为断层接触,局部亦有过渡关系;大民屯凹陷三边为断层接触,呈三角形小地堑,早期沉降中心在北部,为明显的地堑结构(图7),晚期(沙三段—东营组)沉降中心在东南的荣胜堡地区,基本上呈现东陡西缓的凹陷形态。凹陷西侧与凸起之间则多为过渡关系,局部亦有断层接触

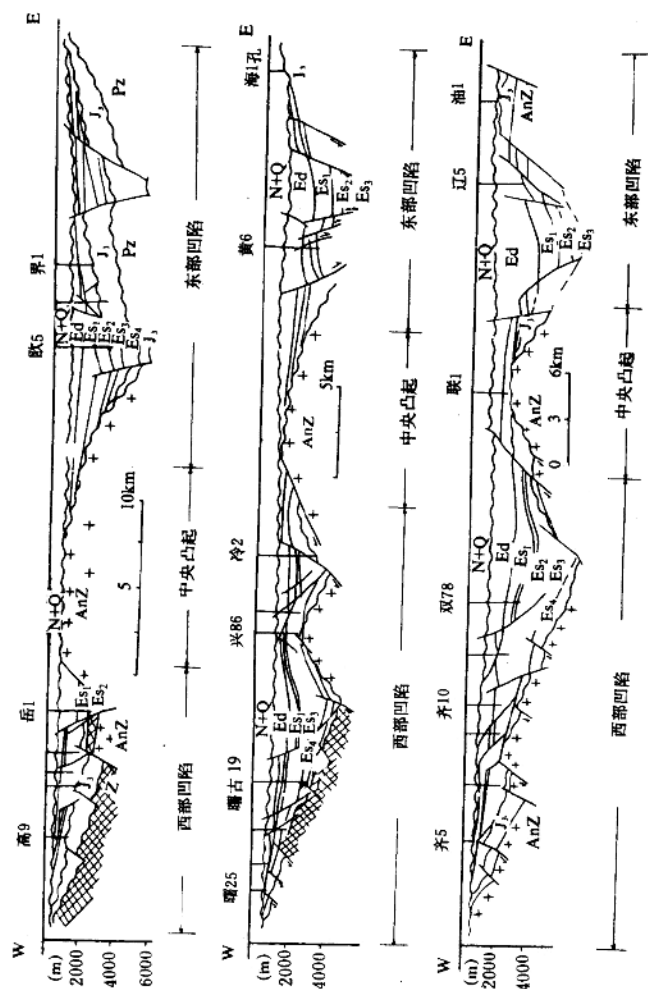


图 6 辽河盆地南部地质剖面图