

《朱夏论中国含油气盆地构造》习得

——纪念朱夏先生诞辰 100 周年

金之钧^{1,2,3}

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 北京大学能源研究院, 北京 100871;

3. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 朱夏先生既是一位理论造诣深厚的石油地质学家, 又是一位具有丰富实践经验的油气勘探工作者, 是我国含油气盆地研究的创导者、石油地质学奠基人之一。简要回顾了朱夏先生的核心学术思想, 总结了近 30 年来, 国内部分学者通过学习、继承和发展朱夏先生学术思想, 提出的一系列含油气盆地研究的创新性工作方法及认识, 包括笔者对盆地波动过程和油气成藏体系等分析方法的探索。展望未来, 指出石油地质学所面临的关键科学问题, 包括全球性的和中国特殊地质背景的科学问题, 认为继续学习、继承和发展朱夏先生学术思想, 必将对我国石油地质理论和实践发展产生深远影响。

关键词: 朱夏; 含油气盆地; 盆地分析; 成藏体系; 石油地质学

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

Acquisition of “ZHU Xia’s discussion on China’s petroleum basin”:

Commemorating the 100th birthday of Mr. ZHU Xia

JIN Zhijun^{1,2,3}

(1. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China;

2. Energy Research Institute, Peking University, Beijing 100871, China;

3. State Key Laboratory of Shale Oil Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China)

Abstract: Mr. ZHU Xia is a petroleum geologist with profound attainments in theoretical science and an oil and gas prospector with rich practical experience. He is one of the pioneers of petroliferous basin research and one of the founders of petroleum geology in China. This article gives a brief review of Mr. ZHU Xia’s core academic thoughts, and summarizes a series of innovative work methods and understanding put forward by some domestic scholars in studying, inheriting and developing Mr. ZHU Xia’s academic thoughts in the past 30 years, including the author’s works in basin evolution processes and hydrocarbon accumulation system analyses. Looking forward to the future, it is pointed out that the key scientific issues facing petroleum geology include the global and China’s special geological background. It will definitely contribute to the development of China’s petroleum geology theory and practice by studying, inheriting and developing Mr. ZHU Xia’s academic thoughts.

Key words: ZHU Xia; petroliferous basin; basin analysis; petroleum accumulation system; petroleum geology

从早在 20 世纪 80 年代读到朱夏先生的文章, 到背着《朱夏论中国含油气盆地构造》赴俄留学, 再到如今先生诞辰 100 周年之际, 已近 40 年。纪念朱夏先生, 重温先生的学术著作以及传记《诗人地质学家朱夏》, 获得诸多感受。朱夏先生将“个人的生活兴趣、科学上的意义以及国家建设的需要”三方面紧密结合, 走过人生四个十年规划: 读万卷书、行万里路、著书立说、教书育人, 终成为史诗般的地学家!

朱夏先生以毕生精力阐述有关中国油气盆地的理论和方法, 致力于中国油气地质事业。他跋山涉水, 跑遍了祖国的沉积盆地, 推动大陆边缘的研究, 并将全球板块大地构造理论与中国油气勘探的实践结合起来, 创造性地发表了一系列精辟的论文和讲演, 为地球科学, 尤其是大地构造和油气勘探做出了重大贡献。朱夏先生的“找油哲学”至今仍是一笔宝贵的思想财富。

收稿日期: 2020-06-11; 修订日期: 2020-08-05。

作者简介: 金之钧 (1957—), 男, 中国科学院院士, 教授, 主要从事盆地分析、油气资源评价、油气成藏机理与分布规律等研究工作。E-mail: jinzhj.syky@sinopec.com。

1 核心学术思想

朱夏先生学术思想的核心是活动论构造历史观。朱夏先生认为盆地整体的观念是勘探油气所必须遵循的一条基本原则,致力于盆地形成、演化的运动机制研究,运用历史演化、全球联系、深刻根源和动力作用方式等观点,以系统的、动态的、量化的方法,按照“理论建模—实例校验—动态模拟”的程序,开展盆地系统的研究工作^[1]。

20世纪60年代,板块构造理论逐步建立,地球科学迎来一场革命。那个年代,身处“半棚牛鬼半棚猪”^[2]的朱夏先生并不是简单追随来自大洋论证的板块构造学术思想,而是进一步通过“板块登陆”发散出全球性大洋运动与大陆关联而更为深刻的思维,指导含油气盆地分析。朱夏先生对我国不同地质时代的含油气盆地,对地壳发展阶段论和板块构造活动论做了开拓性研究,创建了“多旋回地球动力学”的观念,其方法论一方面是历史分析基础上的地球动力学分析,属于历史大地构造学范畴;另一方面是从大地构造角度作地球动力学分析,强调全球联系、深部根源和应力分析。这一学说对找矿,特别是在盆地寻找石油矿藏方面具有极大的指导作用^[3]。

正是对中国大陆地质的深刻认识与长期的深入思考,将证伪思想、发散思维和系统论运用于石油地质工作,朱夏先生提出含油气盆地分析的“3T-4S-4M”程式^[4](图1),明确指出了我国显生宙以来古生代和中新生代盆地原型的分类方案,突出了中国海陆盆地演化序列,确立了含油气盆地并列迭加控油理论分析系统。作为盆地系统工程的指导思想,这是具有重要理论意义的。朱夏先生的学术思想至今仍站在盆地学科发展的前沿。

2 继承与发展学术思想

1979年,朱夏先生提出了时至今日仍在不断发展和广为应用的盆地TSM系统分析程式^[2]。经

过三十多年的研发积累,无锡石油地质研究所形成了具有完全自主知识产权的“TSM盆地模拟资源评价系统(V2.0)”软件系统,该软件系统是在实践中逐渐升级、完善起来的,在全国几乎所有类型的盆地都进行了应用,取得了较好的应用效果。2016年4月该软件系统通过了中国石化科技部专家组的测试验收。在国家及中国石化“十三五”资评工作中,该系统作为统一的评价平台在中国石化12家油田得到了推广应用,至今已发出软件授权347套。在中国石化油气资源评价和勘探部署工作中发挥了重要作用。

张渝昌等^[5]在学习朱夏学术思想的基础上,根据朱夏先生研究盆地的系统工程理论,立足于盆地体系的活动论构造历史观,按照盆地形成的地史演化、动力作用方式、深部根源和全球联系等方面,归纳了中国地史演化过程中不同阶段原型盆地形成的构造环境、岩石圈组成的变化和成盆机制,尝试性地提出了盆地原型分类方案,探讨、总结了不同世代盆地的迭加和油气形成与分布的关系,编制了中国油气盆地构造系列图,表达了中国海陆演化阶段、运动体制和盆地形成的大地构造背景及其世代迭加关系,反映出盆地原型并列迭加控油的基本规律和独特风格,对全国油气勘探具有宏观意义。同时根据盆地原型系统与动态分析的观念,提出确定性的定量模拟原型并列与迭加对油气控制的综合方法和研究方向,建立起以埋藏史、热史、生烃史和运聚史为基本内容的盆地定量分析以及模式检验、揭示过程和预测功能的数值模拟系统,为科学地进行盆地油气评价奠定了基础。

孙肇才^[6]在朱夏学术思想的直接影响下,提出了一个作为含油气盆地评价系统的以“整体、动态、综合”和“定时、定性、定量”为内涵的研究思路。认为:(1)地质历史创造了许多不同类型的盆地;地质历史也破坏或改造了许多盆地;地质历史还隐藏了许多盆地(指巨大推覆体之下属原地前陆系统的,即孙肇才习称的“影子盆地”)。所谓盆

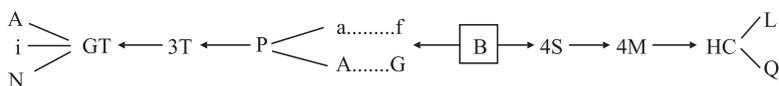


图1 朱夏提出的盆地系统(运动体制)的程式^[4]

程式左边代表全球构造体制(GT)在不同阶段(A.全球古构造;i.过渡阶段;N.新全球构造)所控制的三大要素(3T:time, tectonic setting, thermal regime)。在此制约下,盆地(B)有几种不同沉降机制形成的原型(P)在时空上组合而成的。由此,程式右列表达了盆地形成中各原型的地质作用(4S:subsidence, sedimentation, stress condition, style)及其并列迭加所控制的油气条件(4M:material, maturity, migration, maintenance)。通过所有这些因素、作用和条件的分析和综合,才能在具体油气勘查中,从盆地整体出发,循序渐进,预测油气资源(HC)的存在位置(L)和潜在数量(Q)。程式中,a...f代表古生代(包括过渡阶段)盆地原型,A...G代表中、新生代盆地原型。

Fig.1 Formula of a basin system (movement system) proposed by ZHU Xia

地的整体分析,即将盆地与造山带的研究结合起来,从宏观上分析盆地的演化;(2)世界上多数盆地,特别是位于亚洲东部的中国的盆地,几乎没有一个是“一张到底”或“一压到顶”的,多数是不同盆地原型(prototype)的迭加或并列,因而一定要有一个盆地演化的动态观念;(3)定性就是在对盆地进行几何学、运动学分析的基础上,从地球动力学原理出发,确定盆地形成的地球动力学原型;(4)定时就是从活动论和阶段论观点出发,研究盆地群体的历史演化系列,注意盆地演化阶段的有序性和盆地的反转改造特征;(5)定量就是要进行包含有风险、经济分析内容在内的盆地模拟及油(气)资源定量估算。

周祖翼等^[7-11]在朱夏先生指导下,长期从事中国东南部大陆边缘构造演化的研究。以朱夏先生“活动论构造历史观”作指导,提出把板块构造与地体构造结合起来进行研究可能是解决大陆边缘构造演化问题的一条有效途径。据此,深化了边缘海盆地形成机制的认识,提出中国东南及毗邻海区独特的大陆增生方式——转换断层向俯冲体系的转变,这种转变表明特提斯和古太平洋的演化对这一地区的中、新生代构造格局起着重要的制约作用。同时,提出了东南地区晚中生代岩浆活动机制的框架思路,推动了中国东南及邻区的地质研究及大陆边缘构造地质学的研究。

徐旭辉等^[12]以朱夏先生的“活动论构造历史观”和 TSM 盆地分析思想为指导,在“原型控源、迭加控藏”的研究思路指导下,提出了油气勘探区带和目标评价预测应遵循的原则和研究方法,概括为“3342”分析方法,即“3 个控制、3 个演化、4 个有效、2 个中心”。(1)3 个控制:区域大地构造对盆地形成及原型的控制、原型盆地对沉积实体的控制、沉积对油气成藏物质的控制。通过对这 3 个控制的研究,来落实油气勘探目标的生、储、盖特征及其组合方式;(2)3 个演化:就是烃源岩的热演化、储盖层的演化、运聚成藏的演化,这是运动体制下油气响应的主要研究内容;(3)4 个有效:烃源岩的有效性、储层的有效性、保存条件的有效性以及它们形成的成藏组合的有效性;(4)2 个中心:烃源和后期改造。无论对常规油气藏或非常规油气藏而言,烃源和后期改造是确定油气富集区带和目标的关键研究内容。

康玉柱等^[4, 13-14]在 90 年代,分别选择了塔里木、鄂尔多斯、四川、松辽、华北、苏北及下扬子、东海陆架和南海北部大陆边缘等 8 个大型盆地与地

区,根据大量实际资料和亲身实践的经验,结合盆地原型并列与迭加的观念,从不同层次、不同角度论证和解剖了各大盆地的原型及其并列迭加控油的规律,指出了油气勘查方向。

我本人深受朱夏先生从“活动论构造历史观”出发进行盆地原型并列迭加的 T(构造环境)—S(地质作用)—M(油气响应)的系统分析的学术思想影响,在继承与发展中主要做了 2 个方面的探索^[15-16]:

2.1 完善盆地波动定量分析方法

从波动地质学研究出发,落实盆地沉降及隆升剥蚀的形成过程,分析地质历史时期中盆地波动演化对油气生成、运移、聚集和成藏的控制作用。波动是物质运动的基本形式。20 世纪 80 年代末至 90 年代初,缪斯尼高娃、施比伊曼创立了应用沉积盆地地层记录信息来识别周期波的方法,即通过研究小区的选择,对每个研究小区的原始资料进行统计、建立地层年代格架、恢复原始厚度,最终建立波动方程并进行方程的拟合与平衡检验的波动分析方法。波动过程分析的工作方法于 1992 年引入中国。我们先后对黄骅坳陷、三水盆地、四川盆地、塔里木盆地开展了波动过程研究,在科学实践中使得研究方法得到不断完善,同时进一步探索出了一套适合中国沉积盆地特点的波动过程分析方法,如断块区原始资料的统计,火成岩、膏盐等特殊岩性的处理,原始厚度的恢复等。

例如,塔里木盆地经历了多旋回的发展演化,与之相应的是,在每一个大的旋回中都经历着油气的生排—运聚—调整的过程。波动地质学可以量化演化周期,预测每一个“成藏旋回”的有利油气赋存区,有效地指导勘探实践。对塔里木盆地沉积波动过程的分析认为,塔里木盆地的波动过程可以划分为震旦纪、寒武纪—泥盆纪、石炭纪—侏罗纪及白垩纪—现今 4 个一级周期,其持续时间分别为 230, 203, 221.4, 146.5 Ma,其中白垩纪—现今盆地演化过程大致经历一个完整过程的 3/4。在盆地沉积演化的整个过程中,又可分为若干个二级和三级周期。油气的生成、运移、聚集和演化的全过程实际上是发生在自寒武纪以来的三大周期内。一个完整的波动周期包括了盆地从持续沉降到隆升剥蚀的一个完整过程。相应地,对油气的生成、运移、聚集和保存就有深刻的影响,构成一个完整的成藏旋回。因此,白垩纪—现今的不到一个周期的波动过程内包含了一个不完整的油气成藏旋回,“不完整”并不是以油气藏的破坏作为其终结,而是在成

藏演化时间上没有经历一个完整的波动周期。

朱夏先生早在1984年就指出,含油气盆地作为地壳的一部分,受不同时期全球动力背景下多旋回运动的支配,呈现出演化的阶段性和发展的旋回性^[1]。继承朱夏先生这一思想,继续完善盆地波动定量分析方法,不仅有利于我们从更深、更广的角度来认识盆地的演化过程,同时对盆地发展过程中油气形成、演化、成藏以及后期改造等一系列问题的认识也是一个有力的补充,也将带来含油气盆地油气分布规律认识的升华。

2.2 创新油气成藏体系分析方法

含油气系统概念自诞生以来就引起石油地质工作者的高度关注。MAGOON等^[17]定义含油气系统为“包含一个有效烃源岩体和所有有关油气存在的天然系统,它包括了油气藏存在所必需的一切地质要素和作用”。在上世纪80年代,国内开始引入含油气系统概念,在实践中发现了一些非常突出的问题:

(1)含油气系统概念的提出只是机械地套用了“系统”概念。却对物理学中“系统”的三要素,即元素、结构及功能并没有很好地论述。对元素的描述也只是局限于地质概念上,而缺乏真正“系统”意义上的研究。

(2)对含油气系统的研究缺乏专门有效的方法,特别是对系统内部油气分布规律研究尤其薄弱。在实际研究过程中,对含油气系统概念的理解和应用往往过于简单化,因而不能有效地指导勘探实践。

(3)如果按照MAGOON定义的原则,一个含油气系统只能有一个烃源岩,那么中国大多数盆地的含油气系统将很难划分。中国盆地尤其是中西部盆地的特点是构造演化旋回多、烃源岩发育多、成藏期次多、破坏次数多,同时油源混源现象十分普遍,很难找到一个单油源含油气系统;中国东部盆地的特点则是岩相变化快、断裂发育、多套烃源岩互相连通,加之有时几个凹陷同时向一个构造高部位供油等,以强调单纯烃源岩的含油气系统划分将使含油气系统的划分范围过大,不利于指导油气勘探。

我在通读了路德维希·冯·贝塔朗菲1968年发表的《一般系统论的历史与现状》(俄文版)后,比较深刻地认识了系统论。按照系统论的定义并结合油气地质特点,我们提出油气成藏体系概念:油气成藏体系是地表以下油气成藏的自然体系,它包括了形成油气藏的一切必要元素(要素),如烃源体(含烃/流体)、疏导体和圈闭以及这些元素之间有效的配置结构。油气成藏体系必须具备这样

的结构,即能够产生任何单一元素所不具备的功能,形成油气藏。需要指出的是,油气成藏体系的内涵与MAGOON等含油气系统的内涵有所不同:

(1)在指导思想上,油气成藏体系将油气的成藏过程认定为一个自然系统,使用“元素—结构—功能”这一真正意义上的“系统”思想来进行石油地质研究,更有利于系统论思想与石油地质研究的紧密结合;

(2)在研究方法上,油气成藏体系研究强调了油源、输导体系和圈闭之间的相互关联、相互制约的“系统性”综合方法,其中更突出了具有纽带作用的输导体系研究;

(3)油气成藏体系概念具有普适性,既可以适用单烃源岩,也可以适用多烃源岩,既可以是一次性成藏,也可以是多次性成藏;

(4)油气成藏体系认为,一个油气藏只能归属于一个成藏体系。

继承朱夏先生“整体性、系统性”的学术思想,应用系统论的思想与分析方法,我们把构成油气成藏体系的3个基本元素[烃源体(含烃流体)、输导体、圈闭]的匹配和系统结构特征称为“位”。3个元素互相配置的油气藏为三位类型,还有二位类型(烃流体与圈闭)和一位类型(烃源岩中的油气藏)。再根据油源的多源或单源,进一步划分为“单源”和“多源”,最终建立了油气成藏体系的6种结构类型,即“单源一位、单源二位、单源三位、二源二位、二源三位、三源三位”。这样一种分类方案,对于正确认识我国叠合盆地多油源多期成藏具有一定的实际意义。例如,我们提出的“单源一位”油气藏类型,就是现在讲的页岩油气藏,但在当时并没有意识到。

3 石油地质学展望

当前,油气依然是国民经济发展的重要支柱,国家能源安全说到底还是油气供给安全。“立足国内,开拓海外”是解决我国油气安全问题的基本方针。加大勘探力度,获取更多储量,是确保油气安全的首要任务。

石油地质学发展已进入地球圈层相互作用与资源环境演化过程整合的时代,如朱夏先生所说“站在地球外看地球”,建立地球系统演化与油气资源形成之间的内在关系,揭示全球不同地质环境中油气分布规律,客观评价资源潜力,是当前面临的关键科学问题。这其中,需要解决4个全球性科学问题:一是全球大陆聚合裂解背景下盆—山耦

合、含油气盆地形成与演化机制,全球油气分布规律;二是含油气盆地沉积—成岩—改造过程与源—储—盖发育机制、动态演化及分布规律;三是地球各圈层相互作用及高温高压条件下物质和能量传输—转换动力学与油气生成—运移—聚集成藏及保存机制;四是深部流体参与下,有机无机相互作用与无机成因或复合成因甲烷气、氢气、氦气等成藏保存机理与分布规律。解决 4 个针对中国特殊地质特征的油气地质问题:一是海相克拉通盆地深层—超深层油气运聚保存机理与分布规律;二是中国陆相页岩油气富集主控因素与区带和甜点评价标准;三是环青藏高原油气盆地山盆耦合机理及天然气分布规律;四是太平洋板块俯冲与中国东部油气盆地形成演化耦合机制。

4 结语

新时代,石油勘探依旧面临着大量理论与实践的未知,石油地质学者与油气勘探者应该继续学习、继承和发展朱夏先生的“找油哲学”,正如朱夏先生在《朱夏论中国含油气盆地构造》自序中写道:“我觉得一个找油者不应该满足于已知事物的经验积累和归纳,更不能不防止找油思想的因袭和束缚。他的责任永远是面向未来,探索途径。”

谨以此文缅怀朱夏先生!

参考文献:

[1] 朱夏.朱夏论中国含油气盆地构造[M].北京:石油工业出版社,1986.
ZHU Xia.ZHU Xia's discussion on China's petroleum basin[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1986.

[2] 刘光鼎.序[M]//罗静,等.诗人地质学家朱夏.上海:同济大学出版社,2016:7-10.
LIU Guangding.Forword[M]//LUO Jing,et al.A biography of ZHU Xia,the poet and geologist.Shanghai:Tongji University Press,2016:7-10.

[3] 陈焕疆.大地构造学家、石油地质学家——朱夏[J].上海地质,1991(2):7-12.
CHEN Huanjiang.Geotectologist and petroleum geologist:ZHU Xia[J].Shanghai Geology,1991(2):7-12.

[4] 朱夏.试论古全球构造与古生代油气盆地[J].石油与天然气地质,1983,4(1):1-33.
ZHU Xia.Notes on ancient global tectonics and Paleozoic petroliferous basins[J].Oil & Gas Geology,1983,4(1):1-33.

[5] 张瀚昌,秦德余,蒋洪堪,等.中国含油气盆地原型分析[M].南京:南京大学出版社,1997.
ZHANG Yuchang,QIN Deyu,JIANG Hongkan,et al.Prototype hydrocarbon basin analysis of China[M].Nanjing:Nanjing University Press,1997.

[6] 孙肇才.板内形变与晚期成藏:孙肇才石油地质论文选[M].北

京:地质出版社,2003:70-103.
SUN Zhaocai.Intraplate deformation and late stage oil accumulation;SUN Zhaocai's paper selection on petroleum geology[M]. Geological Publishing House,Beijing,2003:70-103.

[7] 周祖翼,丁晓,廖宗廷,等.边缘海盆地的形成机制及其对中国东南地质研究的启示[J].地球科学进展,1997,12(1):7-14.
ZHOU Zuyi,DING Xiao,LIAO Zongting,et al.Formation of marginal basins and its implication to the tectonic evolution of Southeast China[J].Advance in Earth Sciences,1997,12(1):7-14.

[8] ZHOU Zuyi,LAO Qiuyuan,CHEN Huanjiang,et al.The early Mesozoic orogeny in Fujian,Southeast China[J]. Geological Society,Special Publication,1996(106):549-556.

[9] 廖宗廷,周祖翼,陈焕疆,等.试论中国东南地区大陆边缘构造演化的特征[J].石油实验地质,1994,16(3):234-241.
LIAO Zongting,ZHOU Zuyi,CHEN Huanjiang,et al.On the characteristics of tectonic evolution of SE China continental margin[J]. Experimental Petroleum Geology,1994,16(3):234-241.

[10] 周祖翼,廖宗廷,金性春,等.冲绳海槽—弧后背景下大陆张裂的最高阶段[J].海洋地质与第四纪地质,2001,21(1):51-55.
ZHOU Zuyi,LIAO Zongting,JIN Xingchun,et al.Okinawa trough: the highest stage of continental tension rifting in back-arc setting[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2001,21(1):51-55.

[11] 周祖翼.中国东南沿海及邻近海区一种独特的大陆增生方式:转换断层向俯冲体系的转变[J].上海地质,1992(1):5-11.
ZHOU Zuyi.Transition from transform fault to subduction system:a pattern of continental accretion in south-east China and its adjacent areas[J].Shanghai Geology,1992(1):5-11.

[12] 徐旭辉,高长林,江兴歌,等.中国含油气盆地动态分析概论[M].北京:石油工业出版社,2009.
XU Xuhui,GAO Changlin,JIANG Xingge,et al.Dynamic analysis of petroliferous basin in China[M].Beijing:Petroleum Industry Press,2009.

[13] 陈焕疆,景学立,张锡南,等.东海北部及相邻地区的构造区划[J].海洋地质与第四纪地质,1992,12(2):13-19.
CHEN Huanjiang,JING Xueli,ZHANG Xinan,et al.Tectonic subdivision of north part of East China Sea and adjacent areas[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,1992,12(2):13-19.

[14] 陈焕疆.南方海相地层加强油气勘探的任务、环节和目标[J].南方油气地质,1995,1(2):4-5.
CHEN Huanjiang.South China's petroleum exploration:task,link and targets[J].South China Petroleum Geology,1995,1(2):4-5.

[15] 金之钧,吕修祥,王毅,等.塔里木盆地波动过程及其控油规律[M].北京:石油工业出版社,2003.
JIN Zhijun,LÜXiuxiang,WANG Yi,et al.Wave process and its rules of controlling hydrocarbon in the Tarim Basin[M].Beijing:Petroleum Industry Press,2003.

[16] 金之钧,张一伟,王捷,等.油气成藏机理与分布规律[M].北京:石油工业出版社,2003.
JIN Zhijun,ZHANG Yiwei,WANG Jie,et al.Hydrocarbon accumulation mechanism and oil-gas distribution[M].Beijing: Petroleum Industry Press,2003.

[17] MAGOON L B.Petroleum system;status of research and methods[J]. USGS Bulletin,1992,20(7):98.