

海侵事件

与海侵成煤机制研究

李增学 魏久传 余继峰 等著

地质出版社

海侵事件与海侵 成煤机制研究

李增学 魏久传 余继峰 韩美莲 著
刘海燕 吕大炜 刘莹

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书对海侵“事件成煤”的作用特点、机制与聚煤模式进行了研究,从理论上阐明了大型陆表海盆地的聚煤作用过程及规律,丰富了成煤作用理论与模式。主要内容有:海侵沉积序列与海退沉积序列、海侵事件及背景分析、成煤作用理论及面临的挑战、海侵过程成煤理论与模式、海侵事件成煤机制、海侵成煤与层序地层学、含煤地层天文周期与旋回、海侵事件与成煤沉积体系和风暴事件性海侵及风暴异地煤等。

本书可作为从事能源地质、盆地分析、成矿地质研究及地学科研人员和生产技术人员参考书,也可作为高等院校高年级学生及研究生等的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

海侵事件与海侵成煤机制研究/李增学等著. —北京:地质出版社, 2010. 4

ISBN 978 7-116-06630-4

I. ①海… II. ①李… III. ①海侵-煤矿-成矿作用-研究 IV. ①P618.11②P512.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 061712 号

责任编辑:宫月霞 孙亚芸

责任编辑:李 政

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324569 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zhs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:787 mm × 1092 mm ¹/₁₆

印 张:14.25

字 数:345 千字

版 次:2010 年 4 月北京第 1 版·第 1 次印刷

审 图 号:GS (2010) 222 号

定 价:42.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-06630-4

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

18 世纪莱伊尔 (Lyell) 等以地球构造旋回解释海水进退的观点对后来海平面变化研究起着深远的影响, 18 世纪中期以后, 很多学者对第四纪后期的相对海平面变化进行了研究。

19 世纪末到 20 世纪初 Suess 的构造与充填海平面变化、Deli 的冰川海平面、Chamblin 的灾变海平面、Grabau 的全球海平面等假说标志着关于全球海平面变化的认识日趋成熟。20 世纪 60~70 年代, 海平面变化成因研究升华到了一个新的高度, 提出了海平面振荡、水均衡、负荷模式、重力模式、洋脊扩张模式、全球海平面升降及地震海平面曲线概念等。20 世纪 70 年代末至今, 海平面变化研究进入了一个新的历史时期, 除了在上述理论基础上补充发展外, 在以下方面取得了重大进展: 层序地层学与海平面变化; 全球海平面变化升降曲线样板; 构造、全球海平面及沉积作用三位一体; 活动构造背景下的海平面变化样式; 天外撞击事件引起的全球海平面变化; 海平面变化与古气候; 海平面升降幅度的定量测定及海平面曲线模拟; 与米兰柯维奇有关的高频海平面变化机制; 海平面变化的稳定同位素及微量元素效应; 海平面变化对沉积盆地充填的影响及控矿作用等。这一时期出版的专著及大量的相关研究文献充分说明了海平面变化的研究成果, 其理论之深入、内容之丰富、范围之广泛足以反映海平面变化研究是 20 世纪 80、90 年代地质学领域的一大热门学科和综合学科。

《海侵事件与海侵成煤机制研究》一书是作者在前人对海平面变化及其对沉积充填沉积控制、影响及成矿作用研究的基础上, 针对海平面变化对成煤作用的控制作用, 进行了深入的探索, 特别是详细研究了晚古生代中国北方陆表海盆地海平面的变化特点、海侵的事件性、海侵煤层的形成与分布, 提出了具有创新意义的研究成果。该书由 11 章组成, 主要内容有: 海侵沉积序列与海退沉积序列、海侵事件及背景分析、成煤作用理论及面临的挑战、海侵过程成煤理论与模式、海侵事件成煤机制、海侵成煤与层序地层学、含煤地层天文周期与旋回、海侵事件与成煤沉积体系、风暴事件性海侵及风暴异地煤等。需要指出的是, 概述首次全面地论述了海侵“事件成煤”的作用特点、机制与聚煤模式, 从理论上阐明了大型陆表海盆地聚煤作用的过程及其规律, 丰富了煤地质学的成煤作用理论与模式, 提出的“海侵事件成煤作用”理论与模式居国际领先地位。根据该理论和模式进行了聚煤盆地煤的聚积规律研究和资源评价, 收到了良好的效果。如对山东及邻区煤田勘探及中国东部深部煤田资源的评价, 获得了山东省和中国煤炭工业协会等的科技进步奖。

该书是作者多年来深入进行聚煤盆地分析、煤聚积规律和煤沉积学分析, 以及成煤作用机制研究的成果, 是作者多年从事煤地质和沉积地质研究的结晶。相信该书的出版对沉积学和煤地质学领域是一个贡献, 对指导今后聚煤盆地煤炭资源勘探、开发与资源评价具有指导作用。

刘宝珺

2010 年 3 月 20 日

前 言

在世界范围内,能源问题已经变得越来越紧迫,能源安全已经成为各国政府所关注的重大国家安全问题,我国更是如此。如何进行聚煤盆地和含煤地层的层序地层学研究,是摆在煤地质工作者面前的一个新的科学难题,层序地层学能否解决煤地质学的科学问题、能否在含煤地层层序地层学理论和模式指导下发现新的含煤区、能否在新的成煤作用理论指导下发现新的成煤作用类型、能否在汲取相关学科的理论后更科学地评价和发现新的煤炭资源,是所有能源地质工作者关心的问题,也是本课题组关注的煤地质学问题。

本书为作者多年从事聚煤盆地分析、层序地层分析与成煤作用机制分析的成果。近年来课题组承担了如下科研项目:国家自然科学基金项目“大型陆表海盆地东南缘沉积充填及海侵成煤机制(No. 49872057)”、国家自然科学基金项目“大型盆地坡折带精细地质单元及优质煤炭聚积作用(No. 40742010)”、煤炭科学基金项目“山东-两淮煤田二叠系高频层序划分(No. 9710507)”、山东省自然科学基金项目“山东中新生代沉积地层层序地层及成矿规律研究(No. Q94E0432)”、国家重大基础项目(973)专题“多种能源矿产共存富集形式及地球物理识别标志(No. 2003CB214608)”、教育部博士点基金项目“海侵事件与海侵成煤机制研究(No. 20050424001)”等。如何立足于我国聚煤盆地的特点,提出我国聚煤盆地的层序地层模式、提出新的成煤理论或模式,是本书作者的宗旨和要解决的重要科学问题。因此,在上述基金支持下,系统地探讨煤聚积作用过程中的各种作用、研究特殊条件下成煤作用的机制,尤其是全面开展大型聚煤盆地成煤作用机制与模式的研究,以期获得突破,是课题组的研究目标。

通过详细解剖中国北方大型聚煤盆地(特别是陆表海盆地)的聚煤作用特点,发现大型聚煤盆地存在多种聚煤作用形式。在层序地层格架内既有高位体系域成煤,也有海侵体系域成煤。对于华北晚古生代大型陆表海聚煤盆地来说,其特殊的背景和特殊的古地理条件必然孕育了特殊的聚煤作用模式。多年来煤田地质工作者进行了不懈的探索,提出了不少关于华北大型聚煤盆地的成煤作用模式或观点,对于丰富煤地质学的基础理论是非常有益的。

编写出版本书是展示作者进行聚煤盆地研究的最新成果,为完善和发展煤地质学基础理论,为煤炭资源预测、评价做些微薄贡献。需要指出的是,本著作所论述的“海侵事件成煤作用和模式”是一种新的聚煤作用模式,它是大型聚煤盆地聚煤作用类型之一,而不是全部。

本书主要内容有海侵沉积序列与海退沉积序列、海侵事件及背景分析、成煤作用理论及面临的挑战、海侵过程成煤理论与模式、海侵事件成煤机制、海侵成煤与层序地层学、含煤地层天文周期与旋回、海侵事件与成煤沉积体系和风暴事件性海侵及风暴异地煤等。

本书由11章组成。编写分工:前言、第1、2、6、8章由李增学编写;第4、5章由余继峰编写;第3章由魏久传编写;第7章由韩美莲编写;第9章由刘海燕、刘莹编写;

第10章由吕大炜编写；第11章由刘莹、刘海燕编写。全书由李增学、魏久传和余继峰统编定稿。

在项目研究工作中，得到了中国煤炭地质总局、山东省煤田地质局、安徽省煤田地质局、中石化胜利油田分公司和中原油田分公司、中石化勘探开发研究院、中煤第一勘探局、中煤水文局、山东省地质矿产开发局、兖州矿业集团公司、新汶矿业集团公司等单位的帮助和支持。在本书编写过程中山东科技大学、中国矿业大学、中国石油大学（华东）及其他煤炭院校的有关领导和同行给予了大力支持。特别是刘宝珺院士在百忙之中给予了关怀、指导和支持。金秀昆、兰恒星、刘大永、张德强、于林平、李江涛、柳汉丰、张素梅、崔训才、王怀洪、王玉林、宫海捷、张晖、孙晓华、孙厚敏、魏欣伟、刘晓丽、马收先、宋洪柱、徐本燕、陈丽、王东东、王林涛、宫萍萍、刘彬彬、孟兆磊、明洁、刘娟、刁玉杰、黄涛、马飞宙、龚伟、袁学旭、付文钊等同志参加了部分研究工作，王芳、尚鲁宁、尹玉静、贾强、马明永、白通等同志参加了资料整理等工作。在此一并表示衷心的感谢！

由于作者水平所限，书中存在问题在所难免，敬请读者批评指正！

作 者

2010.01

目 录

序

前 言

1 海侵沉积序列与海退沉积序列	(1)
1.1 海平面升降	(1)
1.2 海侵与海退沉积	(10)
1.3 沉积旋回与旋回层序	(14)
2 海侵事件及背景分析	(24)
2.1 海侵事件及沉积特征	(24)
2.2 海侵事件发生的盆地背景分析	(28)
2.3 海侵事件与成矿作用	(36)
3 含煤盆地与含煤地层	(38)
3.1 含煤盆地类型概述	(38)
3.2 含煤地层主要沉积类型	(45)
3.3 近海聚煤盆地与海平面变化的影响	(58)
3.4 海侵沉积与含煤地层分布	(62)
4 晚古生代地层的旋回性特点与事件沉积	(67)
4.1 沉积旋回与沉积环境	(67)
4.2 事件沉积	(77)
5 米氏旋回地层研究	(88)
5.1 米兰柯维奇旋回理论	(88)
5.2 米氏古气候旋回的识别	(94)
6 成煤作用理论及其面临的挑战	(108)
6.1 含煤盆地与成煤作用理论	(108)
6.2 煤层沉积学研究	(113)
6.3 聚煤沉积环境	(114)
7 海侵过程成煤理论与模式	(120)
7.1 海侵过程成煤作用的提出	(120)
7.2 海侵过程成煤机制	(121)

7.3 海侵过程成煤模式与盆地背景	(126)
8 海侵事件成煤机制	(129)
8.1 海侵事件沉积标志	(129)
8.2 海侵事件发生的盆地背景	(140)
8.3 海侵事件成煤机制	(141)
9 海侵成煤与层序地层学	(148)
9.1 含煤地层层序序列特征	(148)
9.2 煤层及其顶底沉积旋回特征	(166)
9.3 海侵煤层与层序界面	(169)
10 海侵事件与成煤沉积体系	(172)
10.1 近海成煤沉积体系类型	(172)
10.2 事件性煤聚积特征与规律	(172)
11 风暴事件性海侵及风暴异地煤	(192)
11.1 含煤地层中的风暴沉积序列	(192)
11.2 风暴煤沉积的环境解释	(204)
11.3 风暴异地煤的分布	(205)
参考文献	(209)

1 海侵沉积序列与海退沉积序列

1.1 海平面升降

人类真正对海平面变化的研究始于17世纪。当时,“水成说”者提出地球上的各种岩石是海平面在逐渐下降的过程中不同阶段的产物,19世纪莱伊尔等以地球构造旋回解释海水进退的观点对后来海平面变化的研究有着深远的影响,19世纪中期以后,很多学者对第四纪后期的相对海平面变化进行了研究。18世纪Lyell、Runeberg、Frisi、Tellamed的有关海平面的概念及成因假说对后期研究有着深远影响。1765年,兰尼伯尔格(E. Runeberg)提出相对海平面下降是一种地壳运动的效应;1785年,弗里西(D. E. Frisi)利用地球自转速度的增减解释海平面上升与下降。19世纪初,研究者开始注意全球性海平面的变化,并注意到冰川作用对海平面的影响。休斯(E. Suess)在《地球的海洋》中提出由于构造作用和填积作用改变了洋盆的容积,引起全球性海平面的变化。20世纪初,戴利(R. A. Deli)出版了《冰川时代变化的地球》,系统地总结了冰川均衡作用和冰川型海平面升降原理,标志着冰川型全球海平面升降理论的成熟。从20世纪30年代到50年代初,以大量的野外调查和资料整理为主,为现代海平面变化研究奠定了基础。

19世纪末到20世纪初Suess的构造与充填海平面变化、Deli的冰川海平面、Chamblin的灾变海平面、Grabau的全球海平面等假说标志着关于全球海平面变化的认识日趋成熟。20世纪60~70年代,在前期大量实际工作的基础上,海平面变化成因研究上升到了一个新的高度,提出了海平面振荡、水均衡、负荷模式、重力模式、洋脊扩张模式、全球海平面升降及地震海平面曲线概念等等。70年代末至今,海平面变化研究进入了一个新的历史时期,除了在上述理论基础上有所补充发展外,在以下方面取得了重大进展:①层序地层学与海平面变化;②全球海平面变化升降曲线样板;③构造、全球海平面及沉积作用三位一体;④活动构造背景下的海平面变化样式;⑤天外撞击事件引起的全球海平面变化;⑥海平面变化与古气候;⑦海平面升降幅度的定量测定及海平面曲线模拟;⑧与米兰柯维奇有关的高频海平面变化机制;⑨海平面变化的稳定同位素及微量元素效应;⑩海平面变化对沉积盆地充填的影响及控矿作用等。这一时期出版的专著及大量的相关研究文献充分说明了海平面变化的研究成果,其理论之深入、内容之丰富、范围之广泛足以反映海平面变化研究是20世纪80~90年代地质学领域的一大热门学科和综合学科。我国对海平面变化的研究起步较晚,80年代末至90年代初仅有少量综述和编译性文章,其后才陆续有一些研究实例。这一时期,《岩相古地理》、《地球科学》等专业杂志刊载了较多的相关论文,对海平面变化研究做出了重要贡献。综合起来,我国在这方面的研究涉及4个方面:①层序地层与海平面变化;②海平面变化的稳定同位素响应;③生态地层与海平面变化;④复合海平面与高频海平面变化。显然,与国外相比,国内研究的广度和深度都存在着较

大的差距。

1.1.1 海退

海侵、海退是地质学中的古老概念，但高分辨率层序地层学又赋予其新的涵义，如强制海退（加积强制海退、非加积强制海退）等。

1.1.1.1 强制海退

与相对海平面下降相关的海退或海岸线海侵-海退旋回中包含有相对海平面下降事件的海退称为强制海退（forced regression）（Nummedal 等，1993）。当海岸线处发生相对海平面下降时，即出现强制海退。海岸线不受沉积物供给的影响，它呈倾斜状向陆或向海位移（Helland-Hansen 等，1994）。强制海退包括非加积强制海退和加积强制海退。

在相对海平面下降的背景下，无沉积物供给或缺乏容纳空间均可造成强制海退（Helland-Hansen，1994，1996）（图 1.1）。通常，海岸线沿着无沉积物供给的延伸方向不断向滩面迁移，随着海岸线-盆地水深剖面上部的暴露，出现抬升的海岸线。由于沉积物受沟蚀和浪蚀作用的影响，在持续下降的海平面形成滩脊，若沉积物供给非常微弱，此期间海

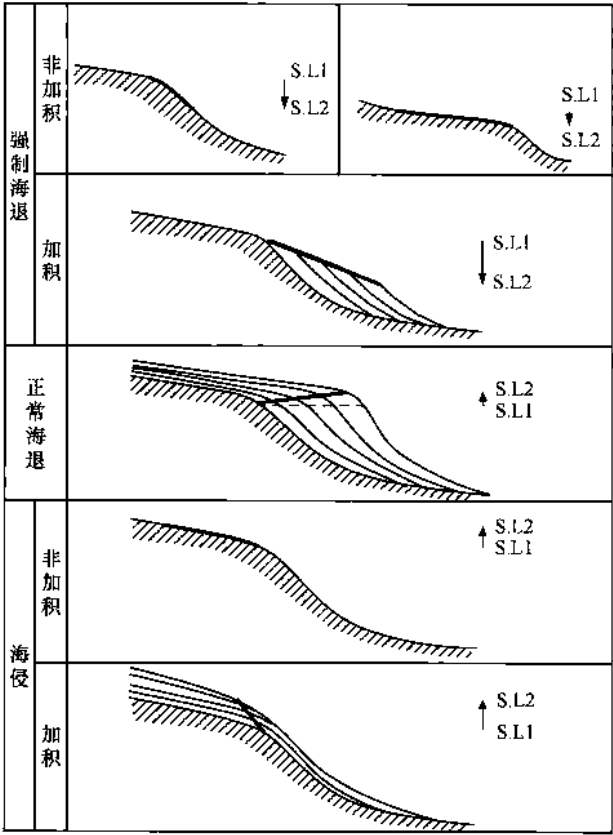


图 1.1 海岸线轨迹成因类型
(据 Helland-Hansen，1996)
粗黑线处代表海岸线轨迹
S.L.1—初始海平面位置；S.L.2—下降后海平面位置

平面继续下降,可造成同一剖面下部暴露,从而使海岸线较快速地向海盆位移。由于海平面下降引起的水平或近水平面暴露,就可产生非加积强制海退(nonaccretionary forced regression)(Hunt 等,1992)。在相对海平面下降期间,沉积作用彻底地向盆底迁移,当向海盆推进的海岸线达到陡面且伴有海平面下降时,在海岸线处发生非加积强制海退。尽管随着海岸线不断向盆地方向位移,沉积作用不断向下斜坡迁移,但进积作用不可能持续很长时间。

在沉积物供给丰富的区域,随着相对海平面下降,海岸线逐渐向盆地迁移则出现加积强制海退(accretionary forced regression)(Hunt 等,1996)。在相对海平面下降期间,陆相沉积搬运可能局限于大型切蚀河谷,并终止于进入汇水盆地的离散点源(Hunt 等,1992)。由于切蚀性质使河谷侧向迁移能力受限,其结果是导致海平面下降期间沉积物载荷和向盆地沉积物总量增加,进而造成局部高的沉积物供给速率。若近岸流能量足够高,则部分沉积物在沿岸带发生再分配,使大范围海岸线受加积强制海退的影响。

由于深切谷轴向沉积物的侧向搬运速率的影响,初始为饥饿沉积物占据的部分海岸线,后期可容纳大量沉积物。强制海退区域中加积和非加积交替通常造成向盆地进积的沉积构架。Nummedal 等(1993)认为,加积强制海退通常造成向盆地变深、向盆地变浅和变浅-变深3种成因序列。

1.1.1.2 正常海退

在海平面相对稳定或上升期间,当沉积物供给速率大于海岸线处可容纳空间的增长速率时,发生正常海退(normal regression),其结果使海岸线向海盆呈水平或倾斜方向迁移。有关现代和古代正常海退序列的实例很多,最典型的是形成向上变粗和向上变浅的序列。这种序列是滨面潟湖沉积产物,这暗示了进积期间某种程度的地层爬升现象。在海平面上升造成滨岸可容纳空间增加期间,海退可造成陆相沉积净的加积作用所需的空間。此期间分流体系较为活跃,而且较强制海退而言,正常海退更易发生侧向迁移。通常情况下,海平面上升时期,沿海岸线的进积速率稍低于海平面下降期,因为容纳空间是增加了而不是减小,从而可提供更大的容纳空间。

在海平面相对稳定期间,进积作用通常造成厚度与水深度相当的沉积序列。若进积作用发生于浪基面以上的浅水环境,则滨面砂岩与下伏粉砂岩和页岩呈突变关系,为一种形成于相对海平面下降期间的海蚀面的地层响应。在具微小坡度的海岸爬升和进积期间,相对海平面上升可形成明显扩大的剖面。Cant(1991)进行过计算,低于 30° 的海岸线轨迹爬升将产生相当于正常序列双倍厚度的沉积序列。

如果假设盆底是水平的,那么随着相对海平面的上升,海岸线向盆方向水深增加,如缓坡环境的逐渐变深和陆棚环境水体突然变深,因而均叠加了水体变深的沉积响应。盆地过多的沉积物供给,导致形成过陡的面,并伴随块体-重力流过程使沉积中心向盆地迁移。在陆棚-斜坡-盆地背景中,陆棚边缘通常出现过陡现象,若陆棚狭窄,则海岸线达到陆棚边缘的可能性增加。

1.1.2 海侵

当海岸线处容纳空间增长速率大于沉积物堆积速率时,则发生海侵,最终造成海岸线向陆迁移。海侵侵蚀、改造再作用面,将上覆滨面和陆棚沉积物与下伏沉积物分开,这个

向陆的迁移面称为切蚀面，其成因与后退滨面波浪作用有关。

平衡剖面反映滨面后退的全过程。在具干涉海侵的非平衡的海平面静止期间，通常缺失海侵改造的证据，表明海侵过程极其迅速。因为盆地浪能非常低，因而不利于切蚀面的发育。根据海岸线轨迹与冲积沉积面重合还是存在差异，海侵可划分为非加积海侵和加积海侵两种类型（图 1.1）。

非加积海侵（non-accretionary transgression）揭示这样一种现象，即后退海岸线轨迹与海侵波及处海岸线向陆迁移造成的陆上面密切相关。因而相迁移的总角度取决于海侵面的坡度。非加积海侵期间海岸线向陆一侧不产生可容纳空间，但在海侵初期可能曾经出现过可容纳空间。

低坡度、高海平面的上升速率和低沉积物的供给速率有利于非加积海侵的发生，因此，可容纳空间产生的速率明显高于沉积物供给速率。虽然沉积物不断地向河口搬运，但這些沉积物大多保存于海侵早期海岸线后的水体中，或沉积于后退滨面侵蚀海岸线后侧，或引起局部区域或部位的堆积现象。海侵海岸线造成的地层记录一般很薄，并以非加积为特征。

随着海侵的发生，由于海岸线向陆一侧有沉积物供给响应，通常发生地层向上和向陆爬升的现象，因而海岸线轨迹向冲积沉积面偏离，这就造成加积海侵（accretionary transgression）。在后退海岸线向陆一侧，可容纳空间持续产生并不断被充填。如果海岸线位移角度大于加积海侵的滨面剖面，从理论上讲，应产生总体向上变深、变细、保存完整的沉积相序。若海岸线轨迹坡度低于滨面剖面，那么在后退海岸线沉积物中就发育切蚀面。切蚀面向陆或向上呈穿时方式推进，从而导致其下部海侵沉积部分较上覆沉积物年轻。

先期海平面下降形成的深切谷通常发育加积海侵，而非加积海侵则跨决口扇地区。河谷海侵体系中向陆一侧高的沉积物供给速率有利于加积的发生，潮坪进一步扩大可导致河口湾沉积环境发育。加积海侵期间沉积物保存潜力部分取决于滨面侵蚀深度、沉积物与拍岸浪间的距离，以及海岸线轨迹坡度。与此相似，在潮控背景下，关键的因素是潮道侵蚀深度而不是滨面波浪。

Holland-Hansen 等（1994，1996）提出了相对陡倾海岸线轨迹的概念性模型，该模型将盆底块体-重力沉积与加积海侵联系在一起，而且适用于沉积物供给过剩和深水汇水盆地相对海平面上升的环境，尤其适用于正常海退造成的过陡斜坡和下斜块体-重力流沉积物搬运。随着海岸线坡度接近最稳定的海岸线-盆地斜坡坡度，相对海平面持续上升，从而发生加积海侵成因序列。

1.1.3 古生代海平面升降机制

人们认为，海面的升降是引起海进、海退事件的原因，海面的升降变动，是海水量、水圈运动、地壳运动和地球形态变化的综合反映，是地球演化的一个重要方面。海水时刻在运动，海平面也不断地在变动。这种变动有短期的，如日变动、季节性变动、年变动和偶发性变动等，主要与波浪、潮汐、大气压、海水温度、盐度、风暴和海啸等因素有关，其升降幅度小，且常是局部的；也有长期的，即地质历史期间的海平面变动，其变动幅度大，是大区域性的，甚至是全球性的。长期海平面变动引起的最直接后果是海侵或海退，导致海岸线移动、海陆变迁，对大陆架和海岸地貌、浅海与近岸沉积和矿产的基本特征产

生很大影响,使海岸工程、港湾建筑遭受侵袭或废弃,河道由于基准面变化或淤或冲。因此,研究海平面变化规律,预测其发展趋势,对研究华北上古生界地质、构造运动、探索气候变化规律以及对于能源勘探都极为重要。引起海平面变化的原因较多,如冰川、板块构造运动、海水密度变化、气候、潮汐作用及局部构造运动等,目前普遍认为引起全球性海平面变化的主要原因是冰川作用、海底扩张和地球在银河系中位置的变化等。地球在银河系中位置的周期性变化是引起最大一级海平面变化的主要原因。

在总的沉积类型和海进、海退事件之间的唯一直接关系是:在碳酸盐岩发育少的时期,海进、海退的发生较为频繁,如在纳缪尔阶和晚石炭世初期;而在碳酸盐岩发育多的时期,海进则没有推进到克拉通陆架上。这些关系表明:富含碎屑物的沉积时期,也就是总的海平面较低、温度较低的时期。因此,冈瓦纳的中石炭世一早二叠世冰川可能是引起当时平均海平面较低的几个因素之一。

对于较小的次级旋回,一般认为有2~3种形成机制。其总的海平面变化,可能是由于冰川作用或气候变化造成(Wanfess等,1936; Heckel, 1986);也可能是由于分流和分流河道之间沉积相沿岸线侧向移动造成(Beerbower, 1964)。与第二种机制密切相关的是由于气候、地形的变化而造成碎屑含量的变化和河流排放量的变化。地形变化是由于局部和区域性造山或准造山运动造成的,也就是大地构造活动,这些活动影响到了整个欧美克拉通。

古海平面变化的影响因素很多,存在着构造运动、冰川消融、大地水准面-海平面变动、水压均衡作用、冰川均衡作用和流变均衡作用等多种原因的解釋(Wanfess和Shepard, 1936; Heckel, 1986; Wilgus, 1991)。一般认为,引起海平面变化的机理有两种,即区域性构造作用和全球海平面升降,此外,三角洲的快速进积和分流河道的侵蚀作用也是值得考虑的因素(Wagoner等, 1990), Pitman和Golovchenko (1983)提出只有冰川导致的海平面升降可出现快速的海平面变化。华北含煤盆地海平面升降变化的原因,主要是盆地周缘板块间相互作用及盆地内自身构造作用所致,由于全球晚石炭世和早二叠世板块运动和海底扩张很快,在冈瓦纳和安加拉古陆的部分地区有冰川覆盖,冰川作用或气候变化造成高频海平面变化。

1.1.3.1 冰川-海平面变动

冰川-海平面变动产生了高频层序地层单元。冰川型海平面升降理论提出之后,从20世纪50年代起开始了对各地史时期海平面变化的研究。D. G. Smith (1981)总结了20亿年来的7次大冰期,而从7亿年前至现在共发生了4次大冰期,这4次大冰期恰好与地史时期较大的海平面下降期相对应。E. J. Anderson (1983)的计算表明,现在南极大陆冰体如果全部融化,将使全球海平面上升40~50 m;就第四纪来说,更新世冰川鼎盛时期,全球海平面下降了近100 m (S. P. Ponovan等, 1979)。由此可见,冰川对海平面变化的影响是明显的。在气候寒冷的地质时期,极地周围形成冰盖,海洋中的海水量减少,海平面降低。当气候转暖,冰盖融化,冰水流回大洋,海平面升高。晚古生代全球被冰川覆盖,由于气候的影响,冰川发生融化,流入大洋,引起了三级海平面的升高。石炭-二叠纪是全球冰川发育的重要时期,据A. L. Coe (2003)研究,全球石炭纪气候整体变冷,至早二叠世气候变暖,冷暖气候温差较大,因此,冰川对海平面变化的影响很大,具备海侵平面周期性发育的条件。根据对华北地区海平面变化周期及级次与高频层序地层格架的研

究，可以发现，高频海平面变化是冰融-海平面升降机制引起的，高频层序单元界面的形成是由于冰盖消融使盆地水体急剧加深所致，或者由于冰盖生长导致盆地覆水较浅、盆地干枯淤浅而致。更小级别的变化是潮汐流的周期性变化。现今，许多人做了冰雪融化对海平面变化影响的研究（表 1.1），如南极冰盖和格陵兰冰盖固结着地球表面大约 99% 的淡水资源，如果它们全部融化将使全球的海平面上升约 70 m，即使是一小部分融化也会对海平面带来巨大的影响。由于格陵兰岛和南极大陆具有不同的海陆分布状况和地形特征，冰盖的消融特征也不相同，在南极大陆上冰盖的消融主要通过冰架底部融化和冰山的脱离进行，冰盖表面的融化十分微弱；而格陵兰岛冰盖物质的损失则主要是通过表层融化和冰山崩解进行。通过对格陵兰冰盖的研究发现，在 2km 的高海拔地区冰盖物质的积累和消融几乎是平衡的；但冰盖的南部、东部地区在变薄，而西部地区在增厚。西部增厚是长期冰川动力活动而不是冰雪积累率的变化造成的，冰盖的整体仍是在消融。最近观测到沿海地区特别是沿冰川出海的通道地区冰层在变薄，其消融体积大约是 $51 \text{ km}^3/\text{a}$ ，可使海平面升高 0.13 mm/a 。南极地区地域范围大，纬度高，气候条件恶劣，对其物质平衡的估算十分困难，只能在有限的几个区域进行。高度变化的测量也只在冰盖边缘开展。Rignot 等对 33 个南极冰川（包括 25 ~ 30 个较大冰川）的物质平衡进行了估计，得出在西南极大陆物质损失大约为 $48 \pm 14 \text{ km}^3/\text{a}$ ，而在东南极大陆物质净增 $22 \pm 23 \text{ km}^3/\text{a}$ ；相应使海平面变化 $0.16 \pm 0.05 \text{ mm/a}$ 和 $0.06 \pm 0.06 \text{ mm/a}$ 。西南极地区的物质损失主要是由于在阿蒙森海湾的几个扇形冰架底部的融化。Rignot 认为，西南极冰盖的融化速度在过去几年加快了，冰架的厚度在变薄。最近的观察指出，在过去 10 年里冰盖物质变化导致海平面上升了 $0.3 \pm 0.1 \text{ mm/a}$ 。在 2005 年，Davis 等利用卫星雷达测量，认为在 81.6°S 以北的东南极冰盖每年物质净增 $(45 \pm 7) \times 10^{10} \text{ t}$ ，相应使海平面下降 $0.12 \pm 0.02 \text{ mm/a}$ 。

表 1.1 目前冰雪圈融化对海平面的影响

类型	分布地区	海平面变化 ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	误差 ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	备 注
山岳 冰川	阿拉斯加	0.27	± 0.1	对阿拉斯加冰川的重新估算
	北半球冰川	0.27	N/A	从 260 个冰川研究中推算出（40 年冰川融化的数据）
	巴塔哥尼亚	0.1	± 0.01	对巴塔哥尼亚近 30 年的研究分析
冰盖	格陵兰南极	0.13	N/A	冰盖边缘地区物质平衡分析得出
		0.3	± 0.1	南极冰盖物质平衡分析得出
		-0.12	± 0.02	东南极冰盖物质平衡分析

注：N/A 表示数据缺失；负值代表海平面下降；正值表示海平面上升。

（据吴涛等，2006）

1.1.3.2 构造-海平面变动

构造-海平面变动引起了低频层序地层的叠加，产生了长周期海平面变化。因构造而引起的海平面变动有的是全球性的，有的是局部地区性的。引起全球性海平面升降变动的构造作用是洋盆容积的变化、洋底下沉或新洋盆形成。通常在大陆分裂阶段，大洋中脊扩展中心长度的增加或者海底扩张速度的增大都将使洋盆的体积缩减。这是因为炙热的岩浆

不断上升引起岩石圈沿着大洋中脊上隆，再加上大洋盆地体积的减小，造成海水淹没了大陆边缘。相反，在大陆碰撞阶段，造山带（山体）前缘将会使新形成的陆地所占据的区域减小（与形成这个陆地的两个旧的大陆板块有关）。这将会使洋盆的体积增大，引起海平面下降。另外，大陆壳的增厚或变薄将会引起海岸区域增高的变化。世界洋盆的总容积增大，导致海平面降低。相反，洋底抬升，某些洋盆消失，可使海平面升高。板块构造学说认为，海平面变动与海底扩张速率有关。大洋中脊上增生的物质是热的，随着时间的推移逐渐冷却，变得致密，因而洋底岩石圈在横向扩张移动过程中随时间而下沉。如果海底扩张速率很快，距中脊顶部一定距离的洋底没有足够时间以冷却到“正常”程度，洋底就比正常情况下高，因而即使海水量不变，由于洋盆容积减小，海面也会升高。相反，则海底扩张速率很慢，海面降低。海底扩张速率变化引起的海平面变动，周期长达数百万年，变化幅度可达 300 ~ 500 m。长周期海平面变化除了因泛大陆生长、洋脊增生、海底扩张乃至全球性构造运动造成洋盆容积变化外，区域地壳沉降、板内应力变化等也是长周期海平面变化的主要因素。局部性的地壳升降运动，引起区域性的海平面变动。这种变动不是海平面与地心之间的距离变化，而是由于地壳升降，导致海面相对于陆面之间的距离发生变化。这种变动往往叠加在全球性海平面变动之上。

1.1.3.3 洋脊扩张速率的变化

地球上大洋底部海岭体系的体积有 $1.6 \times 10^8 \text{ km}^3$ ，占全部海水体积（ $1.37 \times 100^9 \text{ km}^3$ ）的九分之一，因此海岭系统的改变对海平面升降的影响是巨大的。首先注意到这个问题的是哈拉姆（A. Hallam, 1963）。他提出海岭垂直运动对海平面波动的影响。由于板块扩张，地幔物质从洋中脊上涌，造成海岭体系体积改变；如果洋脊增生速率稳定，那么海平面不会变化（因有地壳均衡作用）；如果洋脊增生速率增大，洋中脊体积会增大；反之，洋中脊体积会相对缩小。海底扩张速度的快慢交替变化激发海平面的升降。C. E. Pitman (1978) 计算认为，洋脊体积的变化与扩张速率成正比（图 1.2），事实证明，显生宙以来的两次最大海侵期（早古生代和白垩纪—古近纪）均发生在板块运动的活跃期（D. G. Mia 等, 1984）。一般说来，大陆板块分裂时期，海岭发育而导致全球性海侵，板块合并时期，超大陆形成伴随着全球性海退。

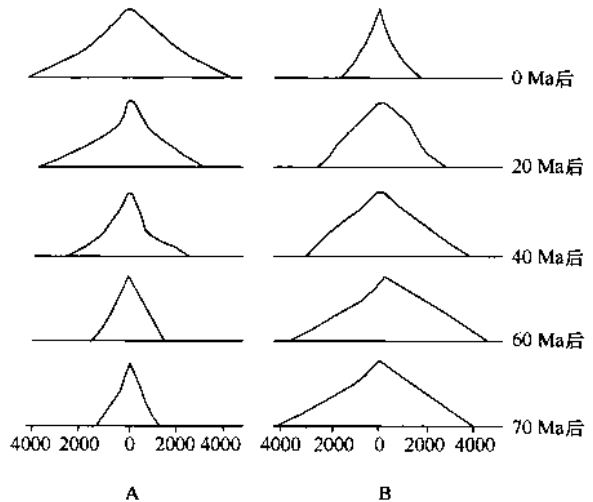


图 1.2 洋脊扩张速率不同引起的海岭横断面在 70 Ma 内的变化
(据 Pitman, 1978)

A—原来扩张速率为 6 cm/a 的海岭，在扩张速率减为 2 cm/a 后 70 Ma 海岭横断面积为原来的三分之一；B—海岭扩张速率由 2 cm/a 增至 6 cm/a，海岭横断面积的发育过程

1.1.3.4 地球在银河系中的位置与全球海平面变化

自显生宙以来出现了两次大海退和两次大海进。这两次大的海进，海退旋回恰好与地

球在银河系中的位置有关（图 1.3）；在一个银河年的不同时期，太阳系与银心的距离不相等，结果地球的万有引力常数随时间而变化：在近银心点时为 $6.67 \times 10^8 \text{ c. g. s}^{\text{①}}$ 单位，在远离银心点时增大到 $7.0 \times 10^8 \text{ c. g. s}$ 单位。因此，在远银心点时，地球缩小，表面积减小，出现全球性的大海进；在近银心点时，地球膨胀，表面积增大，出现全球性的大海退。从图 1.3 可看出，地球在银河系中的位置是引起最大一级海进、海退旋回的主要因素，通过与寒武-泥盆纪海平面升降的比较表明：石炭-二叠纪海平面升降事件发生得较快，持续时间较短，而且垂向上的变化大致相似。

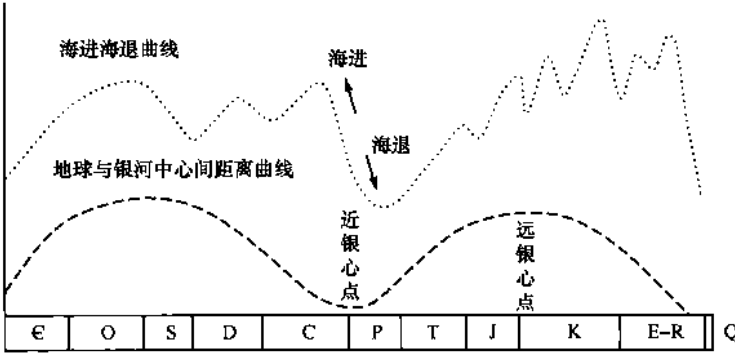


图 1.3 地球在银河系中的位置与全球海水进退的关系
(据高庆华, 1987)

总之，海平面变化受控于多种因素，构造沉降、气候（冰川融化）及沉积物的供给都是引起海平面变化的主要原因，然而，在漫长的石炭-二叠纪发展过程中，华北地区的海平面变化经历了一个上升下降的旋回，引起的主要原因是构造沉降和气候的变化，其中，构造是主要的影响因素，气候引起的冰川融化是海平面变化的重要影响因素，这样形成了一个陆表海盆地充填层序，表现为海-陆交互多发性海侵、海退的陆源碎屑沉积。

1.1.3.5 其他影响海平面变化的因素

影响海平面变化的其他因素主要有海水温度、盐度、陆地水体等地球物理过程等。

(1) 海水温度升高对海平面变化的影响

海水热膨胀是海平面上升的主要影响因素。由于海洋热比容差异可以通过密度差异的积分获得，所以可通过热比容计算出全球由于海水热膨胀而导致的海平面上升情况 (Gill A E, 1982)：

$$h_{\text{steric}}(x, y, t) = \int_{-H}^0 \frac{\rho^0(x, y, z) - \rho(x, y, z, t)}{\rho^0(x, y, z)} dz \quad (1.1)$$

式中： h 为由于海水热膨胀海平面上升的高度； H 为深度； $\rho^0(x, y, z)$ 为海水密度参数，并与温度参数 T_0 、盐度参数 S_0 、深度参数 z 构成线性函数关系； $\rho(x, y, z, t)$ 为温度和盐度的非线性函数。

Cabanes 发现在 1993 ~ 1998 年由于热膨胀使海平面上升了 $3.1 \pm 0.4 \text{ mm/a}$ 。但是全球

① c. g. s 是天文学上的一个单位，表示光量，即物体每单位时间辐射出的总能量，尔格/秒。

的热膨胀变化并不一致，在长的时间尺度和大的空间尺度上都有很大的差异，如印度洋自 20 世纪 60 年代就开始升温，而大西洋明显的升温过程却发生在 90 年代以后。这些差异的原因至今仍然无法给出合理的解释。IPCC (2001) 根据全球大气-海洋环流模式 (AOGCMS) 得出热膨胀使海平面上升了大约 $0.3 \sim 0.7 \text{ mm/a}$ 。自 IPCC 的报告后，关于热膨胀的研究又取得了许多新的突破，其中 Antonov 利用海洋历史观测资料算出海水热膨胀使海平面上升 $0.5 \pm 0.05 \text{ mm/a}$ (表 1.2)。Lombard 等 (2004) 利用 Levitus 等和 Ishii 等的数据结合分析发现，1993 ~ 1998 年间热膨胀使海平面上升了 $2.6 \pm 0.4 \text{ mm/a}$ ，两组数据的热膨胀曲线在 1950 ~ 1990 年间值都是十分吻合的，但是在 1990 ~ 1998 年之间，计算得出的 Ishii 的数据曲线值要比 Levitus 曲线值偏低，并且证实了 Cabanes 等所说的全球海平面变化具有区域性的特征。同样海水热膨胀曲线呈现出 10 年变化周期，这一变化周期的真实性一直是讨论的焦点，因为从气候模型无法显示这种周期变化，所以还“不清楚它是否揭示了模型的不足”。

表 1.2 热膨胀对海平面的影响

海平面升高 ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	误差 ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	资料来源	研究者或研究小组
1.6	± 0.3	基于卫星和水文数据 (1993 ~ 2003 年)	Willis 等, 2004
2.6	± 0.4	基于 Ishii 等 2003 年数据 (1993 ~ 1998 年), 但不包括 $30^\circ \sim 60^\circ \text{S}$ 地区	Lombard 等, 2004
0.5	± 0.05	基于 Levitus 等 2000 年数据	Antonov, 2002
2.4	± 0.2	基于卫星数据 (1993 ~ 1998 年), 不包括 $30^\circ \sim 60^\circ \text{S}$ 地区	T/P 研究小组, 2000

(2) 盐度对海平面变化的影响

大洋盐度变化对局部海域海水密度和海平面变化有着重要的意义，但对全球平均海平面变化的影响却很微弱。近年来有研究者指出，过去 50 年盐度的变化对海平面上升的影响大约为 0.05 mm/a ，这比热膨胀的影响明显要小得多。由于大洋盐度的变化可以反映注入海洋的淡水量的变化，因此通过模型可以把盐度的变化与注入海洋的淡水量进行转化。Antonov 对盐度变化与注入海洋的淡水量按比例作了换算，发现海洋淡化过程相当于使海平面上升了 $1.35 \pm 0.5 \text{ mm/a}$ 。需要指出的是，海冰和冰山的融化会使盐度降低，但并不会使海平面增高，在计算时要考虑它们的影响，并且它们最近的融化速度在加快。

(3) 山岳冰川对海平面变化的影响

20 世纪以来由于全球变暖，山岳冰川在后退，尤其是近 10 年后退的速度在加快。最近 Dyurgerov 通过对 260 个冰川的研究推算过去 40 年冰川物质平衡的变化，提出冰川融化对全球海平面的影响是 0.27 mm/a 。然而他忽视了阿拉斯加、巴塔哥尼亚和中亚等地区，致使其数据偏小。1999 年，Arendt 利用激光测量算出阿拉斯加的 67 个冰川的容积和变化，提出从 20 世纪 50 年代中期到 90 年代中期阿拉斯加的大多数冰川都在融化，其数量相当于使海平面上升了 $0.14 \pm 0.04 \text{ mm/a}$ 。2002 年，Arendt 对阿拉斯加冰川物质平衡重新