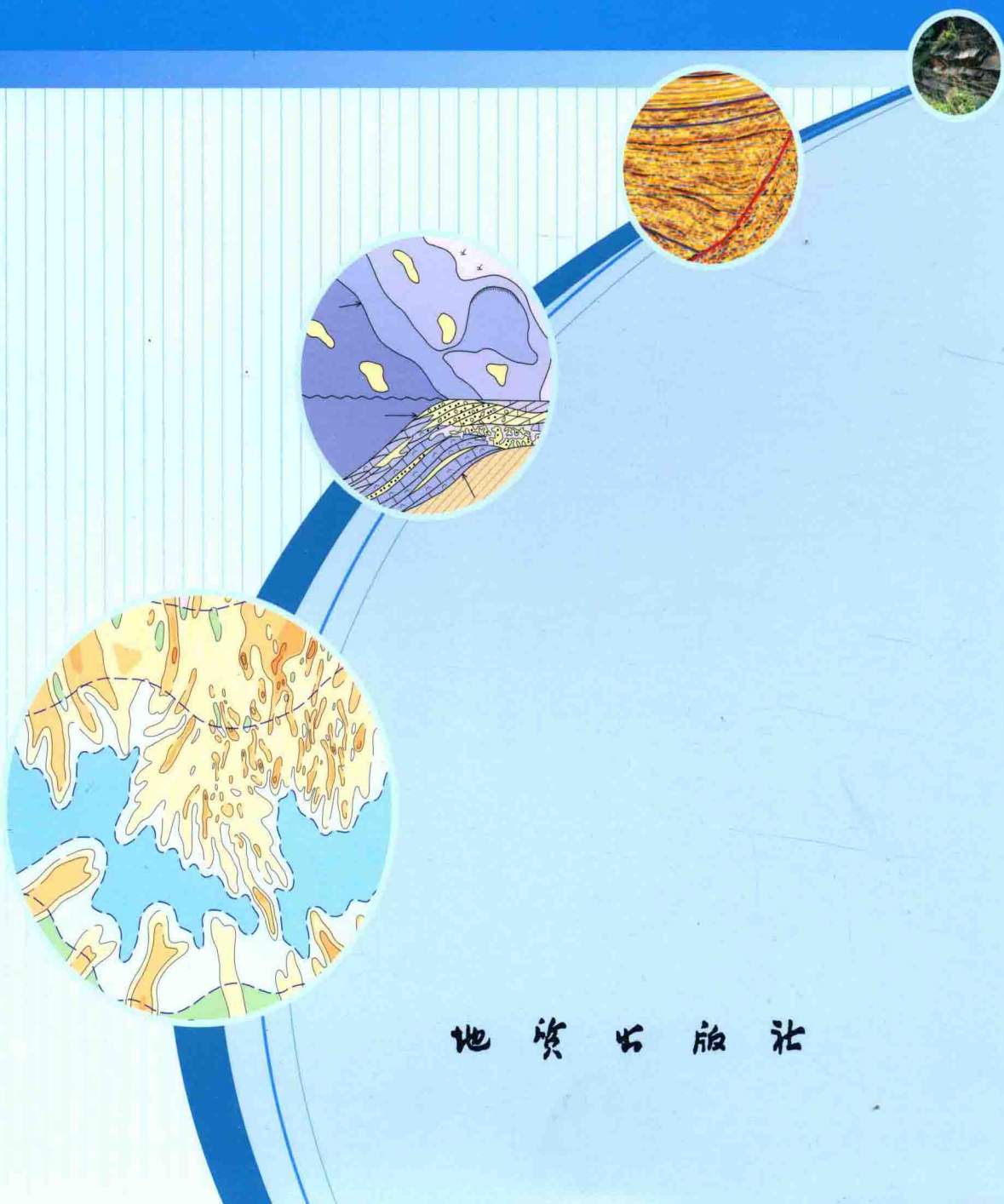


● 高等学校研究生教学用书

# 层序地层学理论与实践

陈洪德 侯明才 郑荣才 等 编著



地质出版社

高等学校研究生教学用书

# 层序地层学理论与实践

陈洪德 侯明才 郑荣才 等 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

本书在系统介绍层序地层学研究进展、基本概念和原理的基础上,详细论述了碎屑岩层序地层学、碳酸盐岩层序地层学、成岩层序地层学和层序地层学研究方法,并用大量研究实例介绍了层序地层学在油气勘探、开发及沉积盆地分析等方面的应用。内容涵盖了当前层序地层学研究的基本理论与应用实践,对沉积学、地层学等基础研究及油气勘探开发具有指导意义。本书可作为高等院校有关专业的硕士、博士研究生教学用书,也可供油气地质工作者参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

层序地层学理论与实践 / 陈洪德, 侯明才, 郑荣才 等  
编著. —北京: 地质出版社, 2013.12  
ISBN 978-7-116-08663-0

I. ①层… II. ①陈… ②侯… ③郑… III. ①层序地  
层学—研究 IV. ①P539.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 300629 号

## Cengxu Dicengxue Lilun yu Shijian

责任编辑: 刘亚军 夏军宝

责任校对: 关风云

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010)82324508 (邮购部); (010)82324578 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010)82310759

印 刷: 北京地大天成印务有限公司

开 本: 889mm × 1194mm  $\frac{1}{16}$

印 张: 25.75

字 数: 850 千字

版 次: 2013 年 12 月北京第 1 版

印 次: 2013 年 12 月北京第 1 次印刷

定 价: 180.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-08663-0

(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

层序地层学代表了地质学领域的一场新的革命，它是一种划分、对比和分析沉积岩系的新方法，其理论指导的地层研究极大地改变了人们对地层形成过程和盆地建造控制作用的认识，其模式分析对地层格架的建立和数字模拟研究提供了一个强有力的手段，使地层学的研究前进了一大步。层序地层学研究已经证明形成旋回性层序的各种作用的重要性，这些因素包括全球海平面变化、区域构造作用及气候变化。

层序地层学与沉积体系和岩相分析相结合的研究方法已成为层序地层学研究的重点。其研究已逐步转向与各种沉积体系和岩相分析有关的地层层序、与油气藏的勘探开发过程有关的储层层序及各种方法综合的高分辨率层序研究等方面，并已进入理论研究、广泛实践与全面发展的新时期，在油气的勘探开发过程中发挥着巨大的作用。层序地层学已逐步成为油气勘探、开发工作中不可缺少的工具。

层序地层学是近年来发展起来的一门新学科和新技术，是综合利用地震、钻井及露头资料，结合有关沉积环境及岩相古地理解释，对地层层序格架等进行综合解释的科学。随着层序地层学研究的不断发展，逐渐形成一门相对独立的分支学科。近年来，各地质与石油院校相继为研究生及本科生开设了层序地层学课程。目前，虽然关于层序地层学研究方面的文章和专著不少，既有理论研究和研究方法，也有实例和模式，并形成了观点不同的学派。但迄今为止，国内外公开出版的较系统的层序地层学理论与实践教材仍很少。为了满足地质与石油院校层序地层学的教学需要，成都理工大学陈洪德教授等通过亲身实践经历和阅读大量国内外资料而总结编写了《层序地层学理论与实践》一书。该书系统地总结和归纳了层序地层学的基本原理、研究方法和主要应用等。

该书由绪论和三篇十二章组成。绪论，主要介绍层序地层学研究内容、形成发展及主要进展与展望；第一篇——层序地层学理论，主要介绍层序地层学基本概念和理论，详细阐述了碎屑岩层序地层学、碳酸盐岩层序地层学及成岩层序地层学；第二篇——层序地层学研究方法，包括沉积地质学研究方法、地球化学研究方法、古生物学研究方法、测井层序及地震层序地层学研究方法；第三篇——层序地层学的应用，主要介绍层序地层学在油气勘探、开发及沉积盆地分析等方面的应用。

该书内容丰富，资料翔实，定义论述科学正确，理论与实践紧密结合，达到了教材内容全面准确新颖的要求。这是一本全面系统论述和介绍层序地层学理论、方法与应用的优秀著作，是从事沉积地质学、石油地质学、沉积盆地分析及一切从事沉积矿产勘探开发研究人员和沉积地质、石油系统院校本科生、研究生、教师研究和学习的良师益友。该书的出版必将进一步深化我国层序地层学理论以及沉积地质学、古生物地层学和石油地质学等相关学科理论的发展，为能源矿产的勘探和开发发挥重要作用。值该书即将面世之际，特为序，表示祝贺！

中国科学院院士 刘宝珺

2012年9月20日

# 前言

20 世纪 80 年代末期诞生并被人们广为接受的层序地层学顺应了地球科学发展的历史潮流, 它的出现在沉积学、地质学以及一切与沉积岩相关的科学领域引起了极大的震动。层序地层学概念在沉积岩分析中的应用有可能提供一个完整统一的地层学概念, 就像板块构造学说曾经提供一个完整统一的构造概念一样。层序地层学改变了分析地球沉积地层记录的基本原则。因此, 它的出现可以说是地质学中的一次革命, 开创了了解地球历史的一个新阶段。

层序地层学是研究以侵蚀面或无沉积作用面及可与之对比的整合面为界的、具有成因联系、并具旋回性的、地层年代格架内岩石关系的一门地质学科。它不但提出了一套全新的概念体系, 而且所划分确定的层序和体系域与特定的沉积体系、岩相和油气富集区密切相关。它能提供一种更准确的年代地层对比框架, 通过恢复古地理面貌, 在钻前预测烃源岩、储层和盖层的组合关系, 预测潜在的地层岩性油气藏分布区和可能的成藏组合。尽管层序地层学发展历史很短, 但它已在地质理论研究和寻找沉积矿产等诸多方面展现出了强大的生命力, 已在全球范围内掀起了层序地层学研究的热潮。因此, 有必要总结国内外不同学派层序地层学的研究成果, 结合中国海陆相盆地具体地质特征, 编著《层序地层学理论与实践》教材, 以发挥层序地层学在推动地球科学发展、产生新兴边缘交叉学科、提高沉积矿产勘探开发效益等方面的积极作用。

本教材的编写是对编者 1994 年编著的《层序地层学理论与研究方法》一书的深化与拓展, 融合了编者近 20 年来的层序地层学研究成果与认识, 并参考了近年来国内外大量有关层序地层学理论与实践的文献、专著、教材及科研成果。

本书与目前已出版的译著、编著教材和专著相比, 具有如下特点:

(1) 综合分析和总结了前人的研究成果, 并结合作者自己的研究工作和体会, 向读者系统而全面地介绍了层序地层学理论体系及不同学派的差异和标准化趋势。

(2) 强调层序地层学与沉积学研究之间的密切联系, 在深入进行沉积学研究的基础上, 力求加深对层序地层学的认识。

(3) 系统论述了碎屑岩层序地层、碳酸盐岩层序地层和成岩层序地层的发育特点, 介绍了不同沉积背景下的层序地层模式及其演变。

(4) 对层序地层学研究的方法体系进行了较系统、全面的介绍, 包括沉积学方法、地球化学方法、古生物学方法、测井和地震地层学方法等, 使之在实践中



更具可操作性。

(5) 较详细地介绍和讨论了层序地层学研究在油气勘探与开发中的意义和国内外用以指导油气勘探与开发的成功实例, 以及层序地层学研究在沉积盆地分析中的应用等。

本书力求做到教材内容全面、准确新颖的要求。然而, 需要说明的是, 层序地层学在发展过程中形成了诸多学派, 这些学派对层序的认识有所差异, 因此在应用层序地层理论时, 应指明所应用的具体学派以方便读者理解。

全书由绪论和三篇十二章组成, 绪论主要介绍层序地层学研究内容、形成发展及存在问题与展望; 第一篇——层序地层学理论: 第一章层序地层学基本概念及理论, 第二章碎屑岩层序地层, 第三章碳酸盐岩层序地层, 第四章成岩层序地层; 第二篇——层序地层学研究方法: 第五章沉积地质研究方法, 第六章地球化学研究方法, 第七章古生物研究方法, 第八章测井层序研究方法, 第九章地震层序研究方法; 第三篇——层序地层学应用: 第十章层序地层学与油气勘探, 第十一章层序地层学与油气开发, 第十二章层序地层学与沉积盆地分析。

全书各章编写分工: 前言和绪论, 陈洪德; 第一章, 陈洪德、刘文均、陈安清; 第二章, 郑荣才、陈安清、徐胜林; 第三章, 陈洪德、侯明才、陈安清; 第四章, 向芳、张成弓; 第五章, 林良彪、钟怡江、张成弓; 第六章, 田景春、钟怡江; 第七章, 赵兵; 第八章, 赵俊兴、陈安清; 第九章, 陈洪德、张玺华; 第十章, 陈洪德、侯明才、向芳; 第十一章, 丘东洲、钟怡江; 第十二章, 陈洪德、丘东洲。全书最后由陈洪德、丘东洲统纂。

本书初稿编写完成后, 承蒙刘宝珺院士、曾允孚教授审阅, 并提供宝贵意见, 刘宝珺院士还为本书作序。本书的撰写和出版过程中引用了许多专家和学者的研究成果和资料, 同时得到了成都理工大学有关领导的关心和地质出版社刘亚军编审的大力帮助, 成都理工大学沉积地质研究院研究生徐双辉为本书的制图、排版、打印和校对付出了辛勤劳动, 在此一并表示衷心感谢!

# 目 录

|                   |   |
|-------------------|---|
| 序 前 言             |   |
| 绪 论               | 1 |
| 第一节 层序地层学的任务和内容   | 1 |
| 一、主要任务            | 1 |
| 二、研究内容和程序         | 1 |
| 第二节 层序地层学的发展历史    | 3 |
| 一、概念萌芽阶段          | 3 |
| 二、地震地层学形成发展阶段     | 4 |
| 三、层序地层学综合发展阶段     | 4 |
| 第三节 层序地层学研究进展及展望  | 5 |
| 一、主要进展及其原因        | 5 |
| 二、层序地层学面临的问题和发展展望 | 9 |

## 第一篇 层序地层学理论

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第一章 基本概念及理论                  | 15 |
| 第一节 基本概念                     | 15 |
| 一、层序及其内部组成                   | 16 |
| 二、层序类型及其边界                   | 18 |
| 三、体系域的一般特点                   | 20 |
| 四、层序边界及其内部界面                 | 21 |
| 第二节 层序、沉积旋回及控制因素             | 24 |
| 一、不同级别沉积旋回的形成及其控制            | 24 |
| 二、海平面变化、沉积作用及其对层序模式的影响       | 26 |
| 三、非对称旋回及其形成                  | 29 |
| 第三节 层序地层学的其他学派及理论            | 30 |
| 一、高分辨率层序地层学                  | 30 |
| 二、成因层序地层学 (Galloway 模式)      | 37 |
| 三、T-R 层序地层学 (Embry 模式)       | 38 |
| 四、风暴浪层序地层模式 (Einsele 模式)     | 40 |
| 五、强制海退模式 (Kolla 模式)          | 40 |
| 六、滨岸轨迹概念 (Helland-Hansen 方法) | 43 |
| 七、系统理论概念 (Swift-Thorne 概念)   | 45 |
| 第四节 不同学派的融合及标准化趋势            | 46 |
| 第二章 碎屑岩层序地层                  | 50 |
| 第一节 碎屑岩沉积作用                  | 50 |



|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第二节 碎屑岩层序和沉积体系域 .....           | 53  |
| 一、层序界面 .....                    | 54  |
| 二、沉积体系域和凝缩段 .....               | 56  |
| 第三节 不同环境的碎屑岩地层层序 .....          | 63  |
| 一、河流-三角洲体系地层层序 .....            | 63  |
| 二、海岸-浅水陆棚体系地层层序 .....           | 68  |
| 三、斜坡-深海体系地层层序 .....             | 69  |
| 第四节 碎屑岩层序地层模式的变换及控制因素 .....     | 71  |
| 一、被动大陆边缘的碎屑岩层序地层模式及控制因素 .....   | 71  |
| 二、活动性边缘盆地层序地层模式及控制因素 .....      | 88  |
| 三、陆相盆地层序地层模式及控制因素 .....         | 108 |
| 第三章 碳酸盐岩层序地层 .....              | 111 |
| 第一节 碳酸盐岩的沉积作用 .....             | 111 |
| 第二节 碳酸盐岩层序和沉积体系域 .....          | 115 |
| 一、层序界面 .....                    | 116 |
| 二、沉积体系域 .....                   | 119 |
| 第三节 不同环境的碳酸盐岩地层层序 .....         | 124 |
| 一、浅水碳酸盐台地地层层序 .....             | 124 |
| 二、潮缘碳酸盐岩地层层序 .....              | 127 |
| 三、礁和丘的地层层序 .....                | 132 |
| 四、碳酸盐缓坡地层层序 .....               | 136 |
| 五、碳酸盐斜坡地层层序 .....               | 140 |
| 第四节 碳酸盐岩和陆源碎屑岩混合沉积层序 .....      | 144 |
| 一、混合沉积作用及混合沉积岩 .....            | 144 |
| 二、混积层序类型及其控制因素 .....            | 146 |
| 三、混合沉积层序的体系域特征 .....            | 148 |
| 第五节 碳酸盐岩层序地层模式变换及控制因素 .....     | 153 |
| 一、低位期 .....                     | 156 |
| 二、海侵期 .....                     | 160 |
| 三、高位期 .....                     | 162 |
| 第六节 碳酸盐岩台地结构及礁滩相迁移 .....        | 163 |
| 第四章 成岩层序地层 .....                | 166 |
| 第一节 I级层序海平面变化与成岩作用 .....        | 167 |
| 一、碳酸盐矿物相长周期的变化对成岩作用的影响 .....    | 168 |
| 二、长周期气候旋回影响下的沉积层序格架中的成岩作用 ..... | 169 |
| 第二节 II级层序海平面变化与成岩作用 .....       | 170 |
| 一、进积层序组与成岩作用 .....              | 171 |
| 二、加积层序组与成岩作用 .....              | 171 |
| 三、退积层序组与成岩作用 .....              | 172 |
| 第三节 III级海平面变化与成岩作用 .....        | 172 |
| 一、III级海平面低位期成岩作用 .....          | 172 |
| 二、III级海平面上升期成岩作用 .....          | 177 |
| 三、III级海平面高位期成岩作用 .....          | 180 |

## 第二篇 层序地层学研究方法

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第五章 沉积地质学研究方法           | 187 |
| 第一节 关键界面识别              | 187 |
| 一、不整合界面的识别及其成因类型        | 187 |
| 二、初始海泛面的识别              | 193 |
| 三、最大海(湖)泛面及其伴生的凝缩段      | 193 |
| 四、层序界面的物质表现形式           | 195 |
| 第二节 体系域研究               | 198 |
| 第三节 高频旋回分析              | 206 |
| 第六章 地球化学研究方法            | 213 |
| 第一节 稳定同位素地球化学方法         | 213 |
| 一、层序界面的稳定同位素识别标志        | 213 |
| 二、体系域的稳定同位素识别标志         | 213 |
| 第二节 稀土元素地球化学方法          | 220 |
| 一、层序界面的稀土元素地球化学识别标志     | 220 |
| 二、体系域的稀土元素地球化学识别标志      | 221 |
| 第三节 微量元素地球化学方法          | 223 |
| 一、层序界面的微量元素地球化学识别标志     | 223 |
| 二、体系域的微量元素地球化学识别标志      | 224 |
| 第四节 常量元素地球化学方法          | 225 |
| 一、层序界面的常量元素地球化学识别标志     | 225 |
| 二、体系域的常量元素地球化学识别标志      | 225 |
| 第五节 有机地球化学方法            | 228 |
| 一、层序界面的有机地球化学识别标志       | 228 |
| 二、体系域的有机地球化学识别标志        | 228 |
| 第七章 古生物学研究方法            | 231 |
| 第一节 提供等时地层对比格架          | 231 |
| 第二节 估测相对古深度             | 233 |
| 一、群落底栖组合法               | 233 |
| 二、风暴介壳岩推断法              | 235 |
| 三、化石群落种的分异度方法           | 237 |
| 四、古群落分析法                | 238 |
| 五、遗迹相法                  | 240 |
| 六、梯度种法                  | 242 |
| 七、生态环境标志法               | 242 |
| 第三节 海平面变化可能引起古生物化石变化的趋向 | 245 |
| 一、T-R旋回对古生物群落的影响        | 245 |
| 二、T-R旋回对生物个体及其分布的影响     | 248 |
| 三、T-R旋回对化石埋藏的影响         | 250 |
| 第四节 判断沉积速率的古生物标志        | 252 |
| 一、低速沉积或无沉积阶段的化石埋藏学标志    | 252 |
| 二、快速沉积的化石埋藏学标志          | 254 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第五节 重要层序界面的古生物标志 .....          | 254 |
| 一、凝缩段的地层古生物标志 .....             | 254 |
| 二、层序界面的古生物标志 .....              | 256 |
| 三、海泛面的古生物标志 .....               | 258 |
| 第八章 测井层序研究方法 .....              | 259 |
| 第一节 基本原理 .....                  | 259 |
| 一、幅度 .....                      | 261 |
| 二、形态 .....                      | 261 |
| 三、接触关系 .....                    | 262 |
| 四、组合特征 .....                    | 263 |
| 五、变化类型 .....                    | 263 |
| 第二节 沉积层序的测井响应特征 .....           | 264 |
| 一、准层序(组)的测井响应特征 .....           | 264 |
| 二、体系域的测井响应特征 .....              | 267 |
| 第三节 测井层序分析原则与实例 .....           | 269 |
| 第四节 人机交互测井层序划分技术 .....          | 272 |
| 一、小波变换基本原理 .....                | 272 |
| 二、小波变换层序划分实例 .....              | 276 |
| 第九章 地震层序研究方法 .....              | 280 |
| 第一节 地震反射界面分析 .....              | 280 |
| 一、地震反射界面、波阻抗界面和地质界面间的关系 .....   | 280 |
| 二、地震反射界面的年代地层意义 .....           | 281 |
| 三、地层接触关系和地震反射界面的类型及成因 .....     | 281 |
| 四、地震层序的划分识别 .....               | 283 |
| 第二节 地震相分析 .....                 | 284 |
| 一、地震相分析参数及其影响因素 .....           | 284 |
| 二、地震相划分标志 .....                 | 285 |
| 三、地震相分析的思路 .....                | 287 |
| 四、典型沉积体的识别 .....                | 288 |
| 五、川东北地区飞仙关组碳酸盐岩台地地震层序地层特征 ..... | 297 |

第三篇 层序地层学的应用

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第十章 层序地层学与油气勘探 .....           | 301 |
| 第一节 层序格架中的生、储、盖岩分布规律 .....     | 301 |
| 一、烃源岩的发育分布规律 .....             | 301 |
| 二、储集岩的发育分布规律 .....             | 304 |
| 三、封盖岩的发育分布规律 .....             | 308 |
| 第二节 层序格架中的生、储、盖组合类型与分布规律 ..... | 308 |
| 一、生、储、盖组合类型 .....              | 308 |
| 二、生、储、盖组合分布规律 .....            | 310 |
| 三、体系域中的生、储、盖组合及运移圈闭状况 .....    | 317 |
| 第十一章 层序地层学与油气开发 .....          | 320 |
| 第一节 层序地层与油气储层非均质性 .....        | 320 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 一、油气储层非均质性 .....               | 321 |
| 二、油气隔夹层、结构单元及沉积体系 .....        | 321 |
| 三、层序地层与储层非均质性研究 .....          | 325 |
| 第二节 层序地层与储层流动单元 .....          | 328 |
| 一、储层流动单元概念 .....               | 328 |
| 二、层序地层与储层流动单元划分 .....          | 329 |
| 第三节 基准面旋回与剩余油分布规律 .....        | 330 |
| 一、剩余油分布与储层非均质性 .....           | 330 |
| 二、剩余分布与沉积相类型 .....             | 331 |
| 三、剩余油分布与基准面旋回 .....            | 332 |
| <b>第十二章 层序地层学与沉积盆地分析</b> ..... | 334 |
| 第一节 层序地层与地层划分对比 .....          | 334 |
| 一、提供新的地层划分对比理论和方法 .....        | 334 |
| 二、区域性地层划分对比 .....              | 335 |
| 三、油田地层划分对比 .....               | 336 |
| 第二节 层序地层与沉积盆地关系 .....          | 341 |
| 一、层序地层参数反映的沉积盆地特征 .....        | 341 |
| 二、不同类型盆地的层序地层模型 .....          | 348 |
| 第三节 层序地层与岩相古地理编图 .....         | 361 |
| 一、层序-岩相古地理图的概念 .....           | 361 |
| 二、层序-岩相古地理图的编制方法 .....         | 361 |
| 三、层序-岩相古地理编图实践 .....           | 362 |
| 四、层序-岩相古地理图编制意义 .....          | 374 |
| <b>参考文献</b> .....              | 375 |

# 绪 论

## 第一节 层序地层学的任务和内容

### 一、主要任务

从沉积盆地的地质特征出发，以层序地层学为原理，通过露头、地震、测井层序的综合分析，对盆地进行地层层序单元的划分对比，建立等时地层格架和不同类型盆地的层序发育模式，揭示不同类型沉积体的时空发育分布规律，为基础地质研究和矿产资源勘探开发服务。

### 二、研究内容和程序

#### (一) 研究内容

层序地层学的思想精华表现在综合利用露头、钻井、测井和地震资料对地层构型进行综合分析，其理论系统是在构造地质学、古生物地层学、沉积地质学和油气地质学等多学科基础上发展起来的，其研究成果又丰富和升华了这些学科的理论认识，这就意味着层序地层学研究具有明显的学科交叉性和综合性。在实际工作中，由于研究盆地的类型不同，以及研究者的经验和学科知识结构的差异，造成了层序地层学研究内容认识上的差异。本书从层序地层学的基本理论和实际应用出发，认为层序地层学的主要研究内容应该包括不同资料的层序划分与对比，建立年代地层格架，分析控制层序构型的主控因素，研究各层序不同体系域的沉积体系特征，建立能够反映盆地地层样式的层序地层模式，预测不同层序或不同体系域的有利生、储、盖层分布和有利成藏组合（表 0-1）。

表 0-1 层序地层学的主要研究内容

| 研究领域     | 主要内容                                                                          |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 沉积背景     | 盆地类型及性质、盆地结构及古地形特征、盆地构造演化史和盆地沉积物类型                                            |
| 层序分析     | 地震、钻井、测井和露头资料的层序划分与对比，层序年代标定，建立等时年代地层框架，确定层序周期与级别，分析层序时频特征，分析层序成因机理，确定层序的主控因素 |
| 层序构型分析   | 划分体系域类型，分析各体系域的分布、地震相和沉积相的特征，判断古水流体系，确定准层序的叠置样式，建立地层层序模式，并进行计算机层序模拟           |
| 预测有利成藏区带 | 烃源岩、储集岩和盖层的分布研究和评价，有利成藏条件分析，各体系域生、储、盖、圈、运、保条件分析，预测成藏规律和有利勘探区，提出勘探部署意见         |

#### (二) 研究程序

层序地层学是在多学科理论上发展起来的一门综合性边缘学科，在实际工作中，应针对研究对象的具体地质特征和实际资料情况确定层序地层学的研究流程。但应遵循的基本原则是既能反映层序地层学先进的理论性和很强的综合性，又能反映出层序地层学工作流程、方法的实用性，利用多种资料进行多学科的地层地层综合研究（图 0-1）。

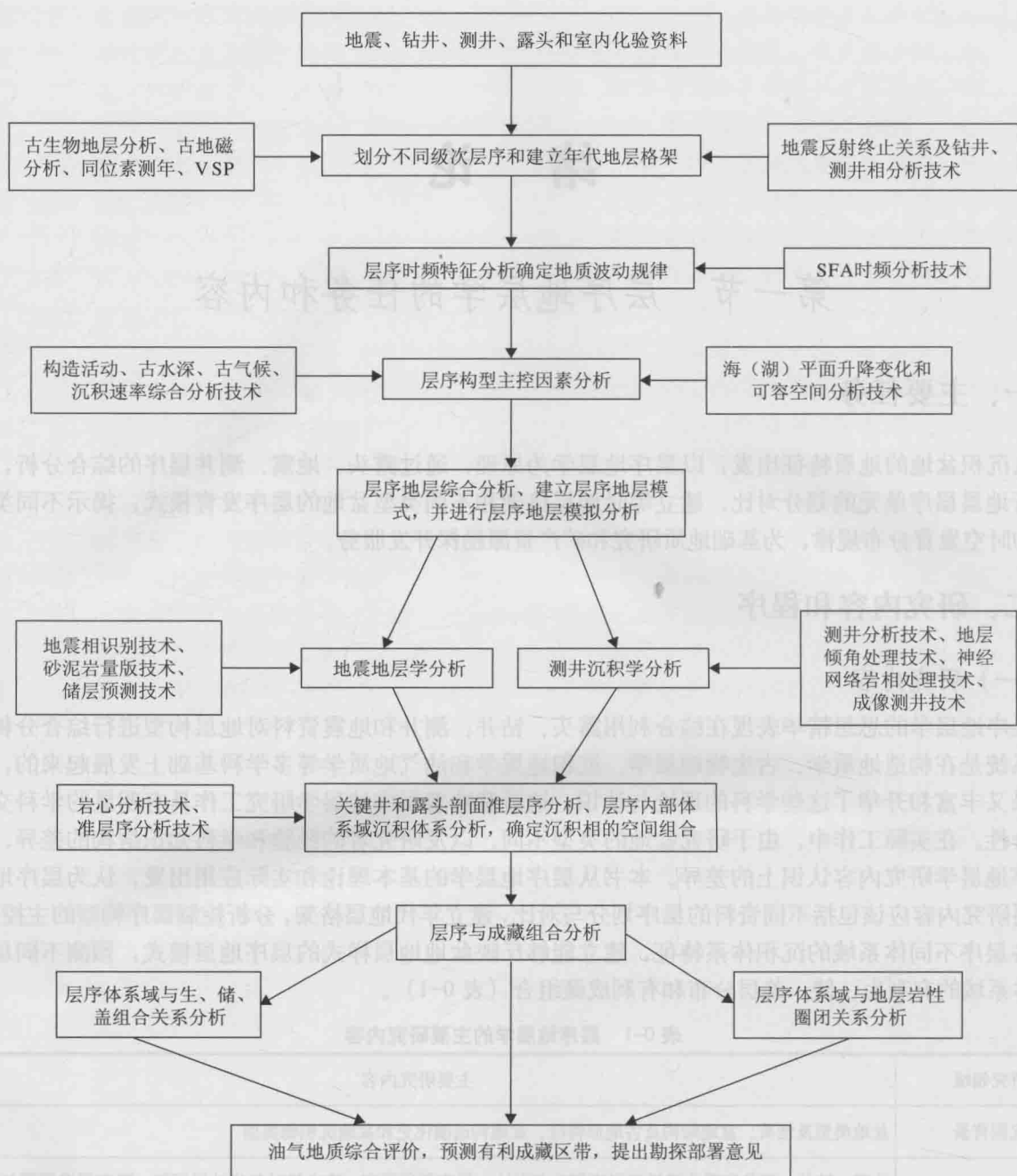


图 0-1 层序地层学研究流程框图

层序地层学又是根据露头、钻井、测井和地震资料，划分对比沉积岩层，结合有关沉积环境和岩相古地理解释，对地层层序格架进行地质综合解释的一种新的技术方法。当它与生物地层学及构造沉降分析相结合时，便提供了一种更为精确的以不整合面或与之可对比的整合面为边界的地质时代对比、岩相古地理再造和钻前预测生、储、盖地层的方法。从本质上讲，层序地层学分析提供了以层序和体系域为成因地层单元的年代地层格架。这些层序和体系域的几何形态及地层叠置样式是由海平面相对变化造成的，它们与特定的沉积体系和油气产出具有密切的联系。对于油气勘探来说，层序地层学具有良好的理论和实际预测作用。从理论上讲，通过对海（湖）平面相对变化的研究，可以预测尚未钻探地层的年代，预测某些体系域的地层叠置样式和分布范围，科学地推测盆地沉积充填历史和地质发展史。从实际应用来看，通过体系域和沉积岩相分布规律以及高分辨率地震勘探研究，可以预测形成油气藏及其他沉积矿



产的有利地区,预测钻前油藏类型和油层产量及已开发油田的扩边和提高开发效率。因此,层序地层学受到了人们的广泛关注。

## 第二节 层序地层学的发展历史

总体上讲,层序地层学的发展可以概括为三个阶段,即概念萌芽阶段、地震地层学形成发展阶段和层序地层学综合发展阶段。

### 一、概念萌芽阶段

众所周知,作为地质学发生、发展的核心和理论基础的地层学已有 200 多年的历史。在全球许多地质学家的努力下,相关的地层学分支学科,如年代地层学、生物地层学、岩石地层学、磁性地层学、同位素地层学、旋回地层学、事件地层学、生态地层学以及定量地层学都得到了迅速、系统的发展。这些地层学分支学科的出现和发展极大地推动了地层学的理论发展和技术进步。在地层学不断发展完善的背景下,与地层学相关的学科,如古生物地史学、沉积学、构造地质学、石油与天然气地质学、煤田地质学、地球化学等学科也得到了快速发展。反过来,它们又促进了地层学的发展与深化。地层学,特别是地层学的核心——国际地层表(或国际地质年代表)成了讨论任何与沉积学有关问题的准绳和尺度。为了维护这一准绳和尺度的权威性,地层学家于 20 世纪 30 年代就推出了国际地层命名和分类指南。为了完善这些地层命名和分类,国际地球科学联合会还在世界各地寻找地层标准剖面,作为最完善的地层对比标准。1960 年,中国地层委员会编著了《地层规范草案及地层规范草案说明书》。1981 年,中国地层委员会又出版了《中国地层指南及中国地层指南说明书》作为地层划分对比的指南。但是,若深入分析现有国际地层年代表及其指南,就会发现以下两个根本性的问题:①地层表中各代、纪、世、期的命名没有很好地反映出各地质时代的地质特征和它们的内在成因联系;②地层划分指南中提出的生物地层、年代地层和岩石地层是一个三元分类系统,而没有把此三元分类系统统一到带有纵向成因演化特征的年代地层单元这一最根本的客观标准上,从而造成了各地区地层划分和对比的矛盾以致混乱。当然,在当时的科技水平下,要消除这些矛盾是困难的或者是不可能的。然而,不彻底解决上述根本性的两个地层问题,则将会阻碍地质科学的发展,特别是地学在预测性和定量化方面的发展。而 20 世纪 70 年代末期发展并不断完善的层序地层学则试图来说明不同地质时代的地层成因关系。

层序地层学的诞生和发展首先得益于层序概念的提出。早在 1788 年, Hutton 首次指出不整合面是区分隆起、剥蚀和沉积旋回的物理界面。19 世纪中叶,在 Lyell 和 Agassiz (1835, 1840) 提出的冰川理论中就初步讨论了海平面变化与构造作用之间的关系。1906 年, Suess 发展了冰川理论并进一步讨论了海平面升降与沉积物上超和下超之间的关系。1909 年, Chamberlin 发表文章,论述了地壳运动控制了世界范围内的海平面变化。从这个意义上,可以认为 Chamberlin 是当代层序地层学的先驱。后来,几位美国地质学家继承发扬了 Chamberlin 的思想,以全球不整合为边界来恢复地质历史时期的沉积环境。Sloss、Krumbein 和 Dapples 于 1949 年在一次学术会议上提出了地层层序的概念,即“层序是以主要区域不整合为边界的地层集合体”,并利用北美克拉通地质资料,在寒武系至侏罗系 8 个系的地层单元中识别划分出了 4 个地层层序,从而开始了以层序作为地层单元来研究地层特征的新阶段。1963 年, Sloss 等人又将北美克拉通前寒武纪最晚期到全新世地层划分成以区域不整合为边界的 6 套层序并以印第安部落名称进行命名,以强调层序研究起源于北美。Sloss 认为,层序是比群和超群更高一级的岩石地层单位,它不一定适用于克拉通以外和大陆以外地区的岩石地层学和年代地层学研究。尽管克拉通层序概念为当今层序地层学的诞生和发展奠定了基础,但 Sloss 的思想,仅被他的学生和朋友 Vail 和 Wheeler 等人所接受。所以,在 1975 年,国际地层分类委员会把“层序”从岩石地层系统中分了出来,并命名为构造层(synthem)。

## 二、地震地层学形成发展阶段

在这个阶段,许多地质理论和方法得到了迅速发展。例如,人们可以利用同位素年代测定、古地磁测量和超微生物分带研究成果确定地层的地质时代;可以利用沉积学、古生态学、碳氧同位素的理论方法判断古沉积环境、古水深、古气候、古水温和沉积基准面的变化;利用板块构造理论、地球物理和盆地分析方法分析地壳的垂向升降、横向伸缩以及各种构造活动、火山活动、重大地质事件发生的时代和规模;特别是由于高分辨率数字地震勘探技术的发展,地质学家可以得到比较精确的能够反映地下地层形态、岩性、物性、流体性质的不同维数的图像。这些不同类型的地震图像极大地扩大了人们对地下复杂地质现象的透视视野,为人们提供了以前难以想象的地下地层三维展布及地质体之间的相互接触关系。例如,人们可以从地震剖面中识别为数众多的地层之间的不整合关系,以及反映不同沉积体成因类型的多种地震反射的内部结构和外部形态,从而促使人们更加深入地研究世界各地的地震反射剖面特征,并把它们与露头、钻井和测井资料结合起来。人们开始发现,地震反射终止关系是有周期性的,据此促使 Vail 等人 (1977) 提出了一门新的学科——地震地层学。

地震地层学是层序地层学发展的第二个重要时期,是以 Vail 等人提出地震地层学概念体系和出版《地震地层学》(Payton 主编,1977)为标志。地震地层学是一门利用地震资料进行地质综合解释的学科。它认为,由于岩层中产生地震反射的物性界面主要是具有速度-密度差异的层面和不整合面,所以可将这类界面作为划分年代地层单位的主要依据。地震地层学的核心是海平面升降旋回变化的周期性,基础是以不整合面为边界的沉积层序的识别。根据 Mitchum (1977) 的定义,“沉积层序是由相对整合、连续的,在成因上有联系的地层组成的、顶底以不整合面或与之相对应的整合面为界的地层单元”。一定的沉积层序代表的时间段可以因地而异,但某个层序的范围却限于等时界面之间。因此,它可以为地层对比和沉积相分析提供一个理想的年代地层格架。

Vail 的层序地层学思想,始于他在 Sloss 指导下读研究生期间,他在自己的层序地层学理论中对 Sloss (1949) 提出的层序作了两个方面的重要修订。第一,Vail 和 Mitchum (1977) 的层序比 Sloss (1949) 的层序包容的时间更短,北美显生宙 6 个克拉通层序可以被划分得更细,Sloss 的层序相当于 Vail 和 Mitchum 所提出的超层序 (supersequence)。第二,Vail 等认为,全球海平面升降是层序形成演化的主要驱动机制。1987 年,Haq 等人再次发表了全球海平面旋回变化图表。对于海平面升降变化曲线的“锯齿状特征”,人们进行过大量热烈的讨论,尽管仍然有人对于把沉积层序与全球海平面变化联系在一起的概念性模式持怀疑态度 (Miall, 1986),但是,不管怎么说,随着地震反射技术的日臻完善,层序可作为一种可行的以不整合面为边界的地层单元进行地层综合分析,这要比 Sloss (1949) 最初的克拉通层序概念更加细致合理,是一次理性概念的飞跃。

地震地层学多在盆地规模上利用地震资料,对地层结构、沉积相类型和分布进行盆地综合分析,但很少利用露头、钻井和测井资料进行层序地层综合分析。因此,不能在油气藏范围内为沉积地层分析提供必要的精度。

## 三、层序地层学综合发展阶段

尽管地震地层学理论解决了层序形成问题,但并未明确层序内部地层的彼此关系和空间展布特征,并且地震地层学主要应用地震资料在盆地范围内进行盆地分析工作,所以 Vail 等人在吸取其他地质学家建议的同时,进行了大量的露头、测井、海洋地质和地震资料的综合研究,利用层序地层、磁性地层、年代地层以及生物地层中所反映的海平面变化和同位素年龄等大量资料,编制了中生代以来的年代地层和海平面旋回曲线图,厘定了不整合面、海平面变化的概念,并强调地震剖面、测井和地面露头的综合研究是识别海平面变化的重要手段。

1988 年,正式出版了由 Wilgus 主编的《海平面变化综合分析》(1993 年,中译本更名为《层序地层

学原理》)。1989年,出版了Sangree和Vail等著的《应用层序地层学》。在这两本专著中,他们以全球性海平面变化为主导因素,系统、全面地阐明了层序地层学的基本理论、关键性术语的定义、解释程序和工作步骤。1991年,Vail等又在Einsele等主编的《层序旋回和事件》一书中,撰写了“构造运动、全球海平面升降及沉积作用的地层标志综述”一文,再次强调地层层序是由于构造运动、全球海平面升降、沉积作用及气候变化等地质作用相互作用而产生的;同时,也突出了不同级别构造作用对地层层序的影响,提出了一整套将层序地层分析、沉降史分析和构造地层分析相结合、互为补充的综合地层分析方法,特别将构造地层分析概括为9个步骤,突出构造沉降史与不整合面的研究,注意沉积充填史、构造型式与古应力条件的分析,高级别构造运动、构造条件与板块构造运动的关系等。1991年,由Macdonald主编的《活动边缘的沉积作用、构造运动和全球海平面变化》一书,进一步把层序地层研究扩展到活动大陆边缘。

进入20世纪90年代以来,层序地层学进入了理论研究和生产应用全面发展的时期。理论上出现了多种学派,如以基准面旋回与过程-响应原理为理论依据,以地质、地球物理方法为手段的Cross高分辨率层序地层学学派;以及由Galloway创立的、在国际学术界与石油工业界有重要影响的成因地层学派等。实践上,层序地层学开始深入至油气勘探到开发的各个阶段,如油田开发层序地层学研究用于采油、细粒岩层序地层学研究用于地球化学(Greaney和Passey,1993)等。层序地层学已成为油气勘探开发各个阶段不可缺少的内容。以最大的石油公司Exxon为例,从盆地分析到圈闭的成因解释,从油藏描述、数值模拟到后续动态模拟,从勘探开发各个阶段的软件开发到油藏管理,都直接或间接地应用到层序地层的理论、方法或研究成果,甚至还以已知油气田与层序地层的关系为基础编制新区勘探开发的指导模式。所以,全球沉积地质委员会(GSGC)正式将层序地层学和全球海平面变化纳入全球沉积学计划,将层序地层学推向学科前沿。1989年,AAPG在《层序地层学应用》一书的前言中提出:“你要成为90年代的石油地质学家、地球物理学家、石油公司经理和管理人员吗?那么,务必请你读一读《层序地层学应用》这本书吧”。Vail等人认为:“层序地层学概念在沉积岩分析中的应用有可能提供一个完整统一的地层学概念,就像板块构造曾经提供了一个完整统一的构造概念一样。层序地层学改变了分析世界地层纪录的基本原则,因此它可以说是地质学中的一次革命,它开创了了解地球历史的一个新阶段”。前苏联科学院主席团对层序地层学给予了很高的评价,认为层序地层学对发展地层学、沉积岩石学和构造地质学有重大贡献,而且可以大大提高油气普查勘探工作效率,预计可以得到数以十亿卢布计的经济效益。

### 第三节 层序地层学研究进展及展望

当前,层序地层学已成为国际地质科学研究的热门课题。1989年以来的历届AAPG年会以及1992年第29届国际地质学大会上,它都成为重要的讨论内容,充分展示了其在理论上以及在研究的深度和广度上所取得的长足进展。

#### 一、主要进展及其原因

##### (一) 主要进展

1) 在层序地层学的基本理论研究方面,对北美—西欧及其他地方经典露头地区进行细致的层序地层分析、对碳酸盐岩层序地层以及混积型层序地层的深入研究、对高频旋回的地面及地下分析,以及对海平面变化的认识和精确计算等方面,都有了长足的进展。在被动大陆边缘条件下,沉积层序的计算机模拟也取得了很大的进展。如对密西西比三角洲以东地区的计算机模拟结果与真实断面有相当高的拟合度,表明对控制层序形成的主要因素——海平面变化、构造沉降、沉积物补给速度以及初始深度的分析和参数的选择上是正确的。层序地层学的研究思路和方法,也正在不同类型的盆地中得到应用,并证明了其