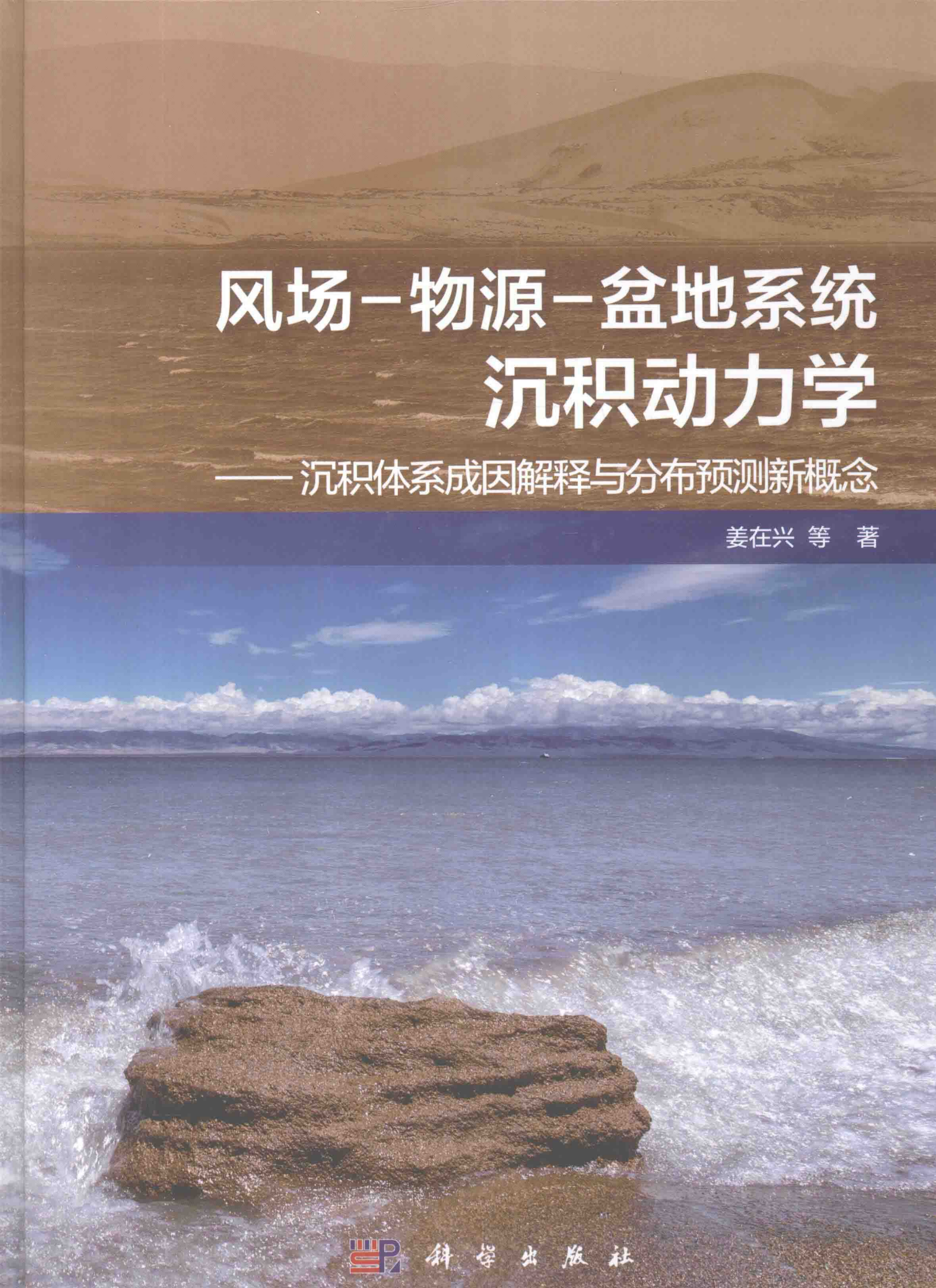




风场—物源—盆地系统 沉积动力学

——沉积体系成因解释与分布预测新概念

姜在兴 等 著



科学出版社

风场-物源-盆地系统沉积动力学

——沉积体系成因解释与分布预测新概念

姜在兴 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在现代与古代沉积研究的基础上,把风场引入沉积作用中并强调其与物源和盆地动力的共同作用控制了沉积体系的形成与分布,进而提出了风场-物源-盆地系统沉积动力学的概念及其研究方法。从而由传统沉积相、沉积模式的一维属性、源-汇体系的二维属性,提升到了风场-物源-盆地系统的三维属性,使得对沉积体系(包括陆相和海相、碎屑岩和碳酸盐岩)的成因解释更加合理、对未知区沉积体系(储集体)的分布预测更加全面和准确。本书提出的古风场定量恢复方法弥补了古气候学中古大气环流场研究的空白。同时含油气盆地中的生、储、盖组合关系也受到风场-物源-盆地系统动力学作用的约束,这为石油地质评价提供了新的视角。

本书读者对象为沉积学、石油地质学、气候学工作者。

图书在版编目(CIP)数据

风场-物源-盆地系统沉积动力学:沉积体系成因解释与分布预测新概念/
姜在兴等著. —北京:科学出版社, 2016. 11

ISBN 978-7-03-050606-1

I. ①风… II. ①姜… III. ①沉积体系-动力学-研究 IV. ①P588.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 271146 号

责任编辑:孟美岑 韩 鹏 陈姣姣 / 责任校对:何艳萍

责任印制:肖 兴 / 封面设计:北京图阅盛世

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2016年11月第一版 开本:889×1194 1/16

2016年11月第一次印刷 印张:28 1/4

字数:863 000

定价:339.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

稳定的能源供应体系是实现中国梦的物质保障，中国油气工业的二次创业方兴未艾，而沉积学作为其基础学科，其理论和方法的创新往往引领着油气等能源行业的新发现。姜在兴教授近年来在沉积动力学方面的思考，特别是关于风场对水沉积环境的影响，是对现有沉积学理论的重要补充和完善，有望成为未来沉积学研究的一个持续的热点。我有幸提前拿到书稿，通读全文，体会有以下创新性进展：

（1）目前沉积学界对风成沉积研究日趋成熟，但风对水沉积环境的影响过程及其沉积响应仍是研究的薄弱环节。该书在传统的湖泊、海洋及其过渡沉积环境中引入“风场”概念，强调其与物源和盆地动力的共同作用控制了大部分沉积体系，包括碎屑岩和碳酸盐岩的形成及分布。

（2）定量沉积学研究是沉积学发展的基本方向，该书对古风场的研究从开始就进入了定量级别，十分难得。其古风场定量恢复方法填补了古气候学中大气环流场研究的空白。

（3）油气勘探领域是沉积学应用的重要战场，书中举例分析了风场-物源-盆地系统动力学对含油气盆地中的生、储、盖组合关系的约束和影响，为石油地质评价提供了新的视角。

（4）全书内容丰富，既有对出露地表的青海湖现代沉积和露头的研究成果，也有对埋藏地下数千米的胜利油田、辽河油田、华北油田中新生界不同类型沉积物的深入解剖。地质学、地球物理学、水文学和气象学等多学科资料皆包含其中，体现了科学研究的“系统”内涵。

作为姜在兴教授的同行，多年来我一直关注着他学术成就的积累。他带领他的研究团队潜心研究沉积学几十年，著述丰富且低调严谨。书中成果是他和他团队扎实工作、不断创新的结果。本人愿意推荐给沉积学和石油地质学同行研读。

中国工程院院士

馬永生

2016年5月25日

序 二

中国作为石油、天然气生产与消费大国，能源需求日益增加，尽管油气资源比较丰富，但仍难以满足国民经济持续快速发展的需要，油气供需矛盾加大。另外，中国重点含油气盆地逐步进入较高油气勘探程度，陆上油气勘探以岩性地层油气藏为主，勘探目标更为隐蔽，特别是东部成熟盆地油气勘探程度提高，储、产量难以稳定，油气接替的新领域、新类型难以寻找。面对勘探目标日趋复杂、勘探难度不断加大的严峻形势，如何拓宽石油地质学研究新视野与油气勘探开发新领域，尝试从新的途径、新的方法技术指导油气勘探新发现与新突破，是目前摆在石油勘探家和地质学家面前的重大课题，是中国石油地质理论发展与油气勘探面临的挑战和机遇。

科学新发现来源于现场工作的第一手资料，勘探新思想来源于生产中的找油实践。正是这些科学新发现和勘探新思想，推动着新的石油地质与勘探理论的形成，指导着油气勘探事业的发展。姜在兴教授及其团队在长期从事中国东部含油气盆地沉积学研究过程中，将“风生而水起”这一朴素的自然现象与沉积盆地砂体预测相结合，提出了风场-物源-盆地系统沉积动力学的概念，用以指导沉积体系成因解释与分布预测，具有原创性。

“风场-物源-盆地系统沉积动力学”认为，沉积过程发生在风(气候)-源(物源)-盆(盆地)系统中，涉及了古气候、古物源、古地貌、古水深等控制要素。古风场及其控制下的古气候控制了沉积体的构造、结构特征；古物源是物质基础；古地貌和古水深决定了沉积体发育位置、范围与规模，各因素相互制约、相互影响、不断变化。风场-物源-盆地系统沉积动力学的研究思路正是通过对这些要素的研究，探讨它们对沉积的控制作用。该书首先全面论述了一百多年来沉积体系理论的发展，重点是其分布的多重控制因素，认为风场是一个重要的参数，提出了风场-物源-盆地系统动力学的概念；进一步地详细阐述了风场-物源-盆地系统动力学要素的构成、对沉积作用的影响及研究方法。在此理论的指导下，对青海湖现代沉积体系、渤海湾盆地古近系沉积体系进行了研究，建立了现代和古代的风场-物源-盆地系统沉积动力学模式。

姜在兴教授通过引入“风场”，使沉积学研究从“一元”传统相模式、“二元”源-汇体系推进到综合考虑风场-物源-盆地的“三元”沉积动力学体系，使得对沉积体系（包括碎屑岩和碳酸盐岩）的成因解释更加合理、对未知区沉积体系（储集体）的分布预测更加全面和准确。风场-物源-盆地系统沉积动力学的研究理念和研究思路发展了沉积相、沉积体系、源-汇体系的理论，丰富和扩展了陆相湖泊沉积学理论，填补了该领域国内外研究的空白，具有重要的沉积学和古气候学意义，将对成熟含油气盆地砂体的进一步勘探提供新的理论和方法。

中国科学院院士



2016年9月3日

序 三

自 Charles Lyell 在 James Hutton 的基础上继承和发展了“均变论”，“将今论古”这一信条影响了后世至今的地质科学领域，也成为了沉积学研究的指导思想。翻阅各权威沉积学与石油地质学杂志不难发现，有关水槽实验模拟、现代沉积考察的报道层出不穷，两者通过直观地重现复杂的沉积过程，完善了沉积动力学研究，建立了各类相模式，影响深远。然而，“将今论古”并非绝对可靠，如古新世-始新世界线事件、白垩纪大洋缺氧事件与大洋红层等重大沉积地质事件，难以在现代沉积中找到类比，这些地层沉积记录的客观存在，对于不断挖掘控制沉积过程复杂的边界条件提供了资料基础。因此，“现在是过去的钥匙”并不能完整表达古代地质过程，“古今结合”同样重要。

沉积学从西方引入，相、相模式、层序地层学、沉积体系、源-汇体系等具有里程碑意义的概念或研究理念均由西方沉积学家开拓，我国沉积学则以借鉴和跟踪性研究为主，“标新立异”鲜见。该书以我国陆相湖盆为研究对象，以青海湖现代沉积和渤海湾盆地古近系沉积体系为例，“古今结合”，把风场对沉积体系的控制作用单列，强调其与物源和盆地动力的共同作用，在传统相模式、沉积体系的基础上，提升到了风场-物源-盆地系统沉积动力学的三元体系，这不仅适用于陆相也适用于海相沉积。该体系基于我国陆相湖泊体系而生，使沉积学研究打破了局部相模式、沉积体系、源-汇体系的束缚，是我国陆相湖泊沉积学理论的一次提升和创新。同时，古风场是古气候研究中不可缺少的一个环节，但却是薄弱的一个环节，在风场-物源-盆地系统框架下，使古风场的恢复成为可能。在含油气盆地中合理运用风场-物源-盆地系统沉积动力学的研究思路，也将会为油气储层预测提供新的思路。

风场-物源-盆地系统沉积动力学是姜在兴教授及其团队多年工作的结晶，是沉积学研究秉承纵向深入、横向交叉拓展理念的良好典范，具有代表性和可推广性。在该书出版之际，谨表祝贺！

中国科学院院士



2016年10月18日

前 言

沉积作用发生在沉积环境或沉积盆地中,形成沉积物、沉积岩,它们的形成和分布受控于沉积盆地自身的条件、物源及气候条件。岩相、沉积相、沉积模式、沉积体系等概念的提出能在一定程度上解决盆地局部沉积体的形成、分布甚至预测的问题。源-汇体系的提出把盆地沉积体与供给沉积体的物源及搬运路径结合起来,更好地解释了沉积体形成的过程。气候对沉积作用的控制众所周知,特别是温度与湿度对母岩区风化作用及其产物的影响和对盆地物理、化学甚至生物条件的影响,进而对沉积物特征的影响已有大量文献出版。然而风场,包括风向和风力作为气候的重要组成部分,对沉积作用的影响研究程度还很低。虽然目前对陆上风成沉积研究日趋成熟,但风对水沉积环境的影响过程及其沉积响应是沉积学领域的薄弱环节。究其原因,第一,这涉及气象学与沉积学的交叉领域;第二,风场作用的记录难以在古代地层中识别,造成了古风场恢复的困难。研究发现,海洋和湖泊环境中的滨岸和浅海(湖)地区的迎风侧在风的吹动下形成波浪,而这些波浪在由海(湖)向陆的传播过程中受海(湖)底地貌的影响,形成一系列平行或斜交于岸线的沙坝,沙坝的几何形态和大小与波浪及风力等有关。因此,通过沙坝的识别和测量就可以定量恢复古风力和古风向,从而为古风场恢复提供了方法。在一个沉积盆地中,盆地自身的参数和物源条件固然控制沉积,但是迎风侧和背风侧沉积体系的分布差别很大,而且大部分滨岸和浅水沉积体系本身也受到风浪的作用,因此风场是一个重要的控制沉积的参数,三者共同作用才是全面控制了沉积体系的成因和分布,因此本书提出了“风场-物源-盆地”系统沉积动力学的概念。该理论的核心是把风场引入沉积作用中,并强调其与物源和盆地动力的共同作用,由传统沉积相、沉积模式的一维属性,源-汇体系的二维属性,提升到风场-物源-盆地系统的三维属性,使得对沉积体系(包括碎屑岩和碳酸盐岩)的成因解释更加合理,对未知区沉积体系(储集体)的分布预测更加全面和准确。另外,本书提出的古风场定量恢复方法弥补了古气候学中古大气环流场研究的空白。同时,含油气盆地中的生、储、盖组合关系也受到风场-物源-盆地系统动力学作用的约束,这为石油地质评价提供了新的视角。

本书共7章。第1章(姜在兴、王俊辉、李庆执笔)通过对一百多年来沉积学发展主脉络的梳理,指出了沉积学的研究重点从最初的建立科学的相模式、解释沉积环境,逐渐转移到了解释沉积作用发生过程的控制因素上来,这些控制因素包括了气候、构造、物源等方面,认为风场作为一个重要的气候参数,对沉积体系的控制具有普遍性,应当予以重视并单列,因此沉积体系形成与分布可以概括为受风场、物源、盆地三者控制,进而提出了风场-物源-盆地系统沉积动力学的概念。第2章(姜在兴、王俊辉执笔)详细阐述了风场-物源-盆地系统内的要素构成(风向、风力、物源、地貌、水深等)及其对沉积过程的影响,并分析了各要素间的相互作用及其沉积响应;总结并提出了各要素的恢复方法,完善了综合考虑风场、物源、盆地的“三元”沉积动力学体系,建立了基于风场-物源-盆地系统沉积动力学的沉积体系分类方案。第3章(陈骥、姜在兴执笔)通过青海湖现代沉积体系考察研究,建立了现代风场-物源-盆地系统沉积动力学模式,包括强物源背风体系模式和弱物源迎风体系模式。强物源背风体系由冲积扇、扇三角洲、河流、三角洲等组成。弱物源迎风体系由风成沙丘、障壁和无障壁滨岸、潟湖、喇叭状河口等组成。为本书风场-物源-盆地系统沉积动力学概念的提出提供了现代沉积的实例。第4章(王俊辉、姜在兴、张元福执笔)以东营凹陷古近系沙四上亚段为例,以岩心、测录井、地震等为资料基础,开展高精度层序地层学与沉积体系研究。应用风场-物源-盆地系统沉积动力学的研究思路与研究方法,通过古水深、古地貌、古物源和古风场等参数的恢复,对该区的沉积体系进行综合性研究,确定了各类沉积体系的成因机制和控制因素,建立了该区风场-物源-盆地系统沉积动力学模型;首次发现并提出了始新世中期古东亚季风存在的证据,并论证了其对沉积体系的控制作

用。第5章(王夏斌、张元福、姜在兴执笔)在对辽河西部凹陷古近系沙四段沉积体系研究的基础上,对滩坝砂体的沉积特征、成因类型以及控制因素进行了综合研究。认为辽河西部凹陷滩坝砂体主要发育于低位体系域和湖侵体系域早期,按其沉积成因分为侧缘改造型、前缘改造型、基岩改造型、淹没改造型和风暴改造型五种滩坝类型。滩坝砂体的分布主要受风场-物源-盆地三端元系统的共同控制。第6、第7章为弱风场、强物源-盆地作用背景下粗碎屑岩形成作用的例子。第6章(刘晖、姜在兴执笔)以廊固凹陷古近系大兴砾岩沉积特征分析为基础,通过重建古物源和古地貌,建立了断槽重力流、碎屑流型近岸水下扇和泥石流型近岸水下扇三种砾岩体成因模式。物源-盆地系统控制下的砾岩储层特征和油气产能由好到差依次为:碎屑流型近岸水下扇、断槽重力流和泥石流型近岸水下扇。第7章(郑丽婧、姜在兴执笔)对束鹿凹陷古近系沙三段碳酸盐质致密角砾岩沉积特征、构造活动和物源-盆地作用进行了研究,从成因上将砾岩分为两大类:一类是冲积扇与湖泊作用形成的扇三角洲砾岩;另一类是地震作用形成的滑塌扇砾岩及震积岩。探讨了不同成因的砾岩储层特征和含油性的差异。全书由姜在兴统稿。

本书是作者团队十多年研究成果的体现,得到了国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”、“十一五”课题(油气勘探新领域储层地质与油气评价,2009ZX05009-002)、“十二五”课题(油气勘探新领域储层地质与评价,2011ZX05009-002),以及国家自然科学基金(基于沉积模拟的湖相滩坝沉积动力学研究41102089、湖相滩坝砂体地质定量预测研究41572029)和中石化胜利油田分公司、中石油华北油田分公司和中石油辽河油田分公司及教育部油气沉积地质创新团队、博士点基金相关研究课题的资助。在本书研究过程中,贾承造、马永生、康玉柱、高德利、李廷栋、王成善、杨树锋、彭苏萍、蔡美峰、赵文智等院士给予了深入指导,胜利油田张善文、宋国奇、王永诗、刘惠民教授级高工,大港油田赵贤正教授级高工,华北油田张以明、张瑞锋教授级高工,辽河油田孟卫工、陈振岩、单俊峰教授级高工,美国得克萨斯大学奥斯汀分校 R. Steel、C. Fulthorpe 教授,俄亥俄大学 E. Gierlowski-Kordesch 教授,科罗拉多矿业学院 D. Nummedal 教授,壳牌石油公司 H. Lu 博士,德国纽伦堡-艾尔伦根大学 R. Koch 教授,中国地质大学(北京)邓宏文教授、中国石油大学(华东)邱隆伟教授等专家的支持、指导和帮助,罗冬梅、许文茂提供了封面照片,在此深表感谢。通过这些研究还培养了一批博士、硕士研究生,他们为本成果的形成做出了重要贡献,他们是:杨伟利、彭兴鹏、刘娅铭、李国斌、田继军、张乐、陈桂菊、向树安、刘立安、苑桂亭、郑宁、王升兰、秦兰芝、赵伟、冯磊、李维岭、周浩玮、魏小洁、袁帅、高维维、李俊杰、孙晓玮、孙祥鑫、宋珊、李海鹏、许文茂、刘超等。

最后感谢贾承造、马永生、王成善院士在百忙中为本书作序。

由于作者水平有限,风场-物源-盆地系统沉积动力学的原理、方法和应用可能存在不妥当之处,欢迎读者批评指正。

姜在兴

2016年5月1日

目 录

序一
序二
序三
前言

第 1 章 风场-物源-盆地系统沉积动力学的提出	1
1.1 沉积体系研究进展	1
1.2 风场对沉积体系的作用	5
1.2.1 风场对碎屑沉积体系的作用	5
1.2.2 风场对碳酸盐岩沉积体系的作用	12
1.3 沉积体系成因与分布的多重控制	20
1.3.1 风场对沉积体系的控制	20
1.3.2 物源供给对沉积体系的控制	21
1.3.3 盆地特征对沉积体系的控制	21
1.4 研究意义	22
1.4.1 沉积学意义	22
1.4.2 古气候学意义	22
1.4.3 油气意义	23
参考文献	25
第 2 章 风场-物源-盆地系统沉积动力学要素构成及研究方法	29
2.1 风场	29
2.1.1 风的产生与三种风场	29
2.1.2 风的直接作用	31
2.1.3 风浪	32
2.1.4 风浪动力控制下的滩坝砂体分布	36
2.1.5 古风场研究方法——古风向的恢复	40
2.1.6 古风场研究方法——古风力的恢复	42
2.2 物源	46
2.2.1 物源的形成	46
2.2.2 物源对沉积的控制	46
2.2.3 物源分析方法	47
2.3 盆地	54
2.3.1 盆地基本特征	55
2.3.2 古地貌对沉积的控制及研究方法	57
2.3.3 古水深对沉积的控制及研究方法	62
2.3.4 构造活动对沉积的控制	67
2.4 风场-物源-盆地系统沉积动力学	68
2.4.1 风场-物源-盆地各要素的相互作用	68
2.4.2 风场-物源-盆地系统沉积动力学分类	70
参考文献	72

第3章 青海湖现代沉积体系与风场-物源-盆地系统沉积动力学研究	78
3.1 青海湖的地理概况与地质概况	78
3.1.1 青海湖的地理位置	78
3.1.2 青海湖的气候特征	79
3.1.3 青海湖的水文特征	82
3.1.4 青海湖盆地的地层特征	82
3.1.5 青海湖盆地的构造特征及演化	84
3.2 青海湖现代沉积体系特征	85
3.2.1 日月山/野牛山-倒淌河-有障壁滨岸沉积体系	86
3.2.2 青海南山-冲积扇-扇三角洲/滨岸沉积体系	95
3.2.3 布哈河-三角洲沉积体系	109
3.2.4 大通山-冲积扇-扇三角洲/辫状河-曲流河三角洲沉积体系	121
3.2.5 哈尔盖河/甘子河-有障壁滨岸沉积体系	128
3.2.6 团保山、达坂山-冲积扇/滨岸-风成沉积体系	138
3.2.7 湖泊沉积体系	152
3.3 青海湖现代沉积体系分布与风场-物源-盆地系统动力学模式	158
3.3.1 青海湖现代沉积体系分布特征	158
3.3.2 青海湖现代沉积体系主控因素	160
3.3.3 风场-物源-盆地系统模式的应用	165
3.4 研究意义	168
3.4.1 盆控体系控油源	168
3.4.2 风场-物源-盆地系统控制砂体分布	169
参考文献	170
第4章 东营凹陷古近系沉积体系与风场-物源-盆地系统沉积动力学研究	172
4.1 东营凹陷地质概况	172
4.1.1 构造背景	172
4.1.2 地层层序	173
4.1.3 构造演化特征	174
4.2 东营凹陷沙四上亚段层序地层划分方案	176
4.2.1 各级层序界面的识别	176
4.2.2 典型单井层序划分	183
4.2.3 层序地层划分方案	200
4.3 东营凹陷沙四上亚段沉积相类型	202
4.3.1 扇三角洲	202
4.3.2 水下重力流	204
4.3.3 三角洲	205
4.3.4 砂砾质滩坝	206
4.3.5 碳酸盐岩滩坝	211
4.3.6 风暴沉积	211
4.3.7 细粒沉积(半深湖-深湖)	215
4.3.8 沉积体系格架	215
4.4 沙四上亚段风场-物源-盆地系统沉积动力学	224
4.4.1 古水深恢复	224
4.4.2 古地貌恢复	225

4.4.3 古物源分析	228
4.4.4 古风力恢复	231
4.4.5 古风场与沉积环境	246
4.4.6 滩坝砂体分布规律的控制因素分析	247
4.4.7 风场-物源-盆地系统的划分	250
4.5 风场-物源-盆地系统沉积动力学研究意义	252
4.5.1 古气候意义	252
4.5.2 油气意义	253
参考文献	255
第5章 辽河西部凹陷古近系沉积体系与风场-物源-盆地系统沉积动力学研究	257
5.1 地质概况	257
5.1.1 构造背景	257
5.1.2 地层层序	258
5.2 层序地层格架	260
5.2.1 各级层序界面的识别	260
5.2.2 井震结合建立层序格架	266
5.3 沉积体系与风场-物源-盆地系统沉积动力学研究	268
5.3.1 沉积相分析	268
5.3.2 沉积相平面展布	285
5.3.3 辽河西部凹陷滩坝沉积模式	289
5.3.4 辽河凹陷沙四上亚段风场-物源-盆地系统的划分	294
5.4 滩坝砂体精细研究	296
5.4.1 精细地层格架的建立	297
5.4.2 曙北地区滩坝沉积体系研究	298
5.5 滩坝砂体形成分布控制因素研究	307
5.5.1 古地貌恢复	307
5.5.2 古水深恢复	311
5.5.3 古物源恢复	312
5.5.4 古风场恢复	317
5.5.5 风场-物源-盆地系统对滩坝的控制	319
参考文献	321
第6章 廊固凹陷古近系砾岩体沉积特征与物源-盆地系统沉积动力学研究	323
6.1 地质概况	323
6.2 砾岩体沉积特征	325
6.2.1 岩石类型	326
6.2.2 结构特征	326
6.2.3 沉积构造	327
6.2.4 砾石组分	330
6.2.5 填隙物组分	334
6.2.6 砾岩体之间泥岩特征	337
6.3 古地貌恢复	337
6.3.1 凸起残留地层地貌	337
6.3.2 控盆断层断面形貌特征	337
6.3.3 盆地古地貌	339

6.3.4 古地貌模式	341
6.4 古物源恢复	342
6.4.1 残留地层	342
6.4.2 砾岩砾石组分分布特征	342
6.4.3 大兴凸起古地质演化	346
6.5 物源-盆地作用与沉积模式	348
6.5.1 断槽重力流	348
6.5.2 碎屑流型近岸水下扇	348
6.5.3 泥石流型近岸水下扇	349
6.5.4 砾岩体分布特征	350
6.6 与储层和油气的关系	350
6.6.1 砾石组分对储层的控制	350
6.6.2 成因类型对油气的控制	354
参考文献	356
第7章 束鹿凹陷古近系沉积特征与物源-盆地系统沉积动力学研究	358
7.1 地质概况	358
7.1.1 概述	358
7.1.2 区域构造特征	359
7.1.3 盆地演化	361
7.1.4 地层发育特征	362
7.1.5 沉积期次划分及特征	362
7.2 沉积特征	362
7.2.1 岩石类型	362
7.2.2 砾石成分	371
7.2.3 测井识别	373
7.2.4 重点井岩性分布	377
7.3 构造活动对沉积作用的影响	377
7.3.1 震积岩的类型和特征	378
7.3.2 震积岩序列	387
7.3.3 震积岩的判定标准	388
7.4 物源-盆地作用	393
7.4.1 砾岩成因类型	393
7.4.2 砾岩分布规律	398
7.4.3 两种成因砾岩的关系	403
7.5 与储层的关系	404
7.5.1 成岩作用	404
7.5.2 储集空间类型	406
7.5.3 储集空间成因机制	414
7.5.4 物性特征	415
7.5.5 储层主控因素	416
7.5.6 储层评价方法	424
参考文献	430

第 1 章 风场-物源-盆地系统沉积动力学的提出

1.1 沉积体系研究进展

在近两个世纪的沉积学发展过程中，相、沉积环境、相模式、沉积体系、源-汇体系等概念依次提出，并成为沉积学不同发展时期的重要里程碑。

1. 相 (facies)

“相”这一概念最初由瑞土地质学家 Gressly 于 19 世纪 30 年代末引入沉积岩研究中。他认为“相是沉积物变化的总和，表现为这种或那种岩性的、地质的或古生物的差异”。不同的沉积学家对这一概念有着不同的理解。在我国一般认为“相”即“沉积相” (sedimentary facies)，定义为“沉积环境及在该环境中形成的沉积岩（物）特征的综合”（姜在兴，2003）。从定义来看，相既包含了描述属性（物质组成），又包含了解释属性（沉积环境）。

在地质记录中，某一特定的“相”有相似的岩性的、物理的及生物构造等特征，可区别于与其相邻近的上覆的、下伏的及侧向的“相”（图 1-1）。因此，特定的“相”形成于特定的环境。通过对“相”的分析，可以推演其形成时的沉积环境。实际上，“相”的概念产生以后，沉积相研究的目的就集中在沉积环境的解释上，以判定相参数或环境边界条件为手段。例如，可以通过研究某沉积单元的平面形态是否为朵状、有无海陆生物混生现象、沉积相序是否为向上变粗的序列等，来判定一个沉积体是否属于三角洲环境。沉积相的分析过程受控于第一手资料，更多地用于局部沉积过程恢复、沉积环境的解释上。例如，要研究图 1-1 中相 A 与相 B 沉积时期的沉积过程与沉积环境，需要分别对其岩性、结构、构造、古生物等资料进行详细的研究，对于相 A、相 B 之外的沉积过程与沉积环境，需要借助其他资料进行研究。



图 1-1 岩性不同的两种相（陕西省咸阳市旬邑县三水河剖面三叠系）

2. 沉积环境 (sedimentary environment)

物理上、化学上及生物学上均有别于相邻地区的一块地球表面的地理景观单元即为沉积环境 (Selley, 1976)。沉积环境由下述一系列环境条件组成：①自然地理条件；②气候条件；③构造条件；④沉积介质的物理条件；⑤介质的地球化学条件等 (姜在兴, 2003, 2010a)。地表沉积环境的分类如图 1-2 所示。

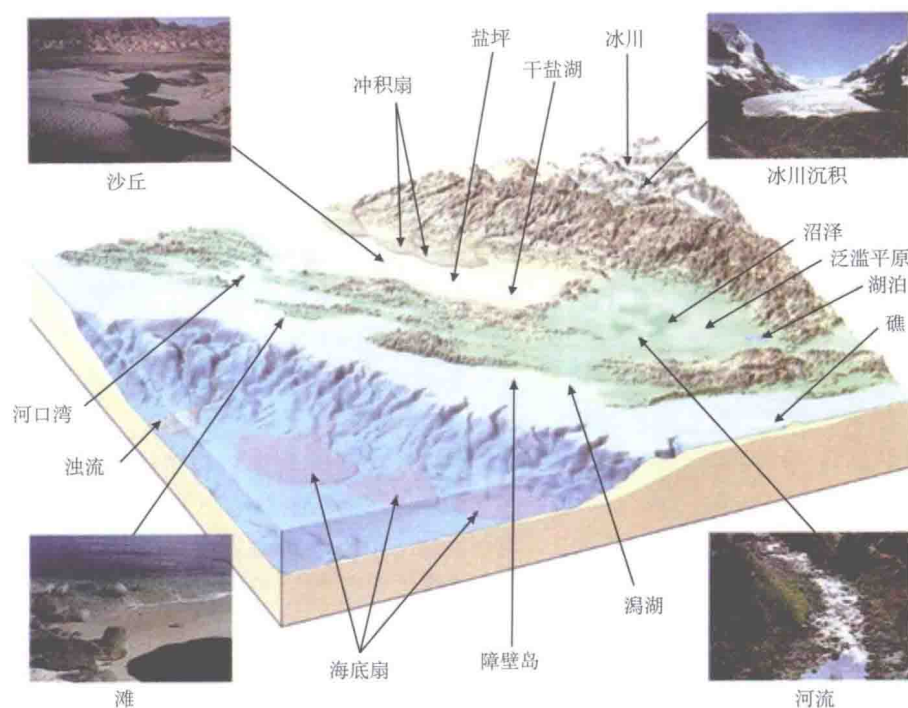


图 1-2 地表沉积环境类型汇总

沉积环境是沉积作用发生的场所，也是形成沉积岩的基本原因与决定性要素。相的概念中，其解释属性已经包含了沉积环境。例如，三角洲相是指海（湖）陆过渡沉积环境下河流与蓄水体之间相互作用产生的物质记录。相解释的最终目的是为了恢复古沉积环境（何起祥等，1988）。但这个过程在实际工作中是比较困难的，因为如上所述，限制某一沉积环境的充分必要条件很少。有些条件是必要而非充分的；也有些条件是充分而非必要的（何起祥等，1988）。因此，沉积环境的解释是一个多种边界条件综合解释的结果，具有多解性。另外，由于沉积环境的恢复很大程度上依赖于相分析的研究方法，因此沉积环境的解释通常也是高度依赖于第一手资料的、局部范围的研究。

3. 相模式 (facies model)

相模式的概念由著名沉积学家 Roger Walker 提出。自 1979 年《Facies Models》(Walker, 1979) 一书出版以来，相模式一直被视作现代沉积学史上的一座丰碑。相模式是以图解、文字或数学等方法表现的一种理想的和概括的沉积相，并有助于了解复杂的沉积水动力机制和作用过程。相模式是基于沉积过程中水动力机制的变化会产生不同的物质记录（包括沉积物的结构、构造等），是对沉积环境、沉积过程及其产物的高度概括 (Walker, 1979)。不同的沉积环境，具有不同的沉积过程和水动力机制，形成不同的物质记录，因此具有不同的相模式。

沉积学家已经通过地质记录的观察、现代沉积作用的研究和实验模拟，建立了各类沉积相的标准模式或一般模式，用以解释沉积环境。例如，著名的鲍马序列，描述了浊流沉积时的水动力学状态（图 1-3）。相模式从水动力学解释的角度，在沉积相研究过程中，为沉积相的解释提供了模板和参考。由此可见，相模式的研究仍然属于相分析和沉积环境解释的研究范围，是对相对独立的点上的、局部范围的研究。

	粒度	分段	特征	解释
	泥	E	浊流间沉积(页岩)	深水沉积或细粒密度浊积
		D	水平纹层	?
	砂粉砂	C	波痕、波状或包卷纹层	低流态下部
		B	平行纹层	高流态
	砂(底部细砾)	A	块状, 渐变	高流态(?) 快速堆积

图 1-3 鲍马序列及解释 (Bouma, 1962; 冯增昭, 1993)

4. 沉积体系 (depositional system)

这一概念首先由美国得克萨斯经济地质局于 20 世纪 60 年代末期应用于墨西哥湾, 之后定义为过程或成因相关的沉积相的组合体, 或者沉积环境及沉积过程具有成因联系的三维岩相组合体 (Davis, 1983; Posamentier et al., 1988), 这一概念目前仍被广泛应用。因此, 具有成因联系的相, 是构成沉积体系的基本单位。鉴于“相”的概念使用已十分广泛, Galloway (1986) 建议使用“成因相”来表示沉积体系的基本构成单元 (李思田等, 2004), 即特定的沉积体系由特定的“成因相”组合而成。在沉积体系内部, 不同的成因相在空间上是相互联系、有规律配置的 (图 1-4)。构成同一沉积体系的各种成因相, 并非孤立存在, 而是彼此之间具有成因联系: 它们由一种或几种沉积作用联系起来。沉积体系也暗含了时间的概念, 强调了沉积过程和成因联系的沉积相组合体的演化过程。一个沉积体系的物质表现是由不整合或沉积间断面限定的一个三维沉积地质体。

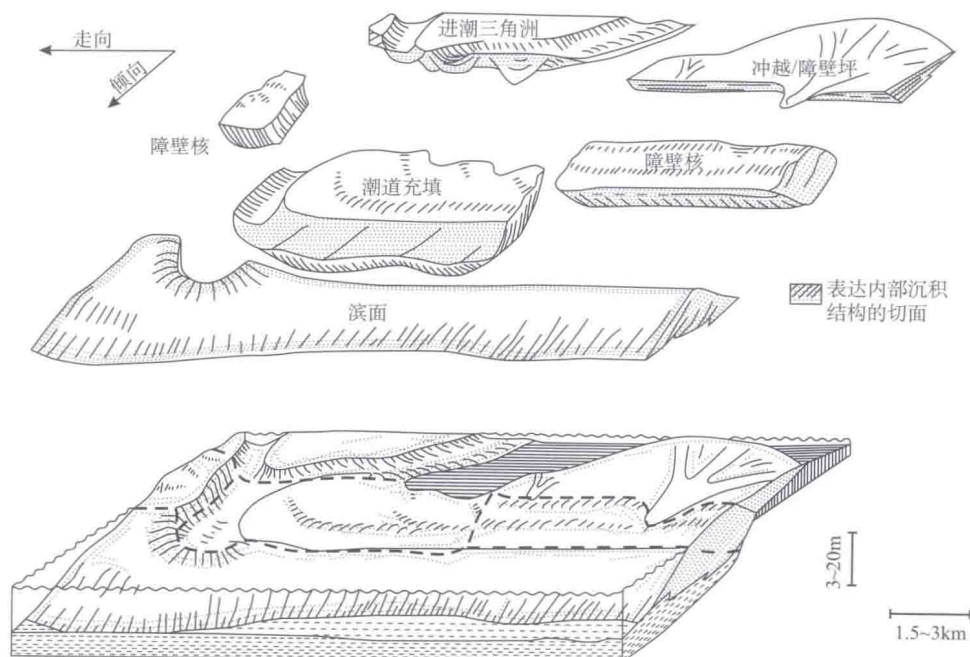


图 1-4 障壁滨岸体系障壁岛的“成因相”构成 (Galloway, 1986)

进行沉积体系综合研究,是对沉积相分布规律概括的过程,也是盆地分析与中尺度古地理复原的基础。因此,沉积体系概念的提出,使沉积学的研究尺度在局部相模式的建立、沉积环境解释的基础上,进一步扩大(何起祥,2003),是沉积相研究的继续和发展(王成善和李祥辉,2003)。沉积体系分析方法站在了各类沉积过程的制高点上,以更高的视角进行沉积过程研究,指出有成因联系的相是作为体系而存在的。因此,沉积体系研究以研究沉积过程、成因关联的沉积相组合体的演化过程为重点。沉积体系逐渐成为沉积过程研究的基本单位。

5. 源-汇体系 (source to sink system)

造山带或隆起区的剥蚀地貌与盆地区的沉积地貌,是地球表面的两个基本地貌单元(林畅松等,2015),两者之间通过沉积物搬运系统来进行物质变迁和交换。从剥蚀区形成的物源,包括机械风化剥落的颗粒沉积物和化学风化的溶解物,被搬运到沉积盆地中最终沉积下来的过程构成了源-汇系统(Source to Sink,也被简称为“S2S”)。源-汇系统是当前国际地球科学领域的一个热点课题。沉积物从剥蚀区(源)到最终沉积在盆地中(汇),不外乎剥蚀、搬运、沉积三种作用。沉积物在统一的源-汇体系中扩散,受到一系列内动力、外动力过程作用及反馈机制的控制,源-汇体系正是以此为研究对象(Somme et al., 2009)。20世纪90年代由美国自然科学基金会(U.S. National Science Foundation, NSF)主导了大陆边缘研究计划(MARGINS Program),“从源到汇”作为其中的一个核心子计划,在过去十多年取得了显著成果。该计划的核心科学目标是在各类沉积过程发生的时间尺度内综合研究,关联了陆地与海洋的沉积物分散体系,通过观察、实验、理论综合研究系统内的各要素组成。核心问题围绕构造作用、气候变化、海平面升降等外部作用如何影响沉积物(包含颗粒沉积物和溶解物)的产生、搬运、堆积,揭示地球表面侵蚀作用发生与物质迁移的过程,以及沉积过程中的相互作用如何造就地层记录。源-汇体系研究理念开始强调地表过程的定量化,并将沉积物通量与地质过程结合起来。目前,源-汇系统的研究是当前地球科学领域的重要课题。

在源-汇系统中保存下来的地质信息,是从剥蚀区到沉积区的整个地球表层动力学过程的记录,应当把沉积物的形成、搬运到最终沉积保存作为一个整体的过程来研究。例如,对现今从陆到洋的源-汇系统的研究,就是要揭示沉积物如何从物源区形成,又如何从物源区搬运至陆架区并最终沉积到深海区(如形成深海扇)(Somme et al., 2009, 2013; Somme and Jackson, 2013)。这一源-汇系统包括了从汇水(剥蚀)区、冲积-滨海平原区、浅海陆架区、大陆斜坡区及深海盆地等多个沉积体系(图1-5)。在这一地表动力学过程中,会受到构造作用、气候变化、海平面升降等外部作用的控制。因此研究学科涉

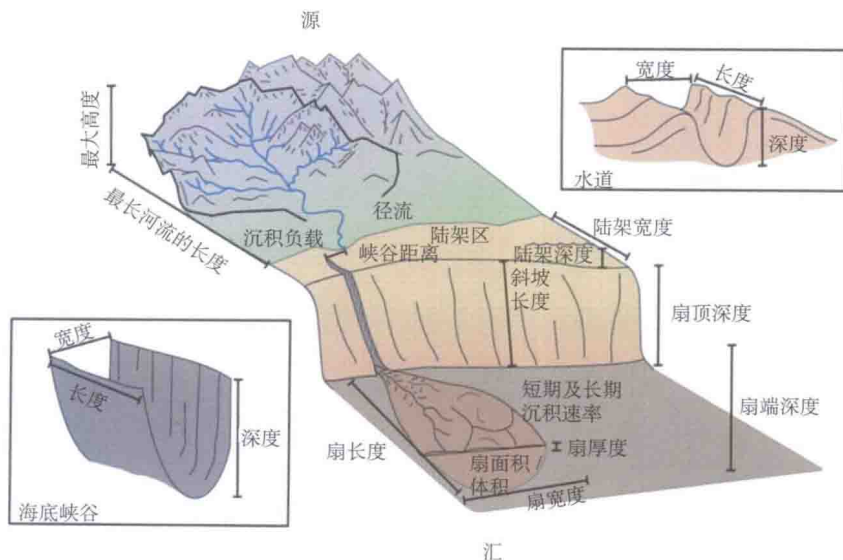


图 1-5 陆-洋源-汇系统的地貌带分布与剥蚀-沉积作用 (Somme et al., 2009)

及了固体地球地质学、地貌学、大气学、环境学及海洋学等的广泛联系和交叉, 研究内容围绕外部作用对侵蚀作用的发生与物质迁移过程的控制作用(林畅松等, 2015)。这一理念的提出, 使沉积学的研究在沉积体系的基础上进一步整体化。各类沉积体系在统一的源-汇系统中相互作用, 互为因果。由此可见, 在研究尺度上, 源-汇系统的提出比沉积体系进一步扩大。然而, 源-汇体系仍然偏重于沉积特征的研究, 解释沉积过程(纵向上的, 即从源到汇), 对区域上(横向上的)沉积体系分布的解释研究偏弱。

1.2 风场对沉积体系的作用

以上讨论的各概念: ①沉积相的研究侧重于局部的岩相类型的描述, 多以沉积环境的解释为目的; ②相模式强调点上或垂向水动力条件, 是沉积相研究过程的重要补充; ③沉积体系强调相之间的组合, 指出有成因联系的相作为体系而存在, 沉积学研究的单位逐渐由沉积相转变到沉积体系; ④源-汇体系的研究内容是沉积物从物源区到沉积区的整个过程中, 构造作用、气候变化、海平面升降等外部作用如何影响侵蚀、搬运、沉积作用的, 强调一维空间上(沉积路径)的各类沉积体系的串联关系。以上研究内容由简单到复杂、由局部到整体, 逐渐由对沉积物本身的研究转移到对控制侵蚀-搬运-沉积作用的要素上来。

各种沉积控制要素包括气候、构造、物源、海平面升降等, 充分研究各控制要素对沉积体系的控制作用, 对沉积体系的展布、不同沉积体系的匹配关系将会有更加深刻的认识。其中古气候对沉积的控制是目前研究相对薄弱的环节。对气候, 特别是风场中的风向、风力对沉积作用的影响往往被忽略了。但是, 风作为一种重要的地质营力, 不但具有侵蚀、搬运、沉积的作用, 它还可以作用于水体产生波浪和风生水流, 在水盆地中形成广阔的滨岸带, 控制着滨岸及浅水地带沉积作用的发生。风场对沉积体系的作用在多数情况下是普遍存在的, 主要表现在以下几个方面。

1.2.1 风场对碎屑沉积体系的作用

1. 风与风成沉积体系

风场对碎屑沉积体系最直接的作用是形成风成沉积体系或沙漠体系。干旱地区强烈的物理风化作用使地表广泛发育砂质风化物, 同时, 这里降水稀少、蒸发量大、缺乏植被, 地表常处于干燥状态, 所以风的作用十分强烈。风对地表的作用表现为风蚀作用、搬运作用和风积作用三种方式, 相应地风对地表物质产生侵蚀、搬运和堆积过程。地表蜂窝石、风蚀穴、风蚀蘑菇、风蚀柱、风蚀洼地、风蚀谷地、岩漠及戈壁滩的形成都是风蚀作用的结果。风的搬运力虽然比流水小得多, 但它的搬运量巨大。一次大风暴可以搬运重达几十万吨至上亿吨的物质(陈效逯, 2006)。随着风的长途吹送或者风遇到各种障碍物如山体、树木等, 风力减弱, 风所搬运的物质便沉积下来, 形成风积物。其中, 以推移和跃移方式搬运的砂质沉积物的堆积, 将形成沙丘甚至沙漠; 以悬移方式搬运的粉砂和尘土, 将形成风成黄土沉积。

2. 风对湖泊体系的作用

风力除了直接作用于沉积物, 还可以驱动其他介质运动并影响沉积体系的分布。在湖泊体系中, 湖浪和湖流是受风驱动的最为明显的水动力作用。

在湖泊中存在这样几个重要的物理界面: 洪水面、枯水面、正常浪基面、风暴浪基面(图 1-6)。其中, 正常浪基面之上的滨岸带, 是湖浪显著作用的地区, 会对湖岸和湖底的沉积物进行侵蚀、搬运和再沉积, 形成各种侵蚀和沉积地貌单元, 如浪蚀湖岸、滩坝沉积等。在风暴浪活动时期, 在正常浪基面到风暴浪基面之间会发育风暴沉积(图 1-6)。这些都是风场对湖泊沉积体系沉积物改造作用的结果。另外, 发育于浅水地区的三角洲体系, 在风浪的作用下也能发生沉积物的再分配。例如, 三角洲前缘发育的席状砂、河口两侧平行岸线分布的沙嘴, 都是波浪作用对三角洲改造的结果。如果波浪较