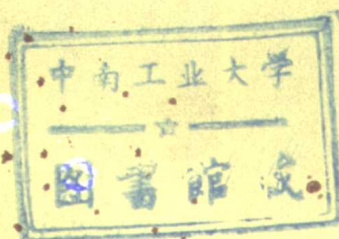


722281

事件地层学概论

齐文同 编著



地质出版社

事件地层学概论

齐文同 编著

地质出版社

内 容 简 介

事件地层学是一门发展迅速的新学科,不但研究地层剖面中常见的风暴层,如席状砂岩、竹叶状灰岩和贝壳层,而且研究古气候的阶跃性变化和生物演化中的绝灭事件等突发事件,又称新灾变论。事件地层学开辟了岩相古地理研究、高精度地层对比和寻找沉积矿产的新途径,对沉积岩石学、地层学和古生物学等地质基础理论也有十分重要的意义。

本书结合实例系统介绍事件地层学研究的内容、理论和方法,供岩相古地理、沉积岩石学、矿产地质、石油地质、海洋地质、地层学和古生物学的专业人员和院校师生参考。

事 件 地 层 学 概 论

齐文同 编著

责任编辑:荣灵璧

地质出版社出版发行

(北京和平里)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 7.875 字数: 180000

1990年6月北京第一版·1990年6月北京第一次印刷

印数: 1—1590册 国内定价: 3.80元

ISBN 7 116-00627-3/P·532

序

早在地质学萌芽时期,居维叶就发现了南美洲的巨兽*Megatherium*和西伯利亚的猛犸等动物绝灭的证据。他在巴黎盆地还发现白垩层之上的海相与陆相交互层中,每个陆相地层的生物都与下面的层不同。由于这套海陆地层的界线分明,居维叶提出灾变论,认为地球的历史曾被多次的灾变所打断,每次海浸都造成前一个陆相动物群绝灭;新动物群则从没有受到海侵影响的远方迁来。

莱伊尔(1831)的《地质学原理》提出了渐变观点。达尔文的进化论(1859)则用大量事实来证明物种是可变的,通过变异、生存斗争和自然选择,物种发生了逐渐的变化。从此,渐变论和现实主义原理在地质学中占据统治地位。

但是,地球发展的阶段性在地球的生物界和无机界的发展史中十分明显,因此早在达尔文的进化论发表之前,就已经根据生物的进化阶段性把地质时期划分成代和纪,沿用至今。

施蒂勒的构造幕观点,黄汲清的多旋回构造观点,以及王鸿祯的亚洲和中国构造阶段划分等,都反映了对构造发展阶段性的认识。古代冰期的发现也证明了与今天不同的环境。

生物大规模绝灭问题始终是古生物学家和地质学家长期探索的重大疑谜,50年代以来,更成了热烈争论的课题。

Newell在1967年用大量统计资料证明了生物演化中的突变现象。一些学者试图用造山运动、海面升降、气温变化、古地磁反转、有害金属毒化、气候区变化、生物习性特化和火山爆发等大规模变化来解释生物的大规模绝灭现象。70年代以来,Reid等的太阳耀斑爆发说、Clark的超新星爆发说、Alvarez等的小行星撞击说和许靖华的慧星撞击说,则以天体突变的灾变事件来解释地球生物的绝灭,成为“新灾变论”。

我国学者对事件地层研究作出了很多贡献。黄汲清教授在庆祝中国地质学会成立六十周年的报告中强调指出,要加强对新灾变论的研究。杨遵仪教授介绍了国外对生物大规模绝灭的研究现状。许靖华、何起祥和孙枢教授等探讨了白垩纪末和前寒武纪末的生物大绝灭现象。徐道一、张勤文、孙亦因等系统介绍了天体现象和古生物绝灭的关系,并发现了一系列界线的异常,为小行星和陨石撞击说提供了新证据。

风暴事件研究是本世纪70年代的新课题,与浊流沉积一样,也是地方性的突变事件,但风暴事件的记录主要保存在浅海陆棚区正常波浪基面之下的地带。风暴作用常形成粒级分选和丘状起伏交错层理;地层中常见的贝壳层和竹叶状灰岩也是风暴作用的产物。风暴层在地层剖面中经常出现,甚至占主要地位;砂岩席和贝壳层则常延伸几百公里以上,使地层对比的精度提高几百倍,并且成为盆地深浅和距岸远近的可靠指征。

深海钻探计划和氧碳同位素研究,大大加深了对古气候的认识,发现了古气候的突发性阶跃事件,使人们对地球气候变化的原因和机制的认识大大深化。我国学者刘东生等据此直接对比了海、陆地层,发展了气候地层学。吴世迎、郑淑蕙等则发展了氧同位素地层

学。

我国的地层发育齐全，化石丰富，有许多连续的界线剖面，对于发展事件地层学极为有利。今后我国学者必将在这一古生物学和地层学新领域中作出更多更大的贡献。

齐文同所写的《事件地层学》一书，系统介绍了国内外对风暴层、气候阶跃事件和古生物大规模绝灭研究的新成果和新理论，材料丰富、论点明确，是研究事件地层学的有用资料，教学的重要参考材料。因此，我向广大的地层学、岩相古地理学与古生物学工作者和院校师生推荐这本书。

乐森珥

1987.7.

目 录

序

第一章 前 言	1
第一节 事件地层学的研究对象.....	1
第二节 事件地层学发展简史.....	2
第二章 风暴事件和风暴层	4
第一节 概述.....	4
第二节 砂质风暴层.....	13
第三节 脊椎动物骨屑风暴层.....	26
第四节 灰岩风暴层.....	29
第五节 贝壳层.....	44
第三章 缺氧事件和黑色页岩的形成	57
第四章 古气候事件	59
第一节 古气候变化.....	59
第二节 气候阶跃事件.....	61
第三节 同位素地层学和气候地层学.....	66
第五章 生物绝灭事件	70
第一节 生物大规模绝灭.....	70
第二节 白垩纪末的生物绝灭事件.....	74
第三节 二叠纪末的生物绝灭事件.....	81
第四节 晚泥盆世弗拉斯—法门期绝灭事件.....	91
第五节 前寒武纪末绝灭事件.....	91
第六章 古生物绝灭原因的假说	94
第一节 概 述.....	94
第二节 漂浮植物兴衰说.....	94
第三节 盐度变化说.....	95
第四节 气候波动说.....	97
第五节 太阳耀斑说.....	98
第六节 地磁极性反转说.....	99
第七节 超新星爆发说.....	102
第八节 小行星冲击说.....	105
第九节 彗星冲击说.....	110
参考文献	114

第一章 前言

第一节 事件地层学的研究对象

事件地层学又称新灾变论,是地质学的一门新学科,专门研究地质历史上突然发生的灾变事件及其地层记录。地方性的风暴、浊流、洪水、地震和火山爆发,大到全球性的海平面升降、气候突变和古生物大规模群绝灭,都是事件地层学研究的对象。

灾变事件的主要特征是突然发生和具有非周期性,是与渐变性和旋回性的变化相对而言。灾变事件的能量巨大;风暴和浊流的能量比波浪和海流能量大几个数量级,超新星爆发的能量则可以等于整个星系发光的能量。

风暴事件的记录普遍见于各浅海地层剖面。因为风暴波基面比正常波基面深得多,所以风暴层常在浅海陆棚沉积中占主要地位。贝壳层和化石混带现象、浅海碎屑岩和碳酸盐岩的粒级分选层理,多数是由风暴造成的;砂岩席、海绿石层和脊椎动物骨屑层也与风暴有关,成为地层对比的标志层。风暴层可以指示古海水的深度。风暴岩的出现频率、碎屑粒度和层理特征,以及由近岸到深水的规律性变化则反映海盆地的相和古地理,有利于寻找石油和砂矿资源。

过去根据冰川和冰盖的研究认为第四纪只有4个冰期。但深海钻探的连续岩心和氧同位素测定发现,73万年来已有9个冷暖旋回。这一发现不但丰富了对新生代的古气候认识,还促使人们研究气候突发的阶跃变化和冰期与间冰期交替的原因。根据氧同位素对比深海钻孔的岩心地层,并且与黄土剖面代表的干湿气候变化直接对比,则开创了氧同位素地层学和气候地层学方法。

古生物大规模绝灭现象,曾使古生物学者和达尔文主义的进化论者长期迷惑不解。突发的绝灭是生物进化的一个重要方面,使生物的分异度减小,分区性下降,大多数特化类群消失,构成了划分地质历史的一些代和纪的分界标志。二叠纪末绝灭的动物科数高达当时总科数的52%,还有人估计二叠纪末有96%的种死亡,这真是生物发展历史上的一场大灾难。白垩纪末绝灭的属数也占当时总属数的52%,绝灭的种数则占75%。除了古生代和中生代末的大规模绝灭之外,生物的大规模绝灭还见于寒武纪末、奥陶纪末和晚泥盆世等。这些绝灭事件无法用达尔文的渐变发生论和莱伊尔的现实主义原理来解释,促使地质学者和古生物学者综合运用古生物学、地层学、古地磁学、微量元素和碳氧同位素地球化学以及天文学等学科的知识 and 新技术方法加以说明,并且探索地外的突然事件,如太阳辐射的变化、地磁场倒转、超新星爆发、小行星和彗星冲击等对地球和生物界的影响。

事件地层学用人类直接经验之外的多种偶发性自然因素来解释地质学的重大疑团,大大深化了对地球历史、生物进化和区域地质发展史的认识,有力地批驳了神创论和不可知论。这种新灾变论扩展了将今论古的现实主义原理的内容,成为新的均变论,避免了旧均变论的机械唯物论的局限性,而突出了质变、爆发和飞跃在地质历史和生物发展史中的地

位和作用。

第二节 事件地层学发展简史

一个半世纪以前,居维叶和布朗雅尔对巴黎盆地的研究得到了广泛赞扬。他们发现了白垩纪与第三纪界线上明显的生物变化,认为是灾变的结果。19世纪初的古生物学者大都赞成居维叶和他的学生d'Orbigny的观点,认为全世界动物界和植物界的发展史中有突然的变化,并以此作为划分地质时代和地层单位的依据。

莱伊尔的现实主义原理和均变论,从现代状况出发来认识地球的历史,认为地球当前的性质和状态都是代表地球“正常的”历史状况。他主张,地球历史上的变化只是地方性的变化,从整体上仍在人类的经验范围之内,而整个地球的状况保持不变。甚至当发现了更新世冰期以后,莱伊尔仍认为那只是暂时偏离了现实的情况。达尔文提出了生物进化论,主张物种是变化的,变异、遗传和自然选择是生物进化的主要原因。达尔文为了反对物种不变论和神创论的旧观念,甚至提出了自然界没有飞跃的命题,把地质学者和古生物学者所发现的大量间断和突变归因于地质记录的不完整性,企图否定突变的存在。

后来的地质学者和古生物学者普遍接受了莱伊尔和达尔文的均变论观点,但传统的地层划分和对比则一直沿着“灾变论者”d'Orbigny的方法和原则发展,因为化石记录一般都是不连续的。Hedberg领导的国际地层划分委员会经过长期努力,层型和界线层型的观点日渐深入人心。但现代的研究者都深切体会到,寻找地层连续、生物连续和所代表的时间连续的界线层型剖面是何等困难的任务。

19世纪末的地壳变动旋回论者有Suess,Chamberlin,Grabau和Stille等。Chamberlin把海平面升降运动与生物大规模绝灭联系起来。生物地层学者重新定义阶(Stage)时则以生物入侵和绝灭事件为根据。但他们未能超越均变论的思想体系。

魏格纳1915年提出了大陆漂移说,后来发展成板块学说,大陆和海洋的重新排列成为世界性偶发的灾变幕和地理气候巨大变化的依据,有可能成为生物大规模绝灭的原因。本世纪50年代以来,生物大规模绝灭现象成了热门的研究课题。各国学者提出了许多假说,探讨生物大规模绝灭的原因,如Moore(1954)的造山运动影响海陆面积变化说、Stokes(1960)的气温变化说、Newell(1963)的海平面变化说、Uffen(1963)的古地磁极性反转说、Cloud(1959)的有害金属元素毒化说、Beurlen(1965)的盐度变化说、Bretsky等(1970)的气候区变化说、Lipps(1970)的生物习性特化说、Valentine(1971)的食物营养说和Vogt(1972)的火山爆发说等。近年来更出现了Reid(1977)的太阳耀斑爆发说、Clark(1977)的超新星爆发说、Alvarez等(1980)的小行星撞击说和许靖华(1980)的彗星撞击说,用天外原因解释生物绝灭现象。尤其是小行星撞击说和彗星撞击说,引用了深海钻探的连续岩心资料,并且综合运用很多现代研究手段,大大加深了人们对生物绝灭和地球发展历史的认识。60年代以来,全球生物发展的间断性更得到了大量统计资料的证明(Newell,1967, Sepkosky, 1982)。

我国学者对事件地层学的研究做出了很多工作。王鸿祯(1979、1980)多次总结地质构造和生物界发展的阶段性。杨遵仪、徐桂荣(1984)介绍了国外的生物大类群绝灭假说。许靖华、何起祥、孙枢等(1980、1982、1986)探讨了白垩纪末和前寒武纪末的大绝

灭现象。殷鸿福等(1984)分析了二叠纪末的生物群交替。张勤文(1984)、徐道一等(1985)和李子舜等(1986)研究我国前寒武系、二叠系和白垩系顶部界线地层并发现铀异常,为小行星和彗星撞击说提供了进一步的证据。

吴世迎等(1982)开创了氧同位素地层学研究,用以对比深海地层。刘东生等(1982)更将黄土剖面与深海钻探岩心直接对比,创立了气候地层学方法。

刘宝珩等(1980a、b)和陈源仁(1985)等介绍了国外风暴层研究动态,刘宝珩等(1986)和刘光华(1987)还研究了我国的碳酸盐岩风暴层。

综观我国事件地层学的研究尚在发展之中,对于风暴事件和气候阶跃事件的研究著作还很少。因此本书以较新资料全面介绍国内外事件地层学研究的观点方法和实例,供广大地质学和古生物学工作者、研究人员和院校师生参考,希望能起到抛砖引玉的作用。我国幅员辽阔,岩相多样,化石丰富,研究基础雄厚,在事件地层学研究的新领域中必能做出更大的贡献。

本书编写时得到本系和教研室领导支持鼓励,谨致谢忱。

第二章 风暴事件和风暴层

第一节 概 述

一、风暴层的特征

1. 地方性事件沉积的种类

当代地质学家认识到,沉积岩形成和化石埋藏过程中时常发生各种激烈的突然事件。许多地方性的事件,如风暴、洪水、浊流、地震、陨石和火山爆发等,其沉积过程历时虽短,但能量常比正常沉积作用大几个数量级;这些事件的沉积物也常占地层柱的大部分,并具有独特的岩性、层序和生态,对地层对比、盆地分析和进化论的研究均有很大的作用和意义。

风暴事件是一种强烈的地方性事件,大飓风的风速可达200km/h,能量相当于400颗2,000t级的氢弹。风暴层几乎见于各个浅海地层剖面中

2. 风暴层的形成

风暴期间,气压下降和大风应力引起的风暴潮,可以在海岸带形成异常的高潮位,随后水位又剧烈下降。风暴时产生强烈的波浪扰动,向海返回的退潮流还可以将大陆架的近岸沉积物搬运到滨外,再沉积于海底上。

在陆缘海和浅海区,风生流和波生流的搬运和沉积作用往往超过潮流。一般的潮差不超过2—3m,最大潮流速度不超过30cm/s。而白令海陆架东南部,冬季风暴期的波浪作用最强,平行海岸的剩余流近表层速度可达50—70cm/s,飓风引起的风暴潮流则为1m/s左右,甚至足以造成海底冲刷。

风暴是形成古代陆棚层理的主要因素。在风暴最大时,浅海底受到波浪剥蚀,粗碎屑物和贝壳经漂选形成蚀余沉积,细砂、粉砂和泥则进入悬浮状态。风暴衰减时细砂和粉砂很快沉积,一部分渗入到蚀余沉积物上部的孔隙内,大部分则形成弱粒级分选层,具有水平层理和清晰的波痕层理。

Hobday和Reading(1972)首先把风暴和正常气的概念用于古代沉积物研究。Ager 1973年提出风暴岩(tempestite)一词,代表由风暴流作用形成的特殊沉积物组合。

风暴期间的近岸波浪的作用和性质大大改变。正常天气的波浪多是低幅度长周期的涌浪,只能在较浅的水体中搬运中等数量的沉积物。风暴时高能量短周期的波浪,则可以使波基面变深并且搬运大量沉积物。这两者的沉积物的搬运方向也不同:天气好时波浪的底部波向岸流动,使碎屑物沉积在海滩上部,近岸环流体系弱时海滩有扩大的趋势;风暴天气时波浪变陡,向岸的底部波能量减小,由其供给海滩的沉积物也随之减少,增强的离岸流则带走大量沉积物。海滩剖面的研究表明:好天气时海滩面扩大,风暴时海滩面缩小,此二者反复交替,称为海滩旋回。

大风暴还会将风成的砂丘脊推向陆地或局部破坏,障壁岛内的蚀积扇则推进到泻湖里。风暴的作用各处不同,局部发生大规模侵蚀和大规模堆积。

现代的墨西哥湾大陆架上,全新统底部的海浸砂和现代淤泥混合,结构逐渐变化。外来的现代陆架泥受风暴波浪和底栖生物的作用,改造成底部的海浸砂相,具有不规则纹理和大量斑点。临滨带的海浸砂分选良好,粒度向海的方向减小,成为单向粒度分布;由临滨带渐变到远岸带,沉积物的分选不佳,粒度向海或向岸方向减小,成为双向粒度分布,甚至不同层的沉积物粒度成多向分布。风暴对沉积作用的主要影响,是由于风暴波浪对陆架沉积改造的深度,远大于好天气的波基面;风暴落潮流和风生流则增强了稳定的潮流和洋流。

风暴层容易保存,因好天气波浪能量较低,好天气风浪波基面的深度远小于风暴浪基面的深度。

3. 风暴层特征

风暴流和浊流都是海洋环境的扰动事件 (turbulence event),都形成非旋回性沉积,都可以与好天气沉积的稳定地层和周期性沉积的岩层相区别。风暴沉积和浊流沉积 (turbidite) 的共同点是:

- 1) 具有特征的剥蚀构造和沉积构造,能显示事件中水体扰动的开始、顶峰和减弱。
- 2) 使有机沉积物 and 无机沉积物重新分布。
- 3) 改变底质硬度、食物组成和底栖生态环境。
- 4) 密度流的流态逐渐减低,形成向上变细的层序。

但风暴流兼有波浪和退潮流的流水作用,浊流则只有低密度流的流动作用。二者的区别是:

- 1) 风暴岩的粒度分选层厚度不稳定或成透镜状,粒度分选层与平行层理的层段之间粒度突变;浊积岩的粒度分选层厚度稳定,延伸远,粒度渐变。
- 2) 风暴岩具有由波浪和流动作用共同形成的层理,如丘状交错层理、浪成砂纹层理和浪成上叠砂纹层理等;浊积岩则只有由水流形成的层理。
- 3) 风暴岩底面的槽模铸型较少,有侵蚀充填构造的沟槽模铸,其内工具痕的方向不同甚至相反;浊积岩的底面印模构造主要是槽模和各种单向工具痕,成雁行状排列。
- 4) 风暴岩具有特殊的渗滤组构和逃逸钻穴。
- 5) 风暴岩主要出现于正常波基面之下的陆棚环境;浊积岩则主要见于深水环境。

4. 风暴的剥蚀作用和底质

均一底质的压实程度常向下方递增,剥蚀作用的强度增加时将达到固结程度越来越高的层。只有最后一次剥蚀作用的底界才能保存下来。

风暴作用减弱期形成粒度分选层。均匀沉积物的层理形态随水流能量递减和碎屑搬运方式而异。但风暴作用的沉积物多数不均匀,不同大小、形状和比重的颗粒沉降速度也不同,就形成粒度分选层。碎屑的性状(如粒度和比重等)成多峰态分布时,沉积层常有间断。

风暴沉积作用最接近剥蚀与沉积二者对应的理想沉积旋回。风暴扰动以波浪为主,位置比较固定,沉积物的横向搬运较弱。风暴层的底质常包含以前事件的沉积记录,剥蚀作用的性质也随之变化。松散的砂质沉积物的性质一般很难由剥蚀作用的记录来推测,砂层

中的贝壳层或砾石层则阻碍剥蚀作用。泥质沉积物保存以前事件的记录较多，原先的剥蚀面在风暴事件的间歇期被沉积物进一步压紧。碳酸盐质淤泥保存的事件记录常变得最坚固，早期成岩作用首先胶结埋在砂屑灰岩或贝壳沉积之下的淤泥层受剥蚀的表面。这些淤泥层的表面经历多次埋藏和再剥蚀后，变成越来越坚固的基准面（reference horizon）。埋藏一再剥蚀事件和坚硬底质（hard ground）的形成，常与浅海风暴沉积中的压实层（condensation horizon）有关，一般在海退期较多。压实层虽可出现各种扰动事件，但浊流和洪水的横向搬运较强，其压实作用都不如风暴层明显。

浅海的原生沉积物大多是暂时停积的，下次风暴可以将其再搅起来，继续向下带向盆地中心。沉积岩是由多次剥蚀和沉积事件形成的最终结果。只有最强的风暴事件才能保存记录；较弱事件的痕迹则多被强风暴事件所消除。海相地层中的事件压实程度和自生矿物是重要的相标志，能在横向上区分近源带（proximal zone）或远源带（distal zone），并在垂直剖面上区分海底下降和沉积作用较迅速或较缓慢的层段。

在理想情况下，风暴扰动发展过程中的剥蚀期和衰减过程中的沉积期是对应的（图2-1）。

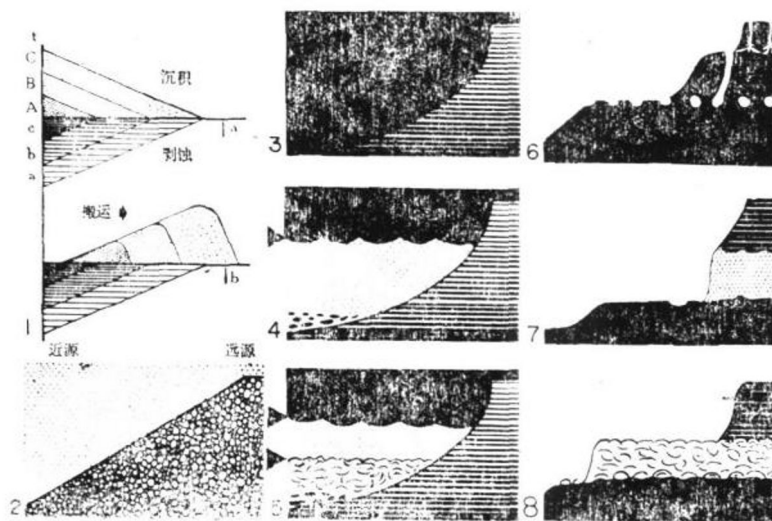


图 2-1 风暴事件剥蚀和沉积作用的近源梯度示意图

1—剥蚀和沉积作用的对应性：1a—对应，1b—不对应；2—均匀底质；3~5—压实程度向下递增的底质的剥蚀和沉积作用；3—单成分为主的混合物沉积物，4—二种成分为主的砂泥混合沉积物，5—三种成分为主的贝壳、砂、泥混合沉积物；6~8—底质记录风暴以前的事件：6—生物扰动层，7—砂质风暴层，8—贝壳质风暴层（据Seilacher, 1982）

图2-1中1a表示在理想情况下，剥蚀平面a—c和沉积平面A—C应当与扰动事件的近源程度相对应。但风暴期间水体向岸聚集或沿斜坡向下的重力流常搬运沉积物，使远源带经弱剥蚀后沉积大量沉积物，或近源带强烈剥蚀成的硬底质上没有沉积盖层（图2-1，1b）。浊流和洪积作用的最大扰动峰在事件过程中横向移动，各地的剥蚀强度和沉积作用很少对应。

图2-1中的7图表示沉积物沿垂直方向和水平方向的变化（垂直比例尺显著夸大），水体能量由左到右递减。只有均一底质的剥蚀强度才与水体能量成正比（图2-1，2）。底质不均

匀则产生不均匀的剥蚀：底质下部的压实程度逐渐增加时，较深部位的剥蚀逐渐减少（图2-1的3—5）。图2-1中的6—7表示剥蚀作用沿底质的层理面进行，在很大范围内暴露层理面。对于沉积作用，只有事件沉积物均匀时沉积作用才会连续。事件前经过分选的沉积物，颗粒大小成多峰态分布，造成黑箭头处沉积记录间断（图2-1，4、5）。风暴间歇期海底暴露的表面可能受水动力作用改造，如贝壳定向改变和波痕的改造，或者受生物作用改造形成遗迹化石等。

5. 冲刷事件和充填事件

（1）概况 风暴的冲刷作用和充填作用常间隔较长时间。这个间隔对古生物学研究是很重要的：生物群落可以占居冲刷后的表面，冲刷的沟穴还可以形成化石陷阱（fossil traps），有利于化石保存。砂层冲刷构造中的砂质充填和泥质充填，都是陆棚特有的构造。因此研究冲刷事件和充填事件对古生物学和沉积学意义都具有重要意义。

过去认为冲刷构造形成后很快就被充填了，泥质充填常紧跟着冲刷事件。但冲刷面上有生物居群时，充填事件之前常有一段间隔时间；泥砂互层的充填物则很可能在一段时间内形成。

下面所讨论的冲刷构造有显著的高差，主要出现在陆源泥质、粉砂质和砂质沉积物中，平坦面的横向延伸一般不超过几米。

（2）沉积作用的分离

1) 泥质充填的冲刷构造 广见于浅海相地层中的未受成岩作用和风化作用加强之处，这种构造常被忽视。典型的泥质充填的冲刷构造是细砂岩层中剥蚀成的一个沟槽或小沟（图2-2，4，5）。

英国德文郡下中泥盆统和南威尔士上志留统，泥质充填冲刷构造的形状变化类似于砂质充填构造，以沟槽形为主，单独或成组平行排列。平行的泥质充填沟槽切入细砂岩，常被风化成为裸露砂脊，以前被当做暴露于水面以上的证据，现在则认为是水下冲刷和充填形成的（如Bloos, 1976; Goldring and Langenstrassen, 1979）。有些冲刷构造的泥质充填继砂质充填之后（图2-2，2），或者以球粒充填为主。

还常见到不太规则的较大冲刷沟内有泥质充填，泥质充填物风化后留下圆浅凹地冲刷构造。前者的边缘下切深，成为窄冲沟，高差显著；后者的边缘则受到冲刷，进一步剥蚀后只有砂层保存在泥质充填物之下。从沟槽—成组平行沟槽—合并沟槽—圆浅凹地冲刷—剥蚀残迹，似乎形成一个发展系列。泥质充填常与粒级分选的砂岩席、很轻微的平截和蚀去泥壳伴生。砂质底质常有生物集群。

准同期剥蚀作用所暴露的沉积物常有很大内聚力，使粉砂级的粒级分选沉积物悬空（图2-3，4），形成尖锐的爪状构造。另一个例子是法国诺曼底半岛基莫利阶下部的粉砂层：砂泥质界面处在泥质盖层之下形成的*Gyrochorte*，当泥质盖层剥蚀到粘性盖层之后，可被*Glossiungites*切穿（图2-3，1）。在砂泥质互层沉积中，泥质常比砂层容易被剥蚀（图2-3，3），至多稍比砂层坚固。但现代河流和潮间带的沉积层受准同期剥蚀时，泥质夹层易于成片碎落成泥质砾石。

2) 砂质充填的沉积构造 充填作用常与剥蚀作用同期，有些砂质充填的沉积构造强烈下切或成阶梯状边缘。砂质充填沉积构造常沿垂直向重复出现，形成冲沟套冲沟（scour-in-scour）。这是因为沟槽可以局部充填，成为以后事件涡流的开始；并且充填物比沉积

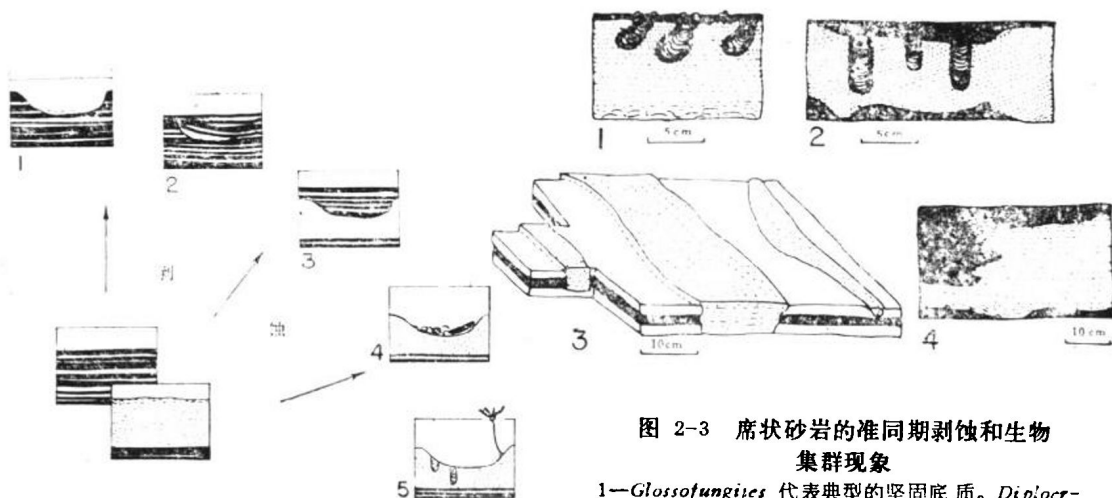


图 2-2 主要沟槽类型的形成过程

1~2—立即充填：1—典型的沟槽和铸型，2—局部砂质充填的饥饿沟槽；3~5—滞后充填和事件分隔：3—夹层充填，4—化石陷井，5—生物扰动群集

(据Goldring and Aigner, 1984)

图 2-3 席状砂岩的准同期剥蚀和生物集群现象

1—*Glossofungites* 代表典型的坚固底质。*Diplocraterion*切穿尚未固结的沉积物中所形成的 *Gyrochorte*。层状砂岩底部有贝壳质蚀余堆积。法国诺曼底，下基莫利阶；2—席状砂岩冲蚀的顶部，具有 *Diplocraterion* 钻穴和粉砂质页岩盖层。砂岩具有低角度交错层，底部有沟槽铸型。秘鲁，第三系；3—粗粉砂质充填的沟槽，切入粉砂岩（白色）夹页岩（黑色）层；4—水平层理细砂岩中下切的冲刷构造和所充填的页岩。细砂岩下方有底部痕迹。英国德文郡，下泥盆统马特夫特层

(据Goldring and Aigner, 1982)

层松。

冲刷与充填如果是不同的事件，就不能用充填沉积物的构造判断冲刷水流的方向。如德国三叠系贝壳灰岩中的沟槽铸型内的叠瓦状构造，其所指示的古水流方向和相邻的爬升波痕所指示的方向相反；挪威下志留统砂质沟槽铸型，与该层顶部波痕的前积层所确定的搬运方向成 0° — 90° 角。如果冲刷与充填的事件不连续，二者水流的来源和方向就可能不同。但在许多很厚的地层中，不同类型的沟槽铸型常有主要定向：方向与粗粒沉积物指示的水流方向一致。

泥质和砂质充填的不同冲刷构造，以及冲刷事件和充填事件的间隔时间较长的构造，是成岩期陆棚沉积的典型构造，尤其是滨前一滨外相。浊流相沉积中的泥质充填构造不普遍。

(3) 古生物意义 区分冲刷和充填事件对古生物研究有两个作用。首先是冲刷出的底质可供表生动物聚居，生物在底质上移动、钻穴和穿透底质。粒级分选层受生物扰动时，此前已有的顶部扰动常很明显（图2-3, 2）。冲刷的凹处有利于化石保存，免受剥蚀（图2-2, 4），如西德南部侏罗统的一个洞穴和泥质充填的冲蚀坑保存海胆。南威尔士上志留统的黑鸡层，粗粉砂岩席和页岩的地层与薄粉砂岩互层。东西向的卵形剥蚀坑（ $3.0 \times 1.2 \times 0.08\text{m}$ ）切入钙质粗粉砂岩，局部泥质充填，1979年发现坑中三个关节相连的 *Craniops* sp.，一个近完整的海百合、许多成对的 *Pteronitella* sp. 壳瓣、分离的 *Ferganella nucula* 壳瓣和环节动物虫管等，与同期席状粉砂岩的破碎贝壳堆积恰成对照。前

者更好地代表了原生动物群落。

总之冲刷作用与充填作用有时间间隔的沟槽在陆棚相地层中普遍而典型,说明冲刷事件达到了已受到压实和成岩作用的层位,并且改变了化石保存状况。

6. 风暴层远端的多向古水流特征

(1) 砂岩席 远岸陆棚区的风暴波基面达到深水,风暴沉积层难于和浊流沉积层区别。Gray和Benton (1982) 提出,多向古水流 (multidirectional paleocurrents) 是识别风暴底流的重要标志。这里风暴浪涌潮落引起的底流占主要地位,影响悬浮物沉降,最后成为密度流进入远岸陆棚区。

英格兰西部下志留统的胡夫雷页岩,为泥岩和薄层砂岩互层,虽具有浊积层的面貌,但显示了风暴作用。席状砂岩厚1—20cm,横向稳定,底表有工具痕,中部有未磨蚀的化石,顶部有*Palaeophycus*、*Chondrites*和*Diplocraterion*等生物扰动和三叶虫迹。此砂岩席的主体为粒径0.02—0.1mm的层状砂和粉砂,并具水平层理,交错层理和爬升波痕,其中多层有剥蚀和充填的交错层及压扁的粉砂岩披盖,而无明显波痕。

(2) 多向古水流 采集了两块定向石板,面积约1m²。根据单向生物成因的工具痕(针管痕和沟痕)的最深部位测定其古水流方向,分别以20°间距绘成玫瑰图。其中A石板的工具痕混乱交切,没有主水流方向;B石板的工具痕显示两个主要方向,南南西和南西西,二者的频率相近,均与斜坡浊流不同。

兰多维里期末的古海岸线约在研究区以东150km,陆棚边缘在西面40km。胡夫雷页岩层的砂岩席虽貌似浊积岩,但有许多风暴沉积的证据:

- 1) 处于陆棚环境,有本地的底栖生物。
- 2) 工具痕成多向分布,代表多向古水流。
- 3) 砂岩内有贝壳层和粗砂层,岩层底面和上方有风暴浪涌流的爬升交错层理。
- 4) 砂和粉砂的分选良好,反映其上的水体中有悬浮荷载。
- 5) 砂层向上突然过渡为背景泥质沉积。

7. 风暴事件的生态序列

我们的生活经验往往夸大了风暴灾害的直接破坏,但风暴事件的后延效应对地质和生态的影响更大。

风暴的剥蚀作用常广泛干扰浅海底栖和浮游生物群落,把尸体搬到海滩环境或混入上覆的事件层。风暴扰动的范围有限,邻区未受影响的生物群落必定会迁回风暴区,但事件后群落的性质和种的构成常与原生群落不同,如近源风暴区受剥蚀的海底裸露,或在砂质、贝壳或卵石等沉积之后,不再继续沉积泥质。风暴后较坚硬或较粗的底质上重新栖居的动物群,必定不同于当地原生的动物群(如牡蛎、腕足类、棘皮动物、叠层石或者舌形菌迹的坚固底质钻穴动物组合)。稳定底质和坚硬底质的群落,以及附生动物群落或原地贝壳灰岩,都可以做为例证。

事件的压实作用常常形成“假群落系列”,反映底质在以后的一系列事件中变成熟(图2-4),而不是生物之间的相互依存和生态序列。这些事件之间被埋葬或重新活动的间歇所分隔。此图若在箭头处加上一些无直接证据的事件就好理解了。

即使事件沉积物表面仍为泥质,粒度和原来的泥底质一致,事件后的群落也常与原先的群落不同。这种区别在浊流形成的复理石相中最明显。扰动前的原生钻穴常保存为该底

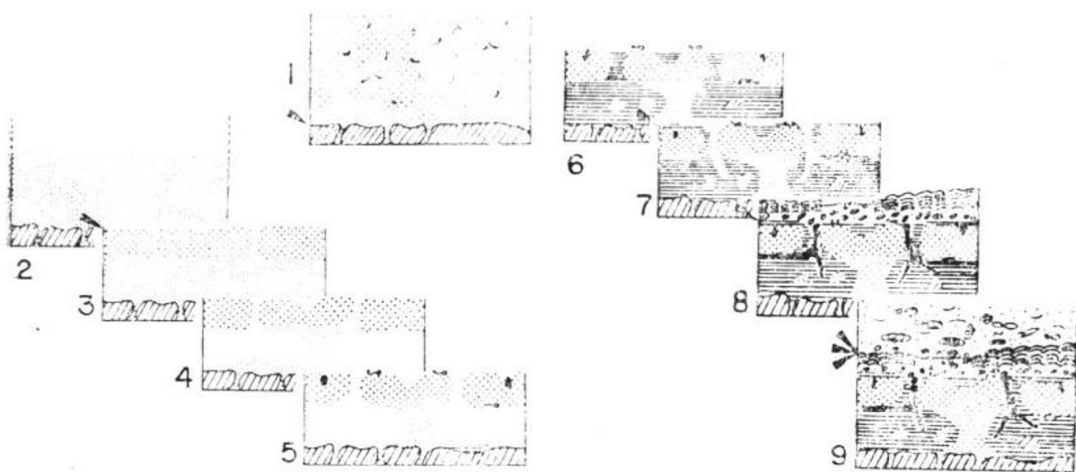


图 2-4 中侏罗统一个剖面的复杂历史

1—玛丽埃尔沉积顶层软底质内，食淤泥生物连续扰动迹；2—剥蚀后的坚固底质被第一代 *Thalassinoides* 钻穴；3—上述层位被埋葬，变成坚硬底质后重新钻穴；4—在坚硬表层之下，沿原先的钻穴冲刷出一些空穴；5—结壳生物和钻穴生物栖居于石质底表；6—空穴被泥质充填；7—底质重新活动后，压实的充填物被第二代 *Thalassinoides* 钻穴；8—底质经过多次活动后，被残留的似核形石覆盖，叠层石在底质表面结壳；9—底质被多次重新埋葬，上面覆盖颗粒和来自不同层位的按大小分选的化石

(据 Püschel, 1971)

面上的模铸，有利于扰动后的单相生物群落掘到不同层位的钻穴。这主要反映了食物供应的变化：扰动前的原生动物群落，依靠透光带内不断下落的生物分解产物生活；但扰动后当地再沉积（或事件），从陆棚区搬运来的食物碎屑则集中在粒级分选层理的事件沉积顶部。因而事件后的群落分子的组合较为偶然，居群密度虽高，但种的分异度较低并且逐渐改变。此外扰动后的群落以直接食淤泥的生物占优势，扰动前的钻穴密度较小但很规则。

风暴和洪积事件前后的淤泥钻穴也有区别，但特征较不明显。根据事件前后钻穴的区别，或者不同粒度交界处，钻穴群落的层位，可以确定事件沉积层的顶面。

8. 风暴事件的埋藏顺序

灾变事件直接造成死亡的生物只有一小部分成为化石。但原地埋藏的腕足动物群落可在浅海砂岩层底部几厘米内成生活、保存，未经剥蚀或搬运。著名的索林霍芬石印灰岩中，事件带来的节肢动物保存在它们最后足迹的末端。

较活泼的动物被掩埋时，能钻过窒息性的沉积物，向上掘出通道，留下逃逸迹 (escape track)。实验中当掩埋物的厚度超过 30cm 时，或者沉积物很细时动物就不易逃跑了。完整的棘皮动物化石也常见于事件沉积层顶部，可能因细淤泥阻塞了棘皮动物的步带系统，造成死亡。

事件沉积的实体化石多数受到次生变化。贝壳灰岩的原生实体化石的出现频率，可能比原来生长在淤泥中的化石更能反映表栖和内栖动物群的本来面目，因为早期成岩作用常首先溶解淤泥中的文石质贝壳。

“自生沉积作用 (cannibalistic)”形成的风暴岩经多次再沉积后，贝壳灰岩的动物群构成也将变化。文石质贝壳埋藏时受后生作用变脆，首先消失，但每次风暴过程中都有新的贝壳加入。其次溶解的是方解石质壳。然后是高镁方解石质的棘皮动物，很快变成坚固的方解石，最后成为硬化的方解石。最耐腐蚀的是磷灰石质的骨骼，尤其是牙齿，埋藏

在富磷的沉积物中一般可以增加其耐蚀性。骨屑层 (bone bed) 中的软粪粒受磷灰石化而变硬, 经过反复埋藏和再沉积后破碎, 成为广见的碎屑。

多种贝壳成分的贝壳灰岩—方解石质贝壳层—海百合石灰岩—骨屑层, 构成一个分选沉积系列, 成熟度提高, 其地层分布则反映盆地内自生沉积和海退的程度。骨屑层富集于海浸—海退旋回的末期, 或者下一旋回重新沉积的开始。

但还应指出一些特殊情况:

1) 每个事件过程中都有新的贝壳加入, 事件沉积物可能总含有少量保存完好的脆弱化石。

2) 有些贝壳层中的“鬼影菊石” (ghost ammonites) 与共生的较新菊石保存得同样完好。“鬼影菊石”与下伏的多期硬底质和结壳的关系密切, 并且不同时代的菊石在聚集层中按大小排列, 是反复搬运的可靠证据。原地沉积的文石质软泥或鲕粒, 保护贝壳免受成岩作用的破坏; 风暴的再沉积则很罕见而且短促, 不能强烈地磨损化石。

3) 在一个岩层的复杂沉积过程中, 生态状况可以剧烈改变。起初的风暴沉积可能只含有重新搬运的软泥底质动物群的贝壳, 其后暴露海底表面的则可能是栖居于稳定底质的群落, 最终则为坚硬底质群落。各个群落的骨骼残骸和水流运来的异地贝壳, 都会加入最终形成的贝壳层里。

4) 早期成岩的胶结作用, 易于在剥蚀掉的淤泥质表面之下进行。压力影结核 (pressure shadow concretion) 可以形成于充满泥质的壳里, 大大加固贝壳, 使其在再沉积时不易破碎。压力影结核和正常结核可以成为再沉积的成岩碎屑 (diaclast)。多次生长的“间断结核 (hiatus concretion)”、固着生物的结壳和钻孔, 可以指示各碎屑的复杂形成历程。

二、研究风暴层的意义

1. 古环境意义

(1) 风暴岩的发生 非旋回的风暴沉积和浊流沉积广泛发生于浅海和深海, 图2-5对比这两种事件沉积的简化模型。风暴岩发生于正常波基面与风暴波基面之间, 但也常出

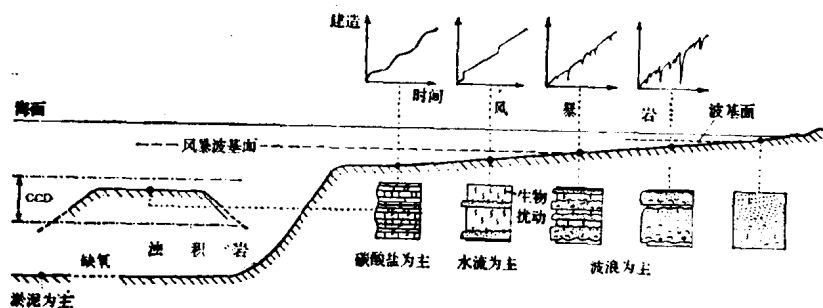


图 2-5 海洋中风暴和浊流的事件沉积

图中由近源到远源风暴岩的事件数目减少, 层的合并现象也减少, 生物扰动则保存较多。近源和远源风暴岩的层数都比较少

(据Einsele和Seilacher, 1982)

● 不同时代的菊石混杂出现在同一层中。