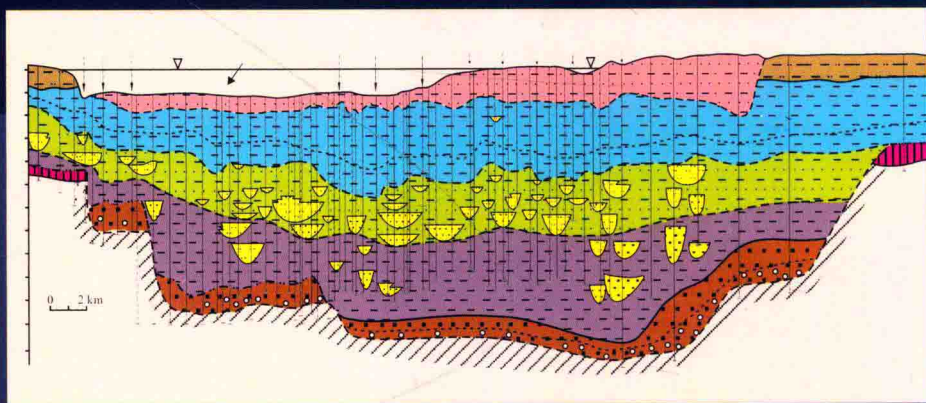




Late Quaternary Stratigraphy,
Sedimentology and Natural Gas Geology
in the Jiangsu-Zhejiang Coastal Plain

江浙沿海平原晚第四纪 地层沉积与天然气地质学



林春明 张 霞 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

江浙沿海平原晚第四纪地层沉积 与天然气地质学

林春明 张 霞 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书立足于江浙沿海平原大量钻井及岩心资料,结合静力触探、地震、电磁和分析化验等资料,以现代沉积学、第四纪地质学、层序地层学和天然气地质学为理论指导,剖析江浙沿海平原晚第四纪地层格架、下切河谷充填物沉积特征和沉积环境演变,恢复了晚第四纪以来下切河谷的形成演化历史。在此基础上,对分布在下切河谷内生物气的形成、富集成藏条件和有效的勘探方法进行深入研究,概算生物气的资源潜量,并与中国其他地区生物气的成藏特征进行了对比,对生物气的成藏模式和影响控制因素进行深入探讨。

本书在河口三角洲晚第四纪地层沉积序列和地层结构、下切河谷充填物沉积相变、下切河谷形成与演化,以及浅层生物气形成及富集成藏的特殊性、封闭机制、有效的生物气勘探方法和步骤等方面,均有重要创新,同时为河口三角洲第四纪地质学、沉积学、微体古生物学和天然气地质学等方面的研究提供了重要材料,可供相关地质科技工作者、高等院校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

江浙沿海平原晚第四纪地层沉积与天然气地质学 / 林春明, 张霞著.

—北京: 科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-056683-6

I. ①江… II. ①林… ②张… III. ①晚第四纪—地层学—研究—江苏②晚第四纪—地层学—研究—浙江③晚第四纪—石油天然气地质—研究—江苏④晚第四纪—地层—石油天然气地质—研究—浙江
IV. ①P535.2 ②P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第042294号

责任编辑: 王 运 姜德君 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 铭轩堂

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>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018年3月第一次印刷 印张: 15 1/2

字数: 368 000

定价: 158.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

天然气是清洁的绿色能源，在世界环境污染严峻的情况下，天然气的研究、勘探开发日益得到加强。非常规生物成因气在当今天然气资源量中占有相当分量，亟待开发的非常规天然气水合物资源量 97% 分布在陆坡和大洋中，其主要是生物成因气。因此，生物成因气无疑是天然气中的最多者，在未来能源研究、勘探开发中将逐渐突显其越来越重要的地位以及在能源结构上的重大意义。

《江浙沿海平原晚第四纪地层沉积与天然气地质学》著者主要从事沉积岩石学、沉积学、第四纪地质学和石油地质学等相关领域教学和科研工作，其学风严谨，善于实践，勇于探索，富于创新，在江浙沿海平原晚第四纪地层沉积与浅层生物气研究领域耕耘二十余年，主持多个国家科学研究项目，取得了丰硕成果，该书正是这些成果的升华和结晶。

该书的学术精华体现在以下两个方面：一是对江浙沿海平原和河口三角洲晚第四纪地层格架进行了深入解剖，特别是对业已埋藏的下切河谷形成过程与演化机制做了系统研究，推动了中国晚第四纪地层研究的向前发展，提供了典型河口三角洲晚第四纪地层沉积学、层序地层学和微体古生物学等科学素材；二是对晚第四纪下切河谷内浅层生物气成藏地质条件进行了系统研究，揭开了浅层生物气富集成藏的谜底，对浅层生物气勘探方法有了新认识，有助于其勘探开发取得更大突破，补齐了经济发达江浙沿海地区能源匮乏的短板，惠及当地百姓民生。该书的最大特点是将地层沉积和环境演化研究与浅层生物气成藏研究有机结合起来，完善了世界生物成因气成藏理论体系。

“将今论古”是地质科学基本指导思想，“古今结合”也同样重要，该书虽然是针对河口三角洲晚第四纪地层及其资源的研究，但对国内外古代河口湾、三角洲研究也有重要的借鉴意义。

《江浙沿海平原晚第四纪地层沉积与天然气地质学》展示了我国在晚第四纪沉积学和浅层生物气勘探领域的新进展、新观点和新水平，是该领域内一部系统的学术专著。该书出版必将丰富中国乃至世界河口三角洲地层沉积和浅层生物气地质学，推动这一领域的研究更加广泛深入，故该书的出版是可喜可贺的，值得大家一读，阅后定受益匪浅。



中国科学院院士

2017 年 7 月 30 日

前言

中国河口三角洲晚第四纪地层的研究大多集中在东部沿海地区,早期主要依据地貌学,后来采用沉积学、层序地层学、古生物学、地球化学和古地磁学等手段,研究地层的结构和演化史。河口三角洲是海岸带对海陆相互作用及全球气候变化最敏感地区,其所在的下切河谷体系可将这些地质记录较完好地保存下来。海岸背景下的下切河谷是由一个或多个海平面升降旋回形成的,被定义为与海平面下降有关、由河流下切作用形成、在海平面上升时期被充填的长条状地形,以区域性的地层不整合面为底界。20世纪80年代末以来,随着层序地层学的普遍应用,下切河谷的研究成为沉积地质学的一个热点,涉及从前寒武纪到现在几乎所有年代的地层。因河口三角洲晚第四纪地层形成时间短、侵蚀和改造作用频繁、沉积相变剧烈,国内外有关河口三角洲地区下切河谷体系的研究因缺少精细沉积序列描述,以及系统测年样品的采集和分析,而显得较为薄弱。江浙沿海平原地区有众多河流入海,其中钱塘江以潮汐汹涌、长江以含砂量大而闻名于世。晚第四纪以来,古钱塘江和古长江在江浙沿海平原以及东海大陆架上形成多期的下切河谷,内部赋存具工业开采价值的浅层生物气。对浅层生物气成藏地质条件的研究,要求把下切河谷形成演化、充填物沉积相特征和序列,以及层序地层格架的认识提高到一个精细的高度,为浅层生物气勘探和预测提供更充分的地质依据。为此,作者及研究团队成员从20世纪90年代以来先后主持了多个国家科学研究项目,项目名称及编号分别如下:

- (1) 末次盛冰期以来钱塘江下切河谷充填物沉积序列、年代格架及古环境演化 (No. 40872075);
- (2) 末次盛冰期以来钱塘江下切河谷充填物物源特征 (No. BK20140604);
- (3) 杭州湾地区全新世古河口湾沉积物源示踪 (No. 41402092);
- (4) 杭州湾地区全新世古河口湾砂体特征精细研究 (No. 41772097);
- (5) 杭州湾地区晚第四纪下切河谷形成及演化 (No. 20090091110023);
- (6) 浙江超浅层全新统生物气藏盖层空隙水压力封闭机理研究 (No. 40272063);
- (7) 杭州湾地区超浅层生物气充注与成藏模式研究 (No. 41572112)。

在项目执行过程中,不仅有许多新的发现,也纠正了过去某些错误的观点,从而带来了认识上的突破。本书以现代沉积学、第四纪地质学、层序地层学和天然气地质学为理论指导,剖析江浙沿海平原晚第四纪地层格架、下切河谷充填物沉积特征和环境演变,恢复晚第四纪以来下切河谷的形成演化历史,在此基础上,对生物气形成、富集成藏条件,以及其封闭机理机制和有效的勘探方法进行深入研究,对典型地区生物气的资源潜量进行概

算,提出生物气的成藏模式。主要研究内容体现在以下六个方面:①根据晚第四纪钱塘江与长江下切河谷充填物的岩性、沉积结构和构造、有孔虫、磁化率等资料,对下切河谷充填物的特征、沉积相类型和变化规律进行精细研究;②通过单个钻孔和孔间对比,对层序边界、初始海泛面、最大海泛面等关键界面进行研究,建立下切河谷和河口湾的充填演化模式,并与世界其他地区典型下切河谷和河口湾的充填演化特征进行对比,明确影响下切河谷和河口湾沉积的主要控制因素;③对晚第四纪浅层生物气形成、富集成藏条件、分布规律和模式,以及资源潜力进行深入解剖;④从盖层物理性质、力学性质、人工放气后储层和盖层物性变化等方面入手,对晚第四纪浅层生物气藏的盖层封闭机理进行研究,确定主要的封闭机理及其成因,并对直接盖层和间接盖层的封闭性能进行对比分析,特别是将静力触探孔隙水压力测试技术引入浅层生物气藏封闭理论研究中,提出孔隙水压力封闭可能对生物气藏保存起着最主要的封闭作用的新观点;⑤对晚第四纪浅层生物气藏的勘探方法进行分析对比,确定各种勘探方法的优劣,总结出有效的生物气勘探步骤;⑥对中国生物气成藏特征及影响因素进行总结。本书是对以上科学研究项目成果的较为全面的总结,为国内外河口三角洲晚第四纪地层研究及生物气勘探开发提供了一系列典型实例,丰富了下切河谷形成演化和生物气成藏理论。

本书是作者及研究团队成员二十多年来科研成果的总结,是集体劳动的产物。前言由林春明执笔,第1章由张霞、林春明、李艳丽执笔,第2章由张霞执笔,第3至第6章主要由林春明、张霞、李艳丽、曲长伟、邓程文、冯旭东执笔,第7章由李艳丽、林春明执笔,第8章由林春明、曲长伟、林培贤执笔,全书由林春明负责汇总编辑,江凯禧博士参加本书后期校正编辑工作。参加本书相关工作的还有卓弘春、周健、潘峰、张顺、姚玉来、李广月、漆滨汶、陈顺勇、于进和袁悦等研究生,他们在攻读学位期间对本书的完成付出了大量而艰辛的努力。衷心感谢中国科学院院士王德滋、王颖和戴金星的长期鼓励和支持,感谢李从先、业治铮、蒋维三、汪品先、周新民、冯增昭、钱奕中、黄志诚、高抒、宋岩和帅燕华等教授的指导,感谢张家强、邱桂强、关洪军、邢光福、徐振宇、郑红军、陈庆强、王红、蔡进功、范代读、杨守业、殷勇、季汉成、姜振学、李保华、殷启春、陈海云、于建国、寿建峰、沈安江、蒋义敏、曹剑和王彦周等同志的帮助,同时感谢石油及地质部门等有关单位及人员的支持和帮助。

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
第 2 章 区域地质背景	5
2.1 地理背景	6
2.2 水文特征	8
2.3 构造背景	11
2.4 底床形态及表层沉积物分布	12
2.5 东海陆架沉积速率和海平面变化	13
第 3 章 晚第四纪下切河谷充填物沉积特征	15
3.1 地层划分和对比	15
3.1.1 地层划分原则	15
3.1.2 地层年龄	15
3.1.3 地层划分	17
3.1.4 冰后期基底	17
3.2 沉积相类型	18
3.2.1 SE1 孔沉积相	18
3.2.2 SE2 孔沉积相	28
3.2.3 萧 3 孔沉积相	36
3.2.4 夹 4 孔沉积相	38
3.2.5 乔司农场 CK4 孔沉积相	41
3.2.6 雷 5 孔沉积相	43
3.2.7 头 9 孔沉积相	45
3.2.8 杭州湾水域 CH2 孔沉积相	47
3.2.9 ZK01 孔沉积相	48
3.2.10 ZK02 孔沉积相	57
3.2.11 HQ03 孔沉积相	64
3.2.12 HQ98 孔沉积相	66
3.2.13 NTK1 孔沉积相	68
3.2.14 T24 孔沉积相	70

3.2.15	CJK11 孔沉积相	72
3.3	河间地及河阶地沉积相	74
第 4 章	下切河谷充填物沉积序列和充填演化模式	76
4.1	沉积序列	76
4.1.1	地层结构及其控制因素	76
4.1.2	层序界面	77
4.1.3	典型剖面的沉积序列	79
4.1.4	电法剖面	87
4.1.5	沉积相序	90
4.2	充填演化模式	92
4.2.1	深切阶段	92
4.2.2	充填阶段	93
4.2.3	埋藏阶段	96
4.3	下切河谷沉积体系及层序地层学特征	99
4.3.1	定义和特征	99
4.3.2	层序地层学特征	100
4.4	下切河谷体系形成的控制因素及其沉积模式对比	103
4.4.1	海平面变化	103
4.4.2	沉积物供应	104
4.4.3	沉积过程	106
4.4.4	下切河谷形态	108
第 5 章	晚第四纪浅层生物气形成、富集成藏	109
5.1	浅层天然气化学组分特征及其成因	109
5.2	浅层生物气储层特征	111
5.2.1	储层类型	111
5.2.2	典型气藏剖析	112
5.3	浅层生物气源岩特征	125
5.3.1	气源岩	125
5.3.2	气源岩有机质的地球化学特征	129
5.4	浅层生物气形成机理及影响因素	154
5.4.1	生物气的形成机理	154
5.4.2	生物气形成的影响因素	156
5.5	浅层生物气资源量计算	159
5.5.1	总生气量计算	159
5.5.2	总吸附气量计算	161
5.5.3	总溶解气量计算	162

5.5.4	总扩散气量计算	163
5.5.5	总游离气量计算	165
5.5.6	生物气资源量计算的地质意义	165
5.6	浅层生物气分布规律	166
5.6.1	运移和聚集特征	166
5.6.2	生物气分布规律	167
第 6 章	晚第四纪浅层生物气藏封闭机理	170
6.1	盖层特征	170
6.1.1	盖层物理性质	171
6.1.2	力学特性	174
6.1.3	放气后沉积物特性变化	174
6.2	生物气藏封闭机理	175
6.2.1	毛细管封闭机理	175
6.2.2	孔隙水压力封闭机理	181
6.2.3	烃浓度封闭机理	183
6.3	生物气藏封闭机制形成因素探讨	184
6.3.1	人工放气后沉积物物性变化原因	184
6.3.2	孔隙水压力封闭机理的形成	184
6.3.3	直接盖层和间接盖层封闭性对比	186
6.3.4	孔隙水压力封闭的重要性	188
第 7 章	晚第四纪浅层生物气藏的勘探方法	189
7.1	生物气藏的勘探方法	189
7.1.1	静力触探	189
7.1.2	浅层横波地震勘探	200
7.1.3	土壤气氦勘探	201
7.1.4	微生物勘探	203
7.1.5	电磁勘探	204
7.2	勘探方法有效性与有效勘探步骤	207
7.2.1	各种勘探方法优点与不足	207
7.2.2	浅层气勘探的有效步骤	208
第 8 章	中国生物气成藏特征及其影响因素	209
8.1	柴达木盆地生物气成藏特征	209
8.1.1	第四系沉积相展布及沉积演化	210
8.1.2	气源岩条件	213
8.1.3	氧化还原性与酸碱度	215
8.1.4	储盖层及圈闭条件	216

8.2	中国生物气成藏特征	218
8.2.1	中国生物气藏分布	218
8.2.2	中国生物气藏类型	219
8.3	中国生物气成藏有利条件探讨	219
8.3.1	有利的生气条件	219
8.3.2	储层的物性条件及其规模	221
8.3.3	盖层封闭保存条件	222
8.3.4	早期圈闭及同沉积圈闭	223
8.3.5	生物气的不间断产生	223
参考文献		224

第 1 章 绪 论

天然气对世界上许多国家的经济发展起重要作用 (Badruzzaman, 2000; Surdam *et al.*, 2003), 预计到 2020 年天然气是世界能源消耗最快的部分 (Law and Curtis, 2002)。有机成因天然气主要有三种成因类型 (Martini *et al.*, 1998; Faramawy *et al.*, 2016): ①细菌甲烷成因气, 即生物成因气, 简称生物气; ②煤或干酪根的热裂解成因气; ③石油的二次裂解成因气。与煤或干酪根的热裂解以及石油的二次裂解成因气相比, 人们对生物气的认识还比较少, 研究的系统性、深度和广度也较差。随着天然气勘探开发形势的变化和认识的深入, 生物气藏越来越受到重视 (Shurr and Ridgley, 2002)。生物气不仅可以大量生成, 还可以大规模地聚集成藏, 因此, 对生物气的进一步研究有重要的理论和现实意义。

生物气主要由甲烷菌与厌氧细菌等微生物分解未成熟及低成熟源岩形成, 与热解气的区别在于其成分以甲烷为主, 含部分二氧化碳及少量氮气和其他微量气体组分 (Rice and Claypool, 1981; Warwick *et al.*, 2008); $\delta^{13}\text{C}_1$ 值一般小于 -55‰ (Schoell, 1983; 戴金星、陈英, 1993), 最小可达 -110‰ (Blair, 1998)。大型生物气藏主要位于白垩系至第四系地层中, 埋深数百米至 1000 多米 (Rice and Claypool, 1981; Anna, 2011), 在美国、加拿大、德国、意大利、西班牙、日本和俄罗斯等数十个国家都发现了具有工业或商业价值的生物气藏 (Shurr and Ridgley, 2002; 李艳丽, 2010)。在中国许多沉积盆地中也发现了具有工业或商业价值的生物气藏, 包括江浙沿海平原, 南海北部陆架区的莺琼盆地, 广西百色盆地, 云南陆良、保山、曲靖和昆明盆地, 洞庭湖盆地, 苏北盆地, 渤海湾盆地, 松辽盆地, 准噶尔盆地和柴达木盆地等 (林春明等, 2006a; 李艳丽, 2010)。此外, 在中国近海也分布着大面积浅层生物气, 如渤海湾、黄海、东海、珠江口、北部湾、琼东南近海、黄河水下三角洲外海海底等 (李萍等, 2010; 李阳, 2010)。

生物气的形成途径与沉积环境密切相关, 海相环境中以 CO_2 的还原作用为主, 淡水环境中则以乙酸发酵为主 (Whiticar *et al.*, 1986), 国内一些学者的试验结果也证实上述观点 (张辉等, 1992)。缺氧、贫硫酸盐、低温、富有机质和适合的细菌活动空间是生物成因甲烷形成的必要条件 (Rice and Claypool, 1981)。生物气生成与其所处的沉积环境、古气候、有机质类型和丰度、水介质性质、地质作用、沉积时间等众多因素密切相关, 它们相互作用、相互制约, 共同控制生物气的形成 (林春明、钱奕中, 1997)。生物可利用的有机质通常与浅的、年轻的沉积物相伴生 (Kotelnikova, 2002), 这些沉积物同时又具有足够的孔隙空间供甲烷生成菌利用 (Orange *et al.*, 2005; García-García *et al.*, 2007)。因此, 生物气主要富集在浅的、相当年轻的未成熟阶段沉积物中, 如陆相河漫滩、沼泽、稻田、缺氧的淡水湖泊、洼地淤积、河口湾、海湾、冰碛物以及硫酸盐还原带之下的海相沉积物等 (Rashid and

Vilks, 1977; Albert *et al.*, 1998; Lin *et al.*, 2004)。浅层生物气的存在很早以前就被认识到了, 在 Emery 和 Hoggan (1958) 最早报道海洋沉积物中存在生物气之后, 许多研究者对海洋近表沉积物和海岸沉积物中的生物气进行了研究 (Rashid and Vilks, 1977; Albert *et al.*, 1998; García-García *et al.*, 2007)。早期人们认为生物气虽然易于在浅层沉积物中生成, 但也易于散失, 难以大量聚集成藏, 经济效益低, 不能与深层大气田相比, 因此, 国内外虽有发现, 但未引起足够重视。直到 20 世纪 70 ~ 80 年代, 石油价格不断上涨, 生物气才以其投资少、见效快的特点受到重视。国外相继从微生物学基础和地质地球化学特征方面, 论述了生物气的生成机理和聚集条件, 探讨了生物气的鉴别标志和远景储量 (Rice and Claypool, 1981)。20 世纪 90 年代, 人们对海洋沉积物中的气体成因、甲烷形成的微生物作用过程, 以及气体地球化学特征、形成途径、运移特征和检测手段、成藏基本条件等给予更多关注 (Floodgate and Judd, 1992; Van Weering *et al.*, 1997)。由于浅层生物气分布广泛、埋藏浅、依据现有技术手段在地质上可以预测, 而且是一种清洁能源, 国外已将其列为研究和勘探的重要对象。

中国已发现的生物气多是其他油气勘探或开发的副产品。20 世纪 80 年代中国对生物气进行初步探讨, 分析了生物气形成途径、鉴别标志、生成和聚集的控制因素等方面问题 (戚厚发、戴金星, 1982; 张义纲、陈焕疆, 1983), “七五”至“八五”期间, 生物气的研究被纳入国家科技攻关项目, 主要是从沉积学、地球化学、微生物学和天然气地质学方面, 论述生物气的生成机理、形成和富集条件、地球化学特征和鉴别标志等 (陈安定等, 1991; 张辉等, 1992; 周燾虹等, 1994; 惠荣耀、连莉文, 1994; 顾树松, 1996), 取得了丰硕成果, 这对中国生物气勘探和成藏理论有重要意义。截至 2006 年年底, 中国现有探明生物气地质储量 2843.9 亿 m^3 , 占总地质储量 38629 亿 m^3 的 7.36%, 约为全世界所占份额的一半 (15.5%), 表明中国生物气资源潜力巨大 (卢双舫等, 2008)。中国晚第四纪浅层生物气主要分布在东部地区, 而东部重点又集中在江浙沿海平原。早在 50 年代, 上海、浙江等长江中下游地区就曾开展过第四纪浅层天然气的勘探开发工作 (王明义, 1982; 戚厚发、戴金星, 1982)。90 年代, 浙江石油部门在系统勘探第四系生物气过程中, 在国内外率先引进静力触探等技术, 使勘探成本大大降低、勘探效率显著提高 (林春明, 1995; 蒋维三等, 1997; Li and Lin, 2010), 在杭州湾地区发现了夹灶、义盛、九堡-下沙、雷甸、黄菇、海盐和三北浅滩七个具工业价值的浅层生物气田 (林春明等, 1994; Lin *et al.*, 2004)。这些生物气田的开发利用使当地一些乡、镇、村实现了“气化”, 取得了良好的社会效益 (陈英等, 1994; Lin *et al.*, 2004)。长江三角洲地区迄今为止主要经历了 1958 ~ 1961 年、1995 ~ 1998 年和 2014 年以来的 3 期浅层生物气勘探阶段, 取得了一定的认识和成果 (王明义, 1982; 郑开富, 1998; 林春明等, 2015)。

江浙沿海平原生物气藏主要分布于晚第四纪钱塘江和长江下切河谷内 (林春明等, 1997; Lin *et al.*, 2004)。下切河谷的研究开始很早, 但大部分早期工作者将沿不整合面分布的、孤立的下切河谷作为一个单独的连续沉积体划入更高一级地层单元, 或解释为非下切河道和三角洲分流河道, 从而忽略其存在。20 世纪 30 ~ 40 年代, 曾有人在北美地区发现古下切河谷体系并加以描述, 但大部分下切河谷是在区域地质填图过程中发现且仅出

现在地质报告中, 50 ~ 60 年代, 因在许多下切河谷中发现了油气层, 针对下切河谷的研究逐渐增多 (Dalrymple *et al.*, 1994)。80 年代末以来, 随着层序地层学概念的普遍应用, 下切河谷的研究成为沉积地质学的一个热点, 在此期间, 人们开展了大量的下切河谷沉积研究, 涉及从前寒武纪到现在几乎所有年代的地层 (Dalrymple and Zaitlin, 1994; Harris *et al.*, 2002; Vital *et al.*, 2010)。

晚第四纪下切河谷的最早研究为密西西比河, 其宽度最大达 80 km, 深逾 120 m (Fisk and McFarlan, 1955), 然后报道的有法国的罗纳河 (Oomkens, 1970)、吉伦特河 (Allen and Posamentier, 1993; Fénies *et al.*, 2010)、夏朗德河 (Weber *et al.*, 2004) 和莱尔河 (Fénies and Lericolai, 2005), 墨西哥湾的拉瓦卡河 (Wilkinson and Bane, 1977), 美国东海岸的詹姆斯河 (Nichols *et al.*, 1991), 加拿大科波奎德海湾的萨蒙河 (Dalrymple and Zaitlin, 1994), 澳大利亚北部的阿利盖特河 (Woodroffe *et al.*, 1989, 1993) 等, 此外, 非洲 (Cooper, 1993)、西班牙 (Dabrio *et al.*, 2000)、丹麦 (Huuse and Lykke-Andersen, 2000)、印度 (Bhandari *et al.*, 2005)、越南 (Ta *et al.*, 2001; Tjallingii *et al.*, 2010)、意大利 (Grippa *et al.*, 2011; Santis Caldara, 2016) 和日本 (Ishihara *et al.*, 2012; Tanabe *et al.*, 2013) 等地也相继报道了晚第四纪下切河谷的存在。前期研究集中于对下切河谷的识别及其内部充填物的描述, 这些研究所提供的下切河谷充填层序至今仍是多砂性河流下切河谷的重要实例, 明确指出海平面下降时期是下切河谷的形成阶段, 而海平面上升期为充填阶段 (Wescott, 1993; Weber *et al.*, 2004; Breda *et al.*, 2007), 也有人认为河谷的下切可能发生在海侵期 (Khadkikar and Rajshekhar, 2005)。下切河谷体系中可识别出低水位、海侵和高水位体系域沉积 (Allen and Posamentier, 1993; Weber *et al.*, 2004)。不同下切河谷, 其内部沉积物充填模式各异, 但一般沉积环境自下而上可从陆相经由河口湾相, 转变为开阔海相, 其中河口湾相很常见且非常重要 (Dalrymple *et al.*, 1994; Hori *et al.*, 2001a); 有时下切河谷仅被河流相 (Simms *et al.*, 2006) 或开阔海相沉积物 (Allen and Posamentier, 1991) 充填, 或未被充填 (Posamentier *et al.*, 1992)。随后下切河谷的研究则集中于控制和影响下切河谷位置、形态和充填模式的因素, 包括海平面的变化、构造运动、气候、沉积物供给、水动力条件、基岩地质和古地貌等 (Dalrymple, 2006; Tessier, 2012)。因下切河谷体系形成的影响因素众多, 下切河谷的形成和充填过程极为复杂, 至今仍没有令人满意的充填模式。Allen 和 Posamentier (1993, 1994) 对法国 Gironde 河口湾进行研究, 识别出了层序界面、海侵面、最大海泛面和不同体系域, 并建立了晚第四纪 Gironde 河下切河谷的层序地层学演化模式, 在这类实例分析基础上, Zaitlin 等 (1994) 提出了下切河谷的层序地层学模式和地层格架。之后, Lericolais 等 (2001) 利用高分辨率地震剖面, 证实了吉伦特河口湾近海处存在的下切河谷在离河口湾口岸 50 km 处逐渐减弱, 底部层序边界的深度向海逐渐减小, 而且局部被波浪冲刷作用面截断至平均海平面以下 70 m, 由此认为在低水位期, 河流不总是形成连续跨大陆架的下切河谷。Simms 等 (2006) 认为下切河谷的相结构是体系域类型、沉积物供应速率和海平面变化相互作用的结果, 可进一步划分出欠补偿和超补偿两种类型, 前者的充填结构可以用 Zaitlin 等 (1994) 提出的模型解释, 主要受河流、波浪和潮流作用的相对强度控制; 而后者缺少中部的河口湾段, 由外部河流——三角洲段和内部河流段组成, 在

整个海平面升降过程中都形成三角洲沉积。然而这些模式和层序地层学研究主要是以浪控型或波浪-潮汐混合控制型下切河谷为研究对象,仅包括简单的波浪作用为主的河口湾下切河谷体系的基本因素,且这些下切河谷都是由一些小型的山前河流所形成的,关于潮控型下切河谷模式的研究相对较少,尚需深入研究。

中国晚第四纪下切河谷的研究起步较晚,主要从20世纪80年代开始,相继在长江及东海大陆架(李从先等,1979;陈中原、杨文达,1991;刘振夏等,2000;李广雪等,2004)、钱塘江(李从先等,1993;林春明,1996;Lin *et al.*, 2005)、珠江(李春初,1981;韦惺、吴超羽,2011)、滦河(李从先等,1985)、南流江(孙和平等,1987)等河口三角洲地区发现了晚第四纪下切河谷,并对其形成、充填演化,以及控制和影响下切河谷位置、形态和充填模式的因素等方面进行了研究(Zhang *et al.*, 2014)。晚第四纪以来,随着海平面变化,下切河谷演化主要经历了深切、快速充填和埋藏三个阶段(Lin *et al.*, 2005)。强潮型的钱塘江下切河谷体系由陆向海纵向上可划分为陆向段、近陆段、近海段和海向段,表现为不同的沉积相组合(Zhang *et al.*, 2014)。由于不同地点及不同时空尺度、河谷形态、沉积坡度、沉积物供应和海面变化幅度、速度的影响,强潮型的钱塘江下切河谷体系模式与Zaitlin等(1994)建立的波浪型下切河谷体系模式具有许多不同之处(张霞,2013):①最大海侵时,海水淹没下切河谷及大片的古河间地,海水通常直达该区的山麓地带,在其上沉积了广泛的近岸浅海相沉积;②该模式代表了贫砂的小河河口湾,由于泥砂量少,河口湾在最大海侵线附近,而钱塘江本身虽然泥砂量不大,但它靠近水浊砂丰的长江,长江三角洲南翼的前展,使河口湾不断向海扩展,同时也使河口湾较下切河谷的范围要大得多;③在波浪作用为主的下切河谷体系中存在河口砂坝、中央盆地、湾顶三角洲,可以用它们来划分这种下切河谷,但在强潮型的钱塘江下切河谷体系中,则没有这些沉积单元,因此其分段依据也不尽相同;④虽然Zaitlin等(1994)建立的波浪型下切河谷体系模式涉及溯源堆积在下切河谷充填中的作用,但对其强度估计不足。钱塘江河口湾的实例表明,溯源堆积可形成厚达数十米的河流相沉积,而且这一充填过程发生在下游河段,时间上在河口湾形成之前。因此,只有正确认识和评价溯源堆积在下切河谷中的作用,才能建立反映真实情况的充填沉积模式。

第 2 章 区域地质背景

江浙沿海平原地区位于中国东部，地处长江下游，包括江苏省、浙江省和上海市，东濒黄海和东海，气候具有明显的季风特征（图 2-1）。江浙沿海平原地区是中国典型平原河网地区，水系发达，江滩、河滩和湿地众多，大小不一的河流纵横交错。长江和钱塘江是江浙沿海平原最为著名的河流。本书主要以钱塘江和长江第四纪下切河谷及其赋存的生物气资源为研究对象。

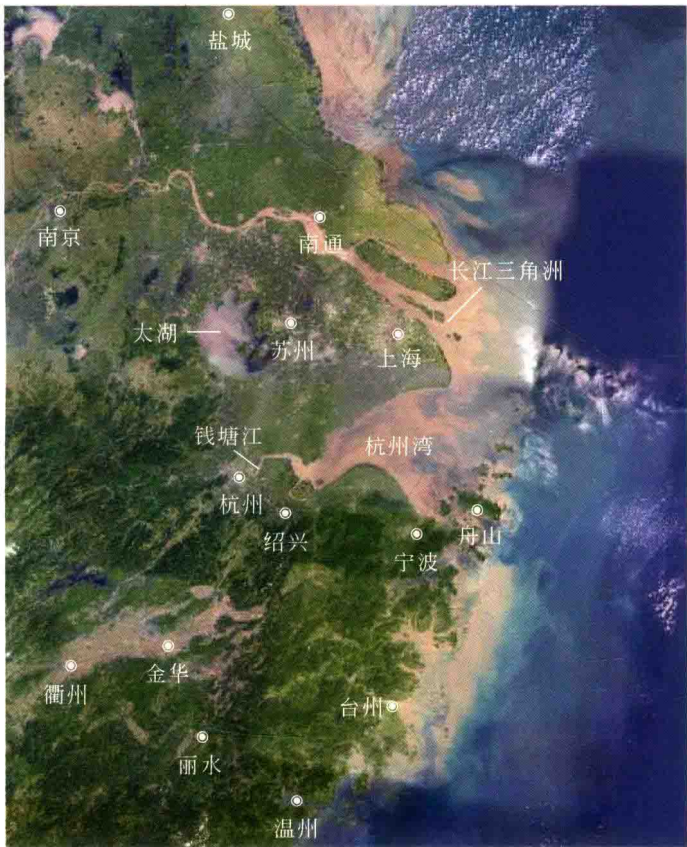


图 2-1 江浙沿海平原地理位置图

2.1 地理背景

钱塘江源自安徽省休宁县西南部,干流流经皖、浙两省,穿杭州湾流入东海,全长 605 km,流域面积约 $4.88 \times 10^4 \text{ km}^2$ (许建平、杨义菊, 2007)。钱塘江河口区位于 $120^\circ \sim 122^\circ \text{E}$, $29^\circ 50' \sim 30^\circ 50' \text{N}$, 面积约 $2.0 \times 10^4 \text{ km}^2$; 其地处浙江省东北部、上海市南部, 北与长江口毗邻, 南与象山港为邻, 东有舟山群岛为屏障, 并与东海相接 (图 2-2 和图 2-3A)(Zhang *et al.*, 2015), 包括沪、杭、甬等 13 个市县的三角地带, 是整个长江三角洲经济区的南翼, 在中国的经济发展中占有重要的地理位置。现代钱塘江河口湾为中国第一大强潮河口湾, 该地涌潮波澜壮阔、举世闻名, 吸引了无数游客, 钱塘江流域丰富的历史文化遗址更是受到了国内外人文学者的关注, 其从潮区界芦茨埠至湾口全长 270 km, 平面上呈典型的喇叭状 (图 2-2 和图 2-3)(Zhang *et al.*, 2015)。芦茨埠至闸口约 90 km 的河口段, 两侧受山体约束, 自西南往东北方向顺直流出; 闸口至湾口长 180 km, 河口逐渐转折向东, 进入宽广的海岸平原区, 于澉浦至余姚、慈溪市交界处的西三连线汇入杭州湾 (许建平、杨义菊, 2007)(图 2-3B)。湾口南汇嘴至镇海宽达 100 km (平均潮位), 向内逐渐收缩, 澉浦处骤减为 21 km, 上游八堡一带仅为 3.5 km, 杭州处则缩为 1 km, 该河口

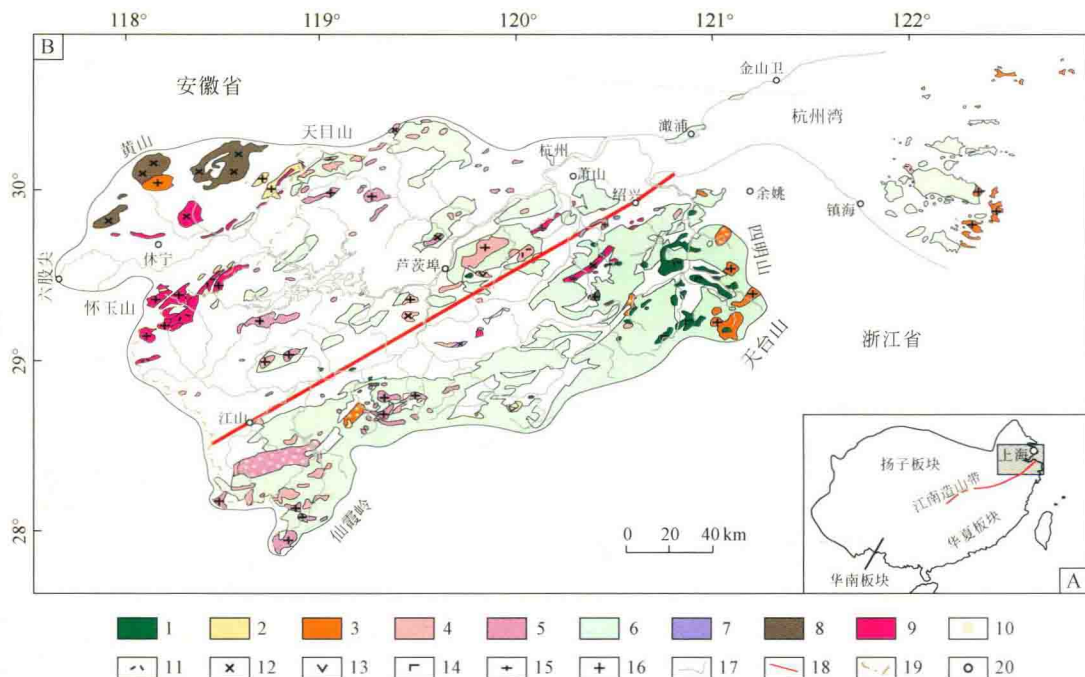


图 2-2 现代钱塘江河口湾流域地质及构造背景图 (修改据 Zhang *et al.*, 2015)

- A. 现代钱塘江河口湾和长江三角洲构造背景图; B. 现代钱塘江流域地质图。1. 新生代; 2. 晚白垩世; 3. 早白垩世晚期; 4. 早白垩世早期; 5. 晚侏罗世侵入岩; 6. 晚侏罗世火山岩; 7. 早侏罗世; 8. 三叠纪; 9. 新元古代; 10. 石英二长岩; 11. 流纹斑岩; 12. 花岗闪长岩; 13. 安山玢岩; 14. 橄榄玄武岩; 15. 石英闪长岩; 16. 花岗岩; 17. 河流; 18. 江山-绍兴断裂; 19. 省边界; 20. 城镇

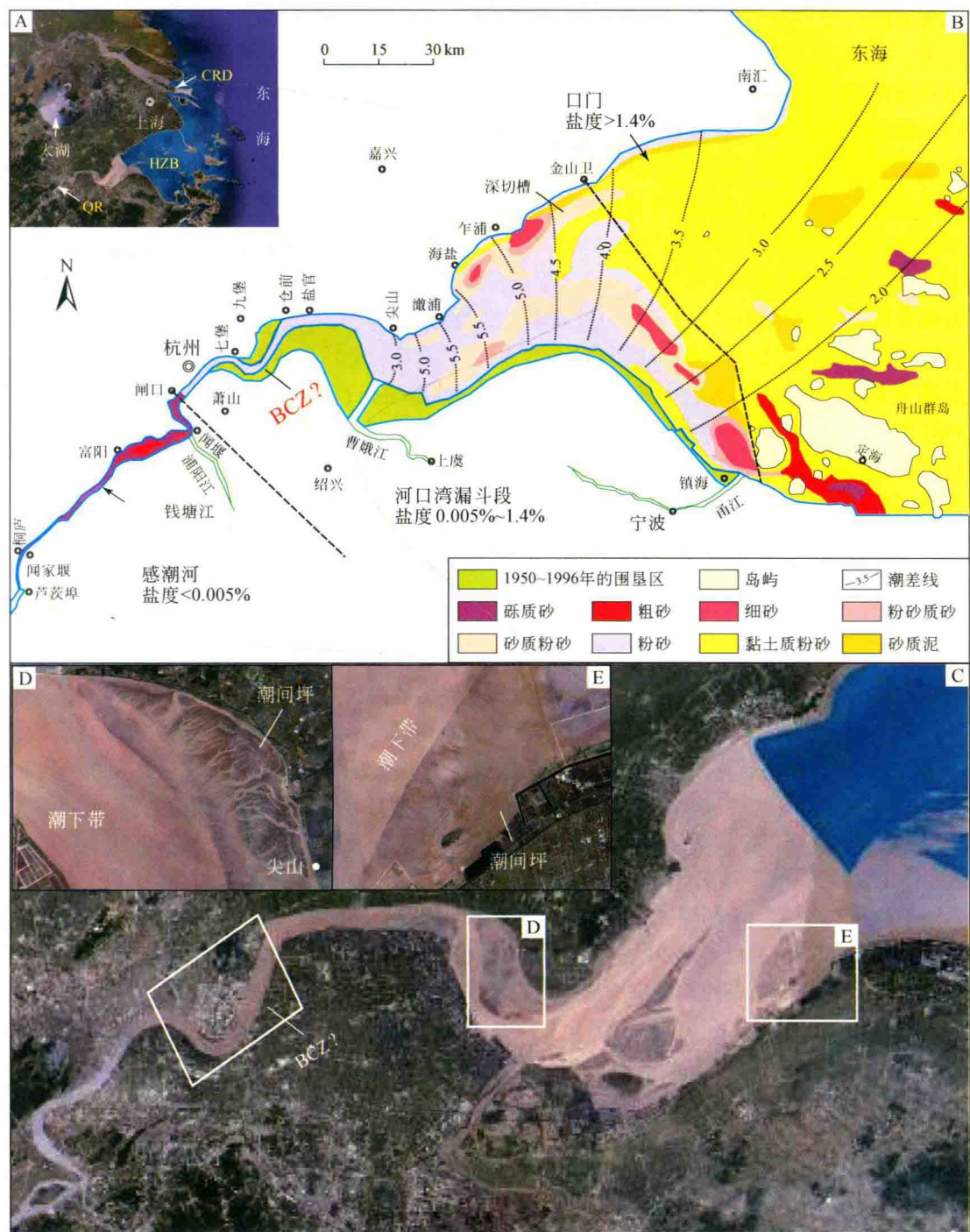


图 2-3 钱塘江河口湾地理位置及现代沉积特征

A. 现代钱塘江河口湾地理位置图 (卫星图片); B. 现代钱塘江河口湾地区平均潮差和表层沉积物分布特征 (修改自 Fan *et al.*, 2012); C. 现代钱塘江河口湾卫星图片, 其平面呈喇叭状; D. 现代钱塘江河口湾尖山区沉积特征, 主要包括潮下带粉砂质砂和潮间带泥坪沉积, 泥坪最大宽度为 2.5 km、面积超过 2.5 km²; E. 现代钱塘江河口湾庵东湿地地区沉积特征, 仍主要包括潮下带粉砂质砂和潮间带泥坪沉积, 泥坪最大宽度和面积分别可达 6.5 km 和 128.7 km². HZB. 钱塘江河口湾; CRD. 长江三角洲; QR. 钱塘江; BCZ. 口外沉积物和陆向沉积物的交汇部位, 沉积水动力最弱, 粒度最细