



## 中国晚新生代构造-沉积-古气候事件的地质记录

胡健民<sup>1,2</sup>, 闫纪元<sup>3</sup>, 程瑜<sup>4</sup>, 刘晓波<sup>5</sup>

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;
3. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049;
4. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210049;
5. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054

**摘要:** 中国区域地质调查工作的重点正在转向大面积覆盖区为主的平原、盆地、草原、荒漠等地区, 向深部三维调查拓展。第四纪松散沉积层覆盖区区域地质调查的核心是揭示晚新生代地表过程、圈层相互关系, 探讨人与自然的关系, 服务于国家生态文明建设与生态环境保护。然而, 覆盖区进行地质填图一个很大的难处是第四纪松散沉积层的侧向延伸往往很不稳定, 要特别重视重要构造-沉积-古气候和古环境事件, 如重要的不整合面、侵蚀面、火山岩层、湖相沉积, 重要的海侵层、古气候沉积(如黄土、红土、黑土), 古文化层等。它们可以作为第四纪松散沉积层侧向对比的重要标志, 并且往往具有等时性。东亚大陆构造演化及现代地貌特征主要受两大地球动力系统所控制, 西部印度-欧亚板块碰撞、高原快速隆升并向北东方向扩展, 东部太平洋板块向欧亚大陆俯冲消减并在东亚大陆东缘形成复杂的沟-弧-盆系统。两大构造系统作用奠定了晚新生代以来中国地质演化背景, 导致地球深部过程和地表环境发生重大变革。总体表现为青藏高原隆升、东部岩石圈伸展减薄, 最终塑造了现今的宏观地貌形态和水系格局。本文针对第四纪松散沉积物覆盖层的这些特点, 对中国晚新生代以来重要构造-沉积-古气候事件进行了梳理, 总结了晚新生代这些重要事件的地质记录, 特别是重要的沉积层、侵蚀面、不整合面、海侵层等, 以便在覆盖区区域地质调查时对第四纪松散沉积层进行区域性对比。

**关键词:** 区域地质调查; 覆盖区地质填图; 晚新生代; 构造-沉积-气候事件; 水系演变; 海侵

## GEOLOGICAL RECORDS OF LATE CENOZOIC TECTONO-SEDIMENTARY-PALEOCLIMATIC EVENTS IN CHINA

HU Jian-min<sup>1,2</sup>, YAN Ji-yuan<sup>3</sup>, CHENG Yu<sup>4</sup>, LIU Xiao-bo<sup>5</sup>

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
2. Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;
3. National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China;
4. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China;
5. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

**Abstract:** The focus of China's regional geological survey is being shifted to the largely overburden areas such as plains, basins, grasslands and deserts, and to the deep three-dimensional survey as well. The regional geological survey in Quaternary loose sediment covered area aims to reveal the surface process and the relationship between different spheres in late Cenozoic, and to explore the relationship between man and nature. However, a great difficulty in geological mapping in the covered area is that the lateral extension of Quaternary loose sediments is commonly unstable. Special attention should be paid to significant tectonic, sedimentary, paleoclimatic and paleoenvironmental events, such as unconformities, erosion surfaces, volcanic rocks, lacustrine deposits, transgressive layers, paleoclimatic

收稿日期:2022-05-27;修回日期:2022-06-06. 编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“特殊地质地貌区填图试点”(DD20160060).

作者简介: 胡健民(1959—), 男, 博士, 研究员, 从事构造地质学与区域地质学研究, 通信地址 北京市海淀区民族大学南路 11 号, E-mail//546045354@qq.com

deposits (loess, laterite, black soil, etc.) and paleocultural layers. They are often isochronous and can serve as important signs of lateral correlation of Quaternary loose sediments. The tectono-geomorphic evolution of East Asian continent are mainly controlled by two geodynamic systems: the Indian-Eurasian plate collision in the west, making rapid uplift and northeastward extension of the plateau, and the subduction of the eastern Pacific plate towards the Eurasian continent, forming a complex trench-arc-basin system on the eastern edge of the East Asian continent. The two tectonic systems have established the geological background of China since late Cenozoic, resulting in significant changes in the earth's deep process and surface environment. The overall performance is the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau and the extension and thinning of eastern lithosphere, which finally shaped the current landform and water system pattern. According to these characteristics of Quaternary loose sediment cover, this paper analyzes the important tectono-sedimentary-paleoclimatic events since late Cenozoic in China, and summarizes the geological records of these events, especially the important sedimentary layer, erosion surface, unconformities, transgressive layers, etc., so as to make a regional comparison of Quaternary loose sediment in the regional geological survey of the covered area.

**Key words:** regional geological survey; geological mapping of overburden area; Late Cenozoic; tectonic-sedimentary-climatic event; water system evolution; marine transgressive

## 0 引言

进入新时期,生态文明建设与生态环境保护成为国家目标,国家对区域地质工作提出新的要求.根据国内外区域地质调查本身发展状况与水平<sup>[1-4]</sup>,我国区域地质调查工作的重点转向大面积覆盖区为主的平原、盆地、草原、荒漠等地区<sup>[4-6]</sup>以及高山峡谷区<sup>[7]</sup>、岩溶区<sup>[8]</sup>,向深部三维调查拓展<sup>[4,9-11]</sup>.改变以往区域地质调查工作中涉及到第四纪沉积物覆盖区时简单处理的填图方式,在超浅层覆盖区重点查明覆盖层之下基岩地质结构的同时,浅覆盖区及深覆盖区更多地关注第四纪沉积物所记录的构造、沉积、古气候与古环境信息<sup>[6,12-18]</sup>.不久前发布的《覆盖区区域地质调查规范(1:50 000)》(DD2021-01)提出,覆盖区区域地质填图必须以地球系统科学理论为指导思想,以目标地质体调查部署工作,在地表地质调查基础上,充分利用现代地球探测技术,包括高分辨率遥感影像解译、DEM数据处理,各种地球物理、地球化学探测技术方法以及钻探技术等等<sup>[6,19-22]</sup>,适应大数据时代数字信息管理与应用,建立地质调查信息系统和数据库,全方位提升地质调查成果的服务能力<sup>[23-24]</sup>.尤其要充分融合不同学科理论和技术方法,由原来单一的基础地质调查向综合的、多目标调查转化,推进并实现地质调查成果由原来单一的为地质矿产专业和部门服务转向为整个社会多元目标服务.

因此,第四纪松散沉积层覆盖区区域地质调查的核心是揭示晚新生代地表过程、圈层相互关系,探讨人

与自然的关系,服务于国家生态文明建设与生态环境保护.然而,覆盖区进行地质填图一个很大的难处是第四纪松散沉积层的侧向延伸往往很不稳定<sup>[25]</sup>,特别是冲洪积层、山前粗碎屑岩层以及一些陆相沉积盆地等,在填图过程中依靠有限的沟壑、路壑以及钻孔剖面图等,很难正确地把同一套地层或者地层单元连接.于是,在《覆盖区区域地质调查规范》中明确提出,要特别重视重要构造-沉积-古气候和古环境事件,如重要的不整合面、侵蚀面、火山岩层、湖相沉积,重要的海侵层、古气候沉积(如黄土、红土、黑土),古文化层等.它们可以作为第四纪松散沉积层侧向对比的重要标志,并且往往具有等时性.

东亚大陆构造演化及现代地貌特征主要受两大地球动力系统所控制,西部印度-欧亚板块碰撞、高原快速隆升并向北东方向扩展,东部太平洋板块向欧亚大陆俯冲消减并在东亚大陆东缘形成复杂的沟-弧-盆系统<sup>[26]</sup>.两大构造系统作用奠定了晚新生代以来中国地质演化背景,导致地球深部过程和地表环境发生重大变革.总体表现为青藏高原隆升、东部岩石圈伸展减薄,最终塑造了现今的宏观地貌形态和水系格局.本文针对第四纪松散沉积物覆盖层的这些特点,对中国晚新生代以来重要构造-沉积-古气候-古环境事件研究成果进行梳理,总结晚新生代这些重要事件的地质记录,特别是重要的沉积层、侵蚀面、不整合面、海侵层等,以便在覆盖区区域地质调查时对第四纪松散沉积层进行区域性对比.

## 1 晚新生代重大构造运动与地貌格局

### 1.1 晚新生代以来喜马拉雅运动分期

晚新生代构造事件与高原快速隆升、构造地貌形成和气候变化紧密相连, 青藏运动和昆黄运动导致青藏高原快速隆升, 由此塑造了现今的构造地貌格局。青藏高原隆升及重要的构造运动划分存在不同的方案<sup>[27-29]</sup>。

喜马拉雅运动可分为青藏运动、昆黄运动和共和运动, 其中青藏运动可划分为 A 幕 (3.5 Ma)、B 幕 (2.6 Ma) 和 C 幕 (1.7 Ma)。A 幕以高原内外于 3.6 Ma 前后开始一个旺盛的砾石层堆积为标志; B 幕以大邑砾岩开始堆积为标志 (2.6~2.2 Ma)<sup>[29]</sup>; C 幕以河流开始强劲侵蚀为标志, 恒河、印度河、长江、黄河中上游过渡带最高阶地砾石层年龄约为 1.9~1.7 Ma。昆黄运动 (1~0.7 Ma) 则完成了青藏高原在更新世绝大部分的上升量, 奠定了高原地貌的基本格局, 并对周围大范围内的环境产生了深刻影响。共和运动 (0.12 Ma) 为最新一期喜马拉雅运动, 使黄河切穿龙羊峡进入共和盆地<sup>[30]</sup>, 鄂尔多斯高原快速隆起<sup>[31]</sup>, “吉兰泰-河套”古大湖形成<sup>[32]</sup>, 亦有研究者认为黄河于该次运动期间贯通三门峡<sup>[33]</sup>。

### 1.2 东部山脉的隆升及平原地貌的形成

中国东部太行山、燕山等山体和黄淮海平原的地貌差异, 是新生代以来构造演化的结果<sup>[34]</sup>。晚新生代以来, 以渤海湾盆地为核心的东部诸多盆地进入热沉降阶段之后, 受河湖相沉积物充填披覆, 中国东部逐渐由盆-岭地貌转变为平原地貌, 黄淮海平原逐步形成; 与盆地沉降相对应的, 则是以太行山、燕山、泰山、秦岭-大别山为主的构造山地的隆升以及层状地貌的形成<sup>[35]</sup>。

热年代学的证据表明太行山自晚白垩世以来的幕式隆升, 3 个快速隆升阶段分别发生在晚白垩世、古新世—始新世和渐新世—中新世以来。活动断层、夷平面、河流阶地以及盆地沉积特征的综合对比也展现了太行山新生代的阶段性隆升<sup>[36-41]</sup>。除太行山外, 黄淮海平原周边其他山脉如燕山<sup>[35, 42-44]</sup>、房山<sup>[45-48]</sup>、泰山<sup>[49]</sup>、沂蒙山<sup>[50-51]</sup>、秦岭-大别山<sup>[52-55]</sup>, 在新生代均表现出了与太行山相似的阶段性隆升。

太行山层状构造地貌代表的新生代幕式隆升, 与渤海湾新生代阶段性沉降彼此对应, 古近纪的隆升对

应了渤海湾盆地的裂陷过程, 导致太行山开始出现盆-山地貌差异, 中新世隆升则对应了盆地的热沉降过程<sup>[56-59]</sup>, 奠定了现今太行山与东部平原之间地形差异的基础。盆地中裂陷和拗陷阶段形成的古近系和新近系, 属于响应太行山当时的抬升、剥蚀—稳定、夷平过程的相关沉积; 渤海湾盆地基底、古近系与新近系不整合面、新近系与第四系不整合面, 分别对应太行山层状构造地貌中的北台面、甸子梁面和唐县面; 现今的平原是新近纪以来在古近纪形成的盆-岭地貌上整体沉降而形成的<sup>[36]</sup>。

### 1.3 东部陆架的沉降与海陆格局的形成

中国东部陆架分布有渤海、黄海及东海一系列边缘海, 这些边缘海的形成、演化与发育过程决定了中国东部海陆格局<sup>[60]</sup>。东部陆架地区闽浙隆起带及庙岛隆起的沉降, 控制了黄-渤海的形成, 为中国东部大规模的海侵提供了条件, 从而奠定了中国东部海陆格局<sup>[61]</sup>。同时还影响了大陆沉积物通过长江、黄河等河流向海域的输送, 控制了其沉积范围, 对中国东部的源-汇过程影响深远<sup>[60, 62-63]</sup>。

近年来在黄海和东海海域大量的钻探工作, 对闽浙隆起带 ESC-DZ1 孔<sup>[62]</sup>、南黄海西部 CSDP-1 孔<sup>[64]</sup>、冲绳海槽 U1428 站位钻孔<sup>[65]</sup>以及长江口 PD 钻孔<sup>[66-67]</sup>的研究, 揭示了闽浙隆起带第四纪的沉降过程<sup>[68]</sup>。与闽浙隆起带类似, 位于山东半岛和辽东半岛之间的庙岛隆起, 是分隔渤海和古黄海的天然屏障, 其在第四纪的构造演化控制了渤海从湖泊向海洋的转变<sup>[69-70]</sup>。

## 2 晚新生代沉积记录

### 2.1 青藏高原新生代沉积

通过对各个地层分区的残留盆地类型、形成构造背景、各分区内的岩石地层序列及其沉积特征、地层接触关系、时代确定依据与沉积演化过程的描述, 张克信等将青藏高原新生代的隆升及其沉积响应划分为 3 个阶段, 8 个亚阶段 (图 1)<sup>[71-72]</sup>。

俯冲碰撞隆升阶段 (65~34 Ma): 1) 初始碰撞 (65~56 Ma), 恒河前陆盆地和成都、塔里木压陷盆地形成; 2) 碰撞高峰期 (56~45 Ma), 高原北部柴达木-可可西里-羌塘压陷盆地和东北缘的兰州-西宁压陷盆地形成; 3) 全面完成碰撞 (45~34 Ma), 约 40 Ma 藏南新特提斯残留海消亡, 高原东缘走滑拉分盆地初始发育; 约

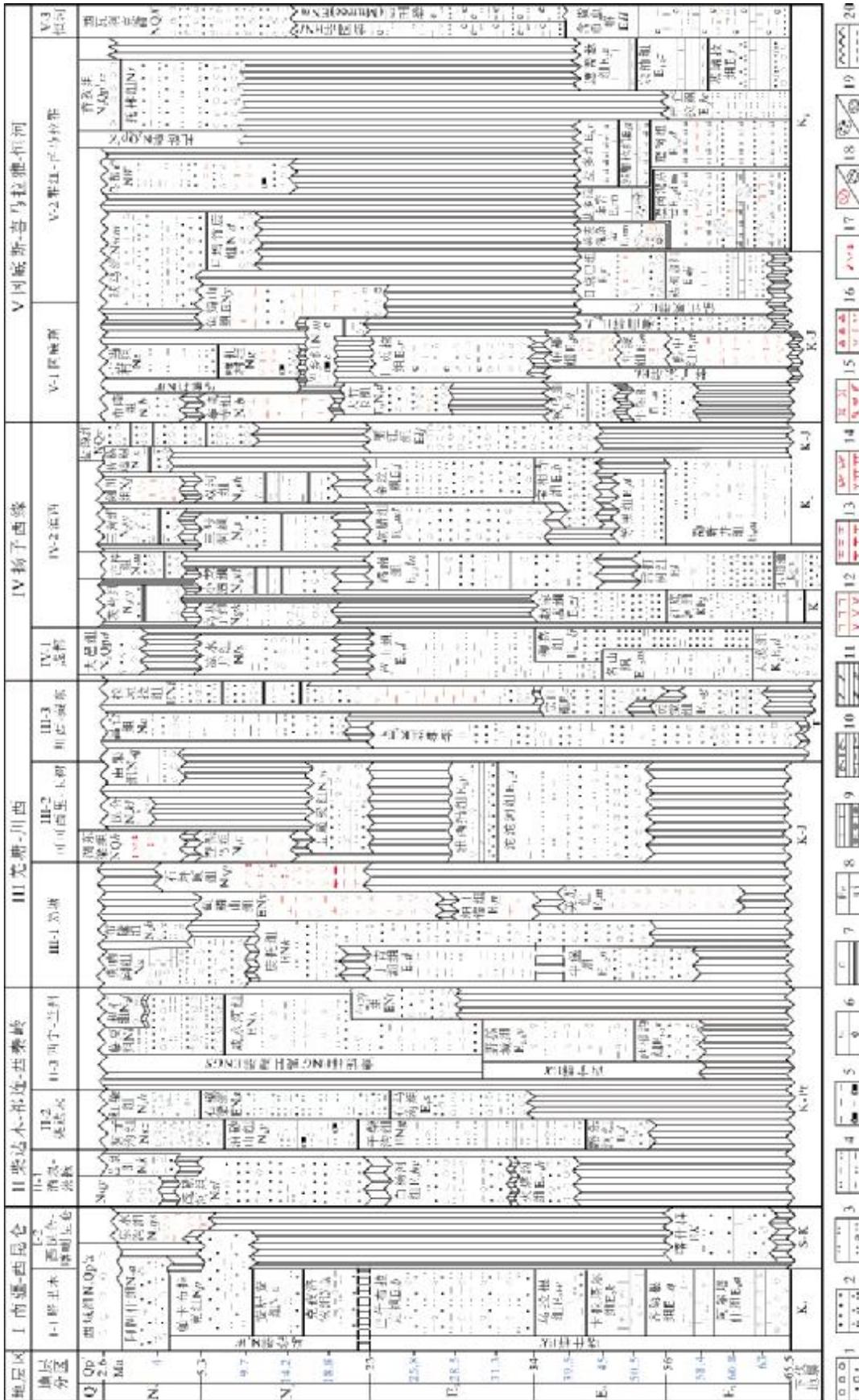


图1 青藏高原及邻区古近纪—新近纪地层分区、岩石地层序列及其对比(据文献[71])

Fig. 1 Paleogene-Neogene stratigraphic division, lithostratigraphic sequence and correlation in Qinghai-Tibet Plateau and adjacent areas(From Reference [71])

1—砾岩/含砾砂岩 (conglomerate); 2—砂岩/石英砂岩 (sandstone); 3—粉砂岩/含砾粉砂岩 (siltstone); 4—泥质粉砂岩/粉砂质泥岩 (muddy siltstone); 5—泥岩/油页岩 (mudstone/oil shale); 6—钙质石膏 (calcium/gypsum); 7—炭质煤 (carbonaceous); 8—铁质硅质 (ferruginous/siliceous); 9—灰岩/灰质砾岩 (limestone); 10—介壳灰岩/含泥质灰岩 (shell limestone); 11—泥灰岩/泥质白云岩 (marl/clayey dolomite); 12—玄武岩/安山岩 (basalt/andesite); 13—粗面岩/粗安岩 (trachyte); 14—英安岩/白云榴响岩 (dacite); 15—流纹岩/火山集块岩 (rhyolite); 16—火山角砾岩/凝灰岩 (volcanic breccia/tuff); 17—晶屑凝灰岩 (crystal tuff); 18—火山岩岩块/灰岩岩块 (volcanic limestone block); 19—砂岩岩块/硅质岩岩块 (sandstone/siliceous rock block); 20—角度不整合/平行不整合 (unconformity)

40 Ma 以来喜马拉雅沉积缺失,标志喜马拉雅初始隆升;约 36 Ma 以来冈底斯初始隆升,区域不整合面发育.

陆内汇聚挤压隆升阶段(34~13 Ma): 1) 34~25 Ma, 冈底斯持续隆升,沿冈底斯分布日贡拉砾岩,高原东北缘出现临夏-循化新的压陷盆地; 2) 25~20 Ma, 可可西里-沱沱河发生较大幅度隆升,沿冈底斯带南缘广布大竹卡组砾岩,可可西里-沱沱河地区角度不整合面发育和盆内古近纪地层抬升变形,约 23 Ma 时高原整体隆升,塔里木海相沉积结束,高原及周边不整合面广布; 3) 20~13 Ma,高原内及周边大型盆地全面发展.

盆内发育持续湖侵充填序衡调整隆升阶段(13 Ma 以来): 1) 13~5 Ma, 喜马拉雅-冈底斯隆升到相当高度,该带因东西向伸展而导致南北向断陷盆地形成,约 8 Ma 出现强构造抬升剥露,8 Ma 之后高原及邻区大型湖泊进入湖退期; 2) 5 Ma 以来,高原整体隆升,高原内和周缘盆地沉积萎缩,约 3.5 Ma 高原周缘堆积巨砾岩.

2.2 华北地区第四纪沉积

尽管中国大陆新构造-活动构造强烈而复杂,但由于青藏高原的快速隆升,第四纪以来其西高东低中间过渡的三级地貌格局已经形成<sup>[73]</sup>,东亚季风环流也早在中新世晚期形成<sup>[74]</sup>. 受此构造地貌及气候大环境

影响,华北地区第四系地层主要发育两个沉积体系,一是主要受到构造及地貌格局控制的河湖相沉积地层,二是主要受到东亚季风控制的风成沉积体系. 同时,由于第四纪以来的各个时期,华北不同区域由于构造作用和季风强弱的变化,河湖相地层和风成沉积常相互交替、覆盖,不同区域或以河湖相地层为主,或以风成黄土沉积为主.

参考前人划分方案<sup>①</sup>,以构造背景为基础将华北地区新生代地层分别按鄂尔多斯地块周缘盆地区、鄂尔多斯地块内部黄土高原区和华北平原区 3 部分进行介绍(表 1).

鄂尔多斯地块周缘发育了一系列新生代盆地,第四纪地层也较为发育,分别为西部的六盘山-银川盆地区、北部的河套盆地区、东部的山西地堑系和南部的渭河盆地区. 华北平原区主体为华北大平原,太行山山前断裂以东地区. 其大部位于河北,称河北平原小区,由黄河、海河、滦河等冲积而成,海拔在 50 m 以下,地形坦荡,自西向东缓缓倾斜,西部边缘区域由冲洪积组成,靠近东部海洋区域在不同时期受到海侵影响.

2.3 黄淮海平原构造-沉积记录

黄河通过切穿沿线各盆地之间的峡谷将上下游连接,尤其是三门峡的贯通,形成黄土高原侵蚀与黄淮海平原堆积相对应的统一的环境动力系统,黄土高原、

表 1 华北第四纪地层分区对比

Table 1 Regional correlation of Quaternary stratigraphy in North China

地层		年龄/Ma	鄂尔多斯地块周缘盆地区				鄂尔多斯地块内部黄土高原	华北平原			
			六盘山-银川盆地区	河套盆地区	渭河盆地区	山西地堑区		河北平原小区	鲁豫小区		
全新统	上段	0.01	湖积层	滴哨沟组	半坡组(耕植土,黑土)	冲洪积等	全新世黄土	亚黏土层	临沂组、泰安组、沂河组		
	下段		灵武组	大沟湾组							
更新统	上更新统	0.1	水洞沟组	城川组	马兰组	乾县组	马兰组	马兰组	欧庄组	大站组	
			吉兰泰组、萨拉乌苏组	萨拉乌苏组							泄湖组
	中更新统	0.78	贺兰组	湖积层	离石组	阳郭组	离石组	小渡口组/周口店组	离石组	杨柳青组	金山组
			银川组或玉门组、羊圈堡砾岩	湖积层							
下更新统	2.58										

①汪啸风. 中国古大陆环境变化及其年代、生物、层序、事件、化学和构造地层响应. 宜昌地质矿产研究所, 2005.

黄淮海平原以及边缘海环境发生巨变<sup>[75]</sup>,从此青藏高原、黄土高原、黄淮海平原以及黄-渤海等边缘海被纳入了统一的“源-汇”体系中.但对于黄河贯通三门峡的时代,目前研究仍存在分歧(表 2).

黄河贯通三门峡之后,携带大量黄土物质堆积于黄淮海平原,深刻影响了黄淮海平原的地形地貌、沉积过程以及地表过程<sup>[90]</sup>,也将沉积物输送到海洋,在河口建造黄河三角洲,形成中国东部海岸地貌,奠定了今日中国东部海陆分布格局<sup>[61,91-95]</sup>.三角洲的形成发展促使黄淮海平原不断扩展,岸线不断外延;而在黄河改道进入废弃过程后,岸线则遭受侵蚀<sup>[96]</sup>.

#### 2.4 长江中下游平原第四纪沉积

与黄河贯通类似,长江贯通之后,上游的沉积物被径流携带堆积形成中下游平原,其沉积环境发生了明显的改变.长江中游江汉盆地在古近纪时期为内陆咸化盆地,未堆积大范围河流沉积物,表明长江在古近纪

时期未贯通.中游江汉盆地和下游苏北盆地在新近纪时期发育厚层河流砂砾沉积物,表明长江贯通发生在新近纪时期.但学者利用沉积物的不同指标,得出的长江贯通时限存在较大差异,主要有中新世<sup>[97]</sup>、晚上新世<sup>[98]</sup>、第四纪初期<sup>[99-100]</sup>等多种观点(表 3).

### 3 重要气候沉积记录

#### 3.1 全球气候变化

新生代以来,全球气候从白垩纪时的稳定温暖阶段演变为总体趋势变冷、波动较大的气候环境,其间发生了多次气候事件.图 2 为构造尺度上新世以来全球气候事件及其对应的碳氧同位素记录<sup>[106]</sup>.新生代全球主要的气候事件有古新世/始新世高温事件(PETM)、始新世/渐新世(E/O)转折与早渐新世冰盖扩张、晚渐新世增温与早中新世变冷、中中新世暖期(Mid-Miocene Climate Optimum)、中新世南极冰盖的

表 2 黄河贯通三门峡的时代

Table 2 The time of the Yellow River passed through Sanmenxia

研究对象	贯通时代	主要证据	参考文献
黄河扣马段河流阶地	>1.165 Ma	最高级阶地上 1.165 Ma 开始堆积黄土	[76]
构造地貌			
黄河三门峡段河流阶地	3.63-1.24 Ma	黄河三门峡段上新世夷平面之下发育 5 级河流阶地;夷平面以及最高级阶地的形成时代分别为 3.63 Ma 和 1.24 Ma	[77]
三门峡段河流阶地及渭河盆地河湖相沉积	1.3-1.4 Ma	三门峡最高级河流阶地之上和渭河盆地中具有黄河上游碎屑锆石年龄分布特征的沉积物分别出现于 1.3 Ma 和 1.4 Ma	[78]
三门峡盆地黄底沟剖面	0.15 Ma	三门古湖 0.15 Ma 结束湖相沉积 L2 以上粒度偏粗,沉积速率增大	[33,79] [80]
邙山黄土	200-250 ka 约 900 ka	利用磁化率和粒度重新标定了邙山黄土的时代,发现 S2 之后沉积速率及粒度发生明显变化 L9 黄土(约 900 ka)中已经出现了黄河物源	[81] [82]
河南东部平原沉积物	0.78 Ma	黄河冲积平原 B/M 界线(0.78 Ma)上下沉积物特征、孢粉特征以及重矿物组合明显不同	[83]
沉积响应			
汾渭盆地与河南平原更新统介形类化石	0.78-1.0 Ma	更新统介形类化石组合特征中更新世前后发生明显变化	[84]
黄河三角洲石化 2 孔	早更新世	钻孔埋深 223 m 处上下沉积物元素组成存在明显差异,其上与黄河接近,其下与黄河明显不同	[85]
渤海湾西岸 G4 孔	1.6 Ma	地球化学组成指示 1.6 Ma 物源发生变化	[86]
渤海 BH08 孔及南黄海 NHH01 孔	880 ka	稀土元素和黏土矿物组成指示物源在 880 ka 由近源小型山地河流为主,转变为以远源多组分的黄河沉积物为主	[87]
南黄海西部 CSDP-1 孔	0.8 Ma	黏土矿物和 Sr-Nd 同位素指示物源在 0.8 Ma 由长江转为以黄河为主	[88]
渤海湾西岸 G2、G3 及 CK3	1.6-1.5 Ma	G2、G3 及 CK3 中的碎屑锆石年龄谱在 1.6-1.5 Ma 发生明显变化	[89]

据文献[68].

表 3 长江贯通时代的不同观点

Table 3 Different viewpoints about the time when the Yangtze River runs through

研究对象	贯通时代	主要证据	参考文献
江汉盆地阶地	0.75 Ma	长江第五、四级阶地沉积物中的锆石 U-Pb 年龄谱具有长江上游的特征	[101]
江汉盆地钻孔	早于第四纪初期	与第四纪沉积物相比,上新世沉积物的 $\epsilon Nd(0)$ 值较低,显示其物源不同	[102]
南京雨花台组长江砾石层	23 Ma	长江上游物质在渐新世或者最晚在渐新世/中新世之交到达南京地区	[97]
兴化 XH-1 孔	2.32 Ma	磁化率和粒度的相关性在 2.32 Ma 发生了变化,分别与淮河下游和长江下游现代沉积物的记录相一致	[100]
长江口 PD-99 孔	>2.58 Ma	指示长江上游物质的独居石年龄 <25 Ma 颗粒在河口地区地层出现	[103]
长江口 DY03 孔	3.1 Ma	常量和微量元素结果显示,沉积物来源在 3.1 Ma 由近源转变为远源	[104]
长江口 DY03 孔	>3.2 Ma	锆石 U-Pb 年龄谱结果显示,3.2 Ma 以来沉积物碎屑锆石中识别出大量来自长江上游的年龄信息	[98]
东海盆地钻孔沉积物	中新世晚期	现代长江锆石谱首次在中新世晚期出现	[105]

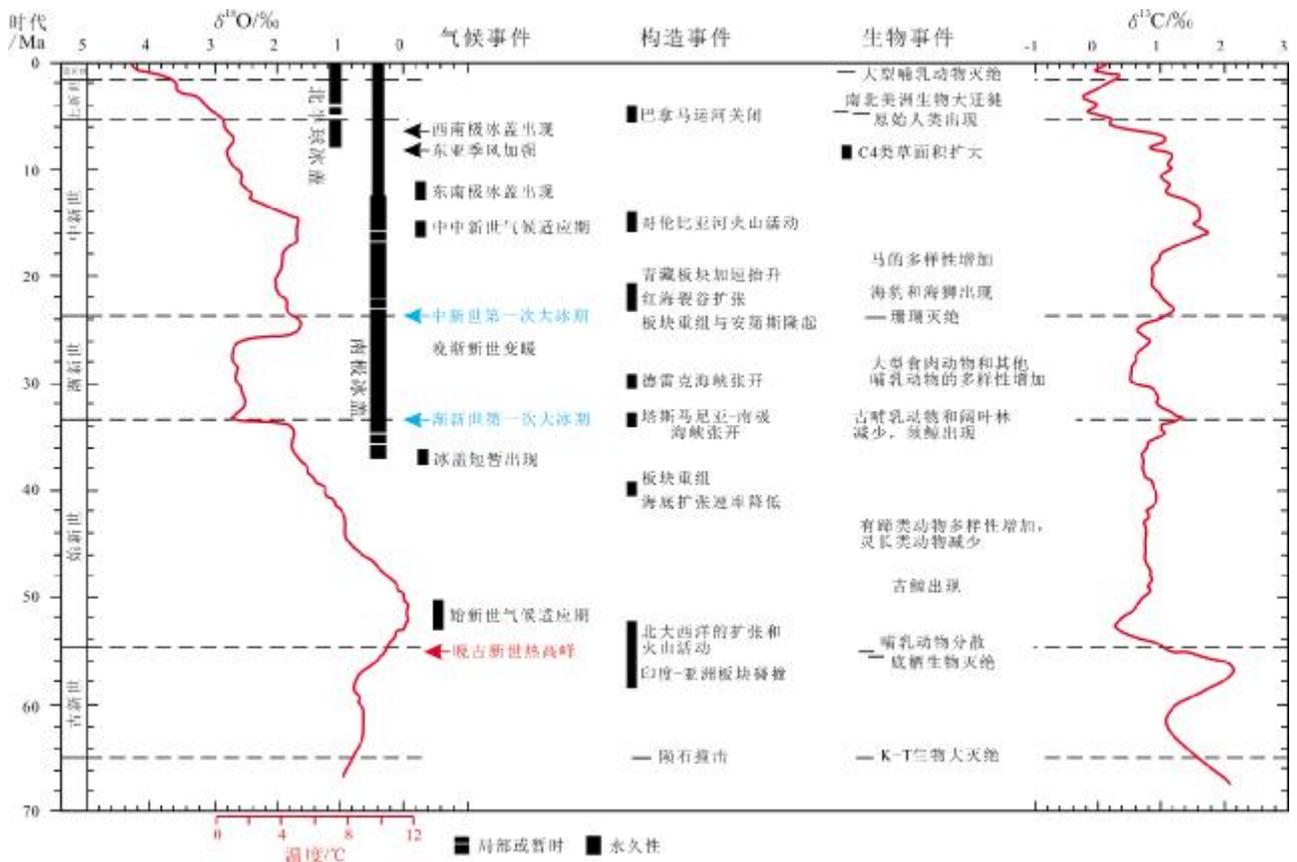


图 2 新生代全球主要气候、构造、生物事件及其碳氧同位素记录

(据文献[106])

Fig. 2 Cenozoic global climate, tectonic and biological events and their isotope records

(From Reference [106])

扩张、亚洲季风的加强、晚中新世北极冰盖的形成、上新世暖期、上新世/更新世过渡期与北极冰盖的扩张。

与这些气候事件相对应,新生代以来全球发生了多次重大的构造事件,如 55 Ma 北大西洋的打开及火山喷

发、34~30 Ma 德雷克海峡和塔斯马尼亚-南极海道开通、青藏高原碰撞及隆升、8 Ma 印尼海道关闭、7~8 Ma 白令海峡开通、3.6 Ma 巴拿马地峡的关闭。

第四纪极度不稳定的气候代替了之前缓慢、不规则的变冷过程,呈现明显的气候旋回和气候带迁移,这在深海氧同位素以及我国的黄土记录中均有非常好的体现. 第四纪存在多次气候事件, 如中更新世的气候转型事件、晚更新世的 Henrich 事件及 D-O 事件、晚更新世与全新世之交的 YD 事件、全新世的 8.2 ka 与 4.2 ka 事件以及人类进入文明以来的中世纪暖期和小冰河期。

晚新生代以来中国的气候变化与全球具有相似性, 又有其独特之处. 相似性在于上述全球主要的气候事件在中国黄土、红土、石笋、湖相沉积物中均能发现响应的记录, 独特之处则在于第四纪青藏高原的隆升, 形成西高东低的地理格局, 由此导致的海陆热力差异使得古季风形成, 季风环流逐渐加强, 东亚地区大气环流模式逐渐从古近纪的行星风系逐步发展为与第四纪非常相似的现代季风环流, 同时西北内陆干旱化加剧. 也就是说, 中国新生代以来气候格局发生了明显的变化。

郭正堂等系统编制了新生代不同时期的古环境格

局, 对早—中渐新世、晚渐新世、早中新世、中中新世和晚中新世均分别制图<sup>[107]</sup>. 这些图件表明, 与现今类似的季风-干旱格局在中新世早期就已经建立, 而古近纪时期贯穿我国东西, 包括现今江南地区的干旱带是行星季风副热带高压的影响所致, 最南部的湿润区是热带季风影响的结果。

### 3.2 北方黄土沉积

黄土主要分布在中国西北黄土高原<sup>[108]</sup>. 晚新生代以来, 中亚内陆的干旱化与季风共同作用使得风成物质在中国西北内陆堆积, 黄土高原开始形成. 黄土高原堆积的黄土-古土壤沉积物是西北地区的典型风成沉积物, 沉积物分布范围广、厚度大, 沉积连续、层序完整, 精确记录了晚新生代以来的古气候环境信息, 与深海氧同位素所解释的全球变化十分吻合. 黄土与深海沉积物、极地冰芯并列称为研究全球第四纪变化的三大支柱。

晚新生代以来黄土高原的风尘堆积可以分为 3 个部分(图 3), 其中第四纪黄土(0~2.6 Ma)在整个黄土高原均有分布, 晚中新世—上新世的三趾马红土(2.6~8 Ma)主要分布于六盘山以东的东部黄土高原, 中新世—上新世风成红土(3.5~22 Ma)主要分布于六盘山以西的西部黄土高原. 三者共同构成了从 22 Ma 至今

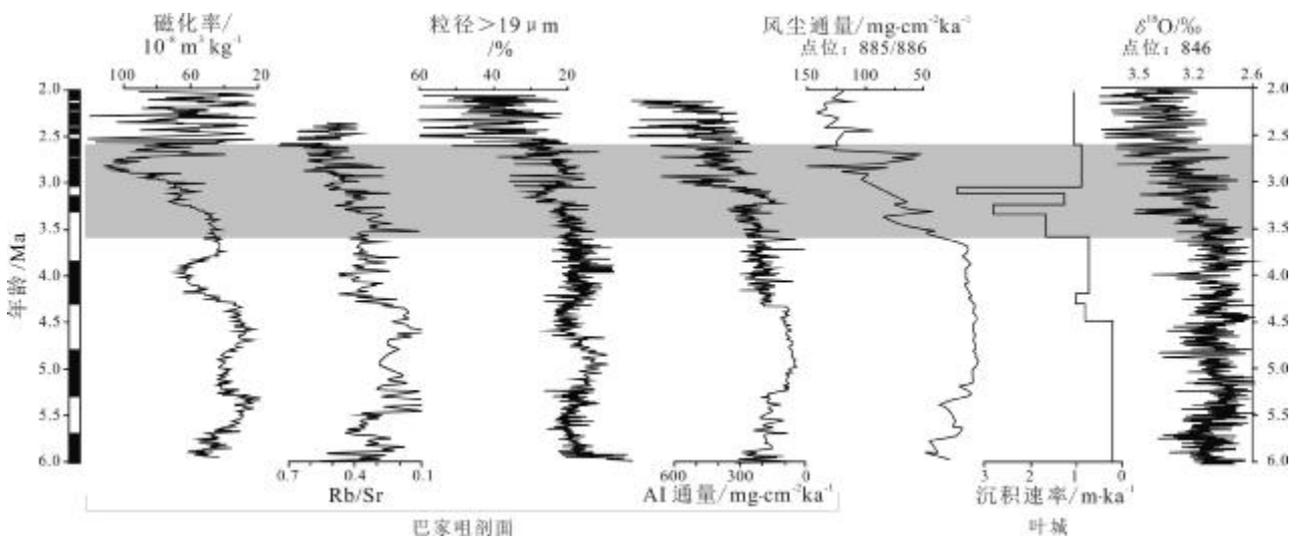


图3 晚中新世黄土高原风尘堆积记录及北太平洋深海沉积物记录 (据文献[109])

Fig. 3 Records of Late Miocene aeolian accumulation of Loess Plateau and deep-sea sediments in northern Pacific Ocean (From Reference [109])

阴影部分反映的是 3.6~2.6 Ma 亚洲冬季风的增强 (Shadow reflects the strengthening of Asian winter monsoon during 3.6~2.6 Ma)

的连续序列。

晚中新世以来三趾马红土和第四纪黄土沉积记录了亚洲季风的 3 个演化阶段(图 3): 9~8 Ma, 亚洲内陆干旱化加剧, 印度及东亚季风开始; 3.6~2.6 Ma, 东亚夏季风及冬季风的加强, 向北太平洋的风尘输送加剧; 2.6 Ma 开始, 印度及东亚夏季风变异性增强, 强度减弱, 东亚冬季风加强<sup>[109]</sup>。

### 3.3 南方红土沉积

中国南方长江、珠江流域早—中更新世以来广泛发育的第四纪红土沉积物, 是我国中、低纬度地区在第四纪季风气候影响下形成的特征沉积物。其底界年龄约在 0.7~1.2 Ma 间, 网纹层主要形成于 0.4~1.2 Ma, 均质红土层形成于 0.4~0.1 Ma, 顶部下蜀土年龄总体小于 0.1 Ma<sup>[108]</sup>。红土分布、成因、来源及物理化学特征与新构造运动的发展、东亚季风系统的建立及第四纪全球变化的纬度效应有着潜在的耦合关系, 是我国南方第四纪特别是更新世以来地球环境信息记录的重要载体, 其记录的古气候、古环境信息可以与黄土进行横向对比<sup>[109]</sup>。

长江上游成都平原中更新世网纹红土矿物学和地球化学特征变化指示了该平原自 1.2 Ma 以来经历了逐步变冷和变干的过程, 转变的时间点发生在 1.0 Ma 左右、0.45 Ma 和 0.1 Ma, 这些时间点与青藏高原的隆升事件(共和运动和昆黄运动)以及东亚季风的变化是一致的<sup>[110]</sup>。下游宣城红土中黏土矿物组合及含量变化所指示的气候旋回与深海氧同位素 MIS3-15 以及黄土高原黄土 S1—S7 层位十分吻合(图 4), 反映了中更新世以来该地区气候环境演化与全球变化的一致性<sup>[111]</sup>。

### 4 东部水系的重大调整

晚新生代以来, 我国形成了以黄河、长江为代表的巨型水系。其中长江是中国第一、世界第三大河, 从喀拉丹东雪山南麓冰川出发, 干流先后流经青藏高原、横断山脉、云贵高原、四川盆地、长江中下游平原, 在东海与黄海的交界处入海; 黄河是中国第二、世界第六大河, 源于青藏高原, 流经黄土高原、华北平原, 在东营入渤海。这些水系横跨中国东西三大地势台阶, 受构造、地貌、气候和水文等自然因素控制, 是联系青藏高原、

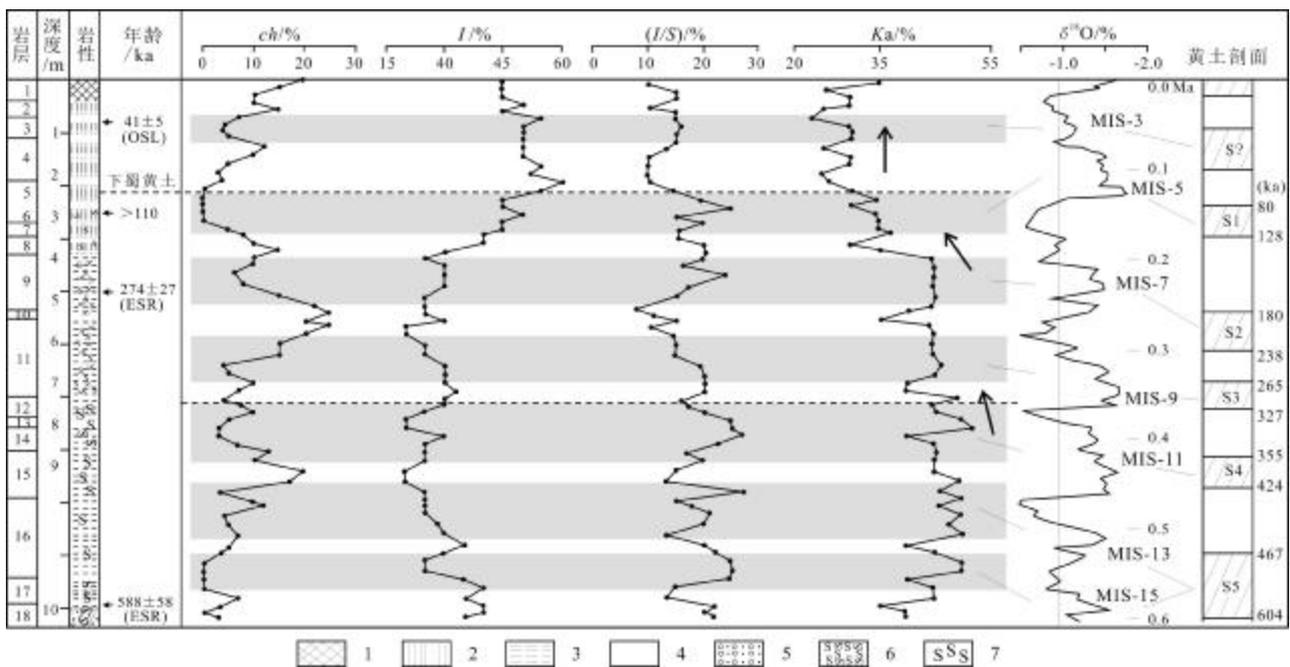


图 4 安徽宣城黄土黏土矿物分析及其与深海氧同位素和黄土记录对比 (据文献[111])

Fig. 4 Analysis of clay minerals in loess of Xuancheng and comparison with deep-sea O isotope and loess records (From Reference [111])

1—近期黄土(recent loess); 2—砂质黏土(sandy clay); 3—软黏土(soft clay); 4—盐(salt); 5—砂砾石(sand gravel); 6—细网纹(fine reticulated soil); 7—粗网纹状脉(coarse reticulate vein)

黄土高原、东部平原和西太平洋边缘海的纽带,其形成是青藏高原隆升、西太平洋边缘海张裂、中国东部持续沉降以及晚新生代气候变化综合作用的结果.流域的演化过程展示了新生代中国地形宏观格局发生巨大变化的过程.

#### 4.1 黄河贯通

黄河是世界上年输沙量最高的河流(每年约1 Gt)<sup>[112-113]</sup>.其发源于西藏巴颜喀拉山北麓,流经黄土高原和华北平原,穿越我国第一、第二和第三级地貌阶梯,最终东流汇入渤海.黄河是在新生代时期,中国西部岩石圈增厚,青藏高原不断隆升<sup>[114-118]</sup>,东部岩石圈持续伸展减薄<sup>[119-120]</sup>,中国西高东低的宏观地形格局逐渐形成这一宏观构造地貌背景下形成的.黄河的形成和演变不仅具有重要的科学意义,也具有重要的实际意义,关乎人类的缘起、发展和未来,长期以来其形成演化一直受到地质学家的广泛关注.

关于黄河的形成时代<sup>[76, 121-132]</sup>、水系格局演化及流域内环境变迁,前人已开展大量研究<sup>[82, 136-137]</sup>,但目前关于黄河的形成演化历史依然存在明显分歧(表2).此处我们对黄河演化的模式进行整理.

黄河演化的认识存在3种截然不同的模式:1)认为黄河形成于始新世,但其河道与现今黄河“几”字形河道非常不同,而是从源头直接向东穿过一个大的方形弯道之后,沿着渭河的河道向东流动<sup>[123]</sup>.直到晚中新世—上新世早期,兰州地区局部构造变形和隆起形成分水岭,迫使始新世河道终止,转而向北流经银川盆地,形成了现今河道的雏形<sup>[123]</sup>.部分学者对黄河中游晋陕峡谷段的古黄河砾石层上覆三趾马红土的古地磁研究表明,其年龄为5~8 Ma,因此该段黄河至少自中新世晚期—上新世就已形成<sup>[121, 126, 131, 138]</sup>.2)基于河流阶地的年代学研究,认为黄河形成于早中更新世<sup>[31, 76, 139-143]</sup>.3)通过来自黄河上游沉积盆地的地层、年代学和地貌证据,认为现今黄河最初形成于晚更新世(0.15 Ma左右),是黄河流域诸多盆地(古湖),如共和—贵德盆地、兰州盆地、河套盆地(托克托古湖、吉兰泰古湖、银川古湖等)、古三门湖,在构造运动的作用下各盆地联通而形成.0.15 Ma左右发生的共和运动使青藏高原再次大规模隆升,黄河发生溯源侵蚀,切穿龙羊峡联通共和盆地<sup>[30]</sup>;同时,黄河切穿三门峡导致三门古湖消失<sup>[30, 80-81]</sup>,黄河下游向上游串通形成外泄水

系,现代黄河水系最初形成.

黄河贯通三门峡进入华北平原,是华北平原发育历史上具有划时代意义的事件.黄河将巨量的泥沙从中上游黄土高原搬运至华北平原,剧烈改变了华北平原过去的沉积环境、沉积条件、沉积物来源以及沉积物特征(图5).

中更新世以来黄河在华北平原上堆积了50~140 m厚的堆积物,在平原上形成了一个巨大的扇体,并由西向东逐步推移.这一方面大大挤压了华北平原水系的存在空间,使之并入黄河水系或者掩埋消失,另一方面深刻改变了华北平原的地表过程和源汇体系,对华北平原以及边缘海沉积环境有着巨大的影响.

资料显示更新世已经发生过黄河入淮事件<sup>[144]</sup>,黄河入淮后改变了江淮平原的地形地貌及沉积过程,彻底改变了原有的淮河体系,导致河道淤塞,水网不畅,形成了苏北湖泊群.公元1128年,由于人工改道,黄河拉开了长期南泛的序幕<sup>[145]</sup>,在1128—1855年期间,古黄河在古淮河三角洲的基础上形成了北达灌河、南达射阳河的大型三角洲,江苏北部海岸线持续向海推进,并在苏北沿岸流和河流径流的作用下形成了广阔的滨海平原和沿海滩涂.在黄淮地区形成的泛滥相沉积物统称为黄泛层,岩性主要为粉砂质,颜色呈黄褐色,常见水平层理,在江淮地区的地质调查发现,大部分地区表层沉积物为黄泛层(灰黄色粉砂质黏土层),西南部略厚(0.6~0.8 m),往北、东方向减薄(0.2~0.4 m).

#### 4.2 长江贯通

长江发源于青藏高原,源远流长,全长超过6300 km,横穿青海、西藏、江苏、上海等9个省(自治区、直辖市).其流域面积为 $196 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,径流量和输沙量分别为 $9210 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $9214.8 \times 10^8 \text{ t/a}$ <sup>[112]</sup>.长江贯通以后,在长江中下游的苏北盆地和长江三角洲沉积了一套松散的碎屑沉积建造.受新构造运动、古地形和海平面升降的影响,沉积厚度变化较大,自西向东逐渐递增,厚20 m至上千米<sup>[146]</sup>.

沉积记录表明长江上游物质在晚上新世、第四纪初期到达长江三角洲<sup>[99-100, 147]</sup>(图6),形成了巨厚砂砾层的河床相沉积和局部夹黏土的漫滩相沉积.但南京地区的记录显示长江上游物质在渐新世或者最晚在渐新世/中新世之交到达南京地区<sup>[97]</sup>.长江三角洲的新近纪地层厚20~600 m,而苏北盆地在新近纪时期沉积了

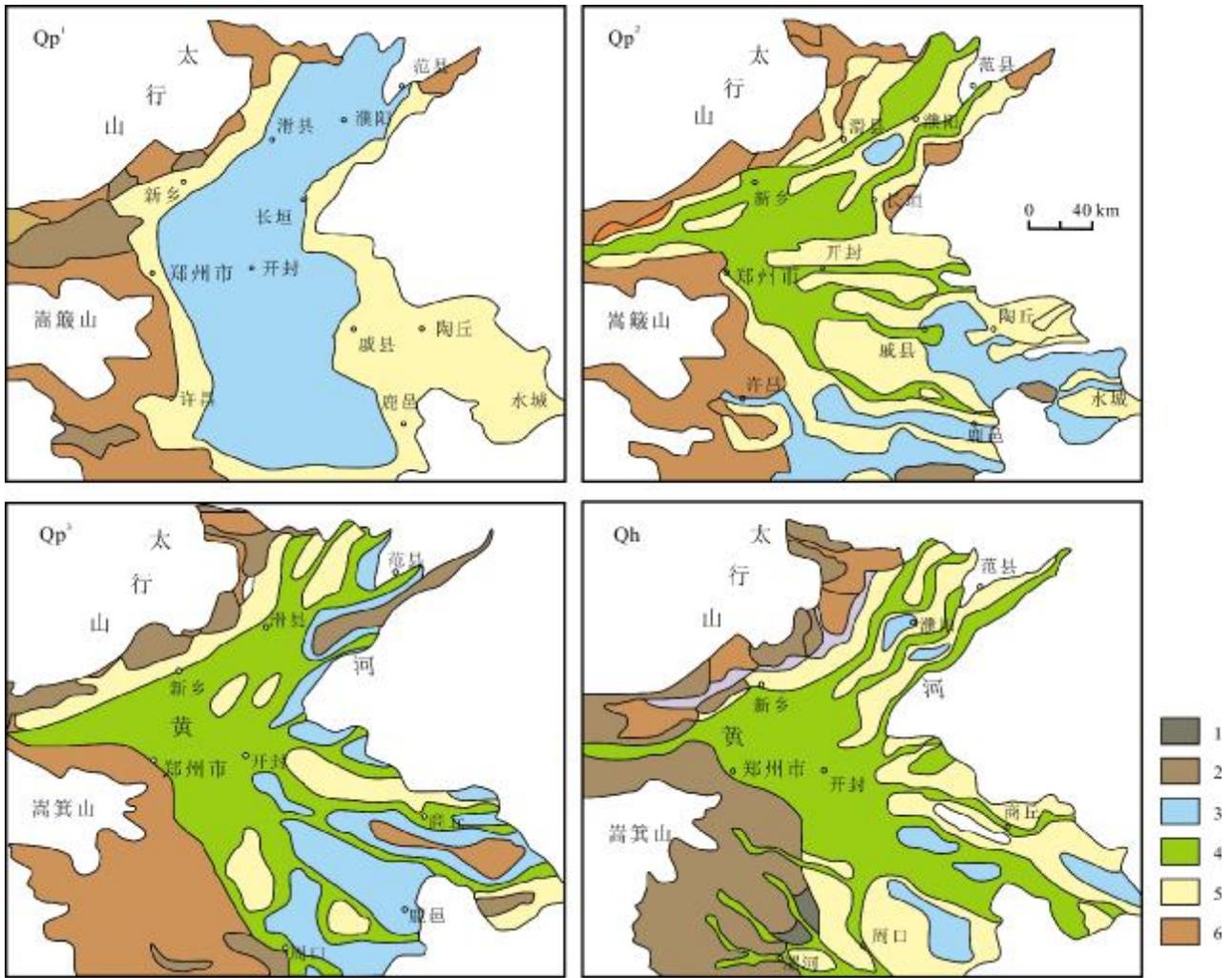


图 5 黄淮海地区第四纪演化  
(据文献[83]修改)

Fig. 5 Quaternary evolution in Yellow River-Huaihe-Haihe region  
(Modified from Reference [83])

1—山前冲洪积(piedmont alluvial-proluvial); 2—含黄土地层(loess bearing strata); 3—湖泊相(lacustrine facies); 4—河间带相(interbank facies); 5—剥蚀区(denuded area)

厚 1000~1700 m 的厚层砂砾层及黏土层堆积. 有学者指出,长江在贯通之初,携带的沉积物可能保存在苏北盆地而不是长江三角洲地区<sup>[98]</sup>. 通过东海沉积物的锆石年龄谱发现,现代长江锆石谱首次出现在中新世晚期地层中<sup>[105]</sup>. 由于苏北盆地目前未有上千米钻孔的报道,长江在贯通之初是否沉积在苏北盆地仍未可知.

#### 4.3 不同地区地层记录的水系演变事件对比

本研究选取渤海湾盆地 NH 孔,江淮平原 HNH01 孔、南黄海盆地 CSDP-1 孔以及长三角平原 TZK9 孔进行对比(图 7),以了解中国东部不同地区的水系重大调整在时空上的分布与发展.

NHH01 孔位于渤海湾中部,主要由粉砂和黏土组成,偶尔还夹杂着细中砂层,顶部 105 m 发育底栖有孔虫,在 0~105 m 区间内识别出海相或滨海沉积,其中沉积物呈灰色至深灰色. 此外,在 6.10~7.10 m、82.10~85.75 m 和 105~125.64 m 的间隔内,识别出 3 层可能的河流或海岸沉积物,其中褐黄色沉积物区间为 82.10~85.75 m, 105~125.64 m. Yao 等对钻孔进行了黏土矿物分析,认为该孔 880 ka 之前主要受到本地区域性河流的控制,而 880 ka 至今以黄河物源为主<sup>[87]</sup>.

江淮平原 HN 孔位于淮河北岸约 30 km,大致可以分为两部分,上半部分(2 m 以上)由黄土状沉积物

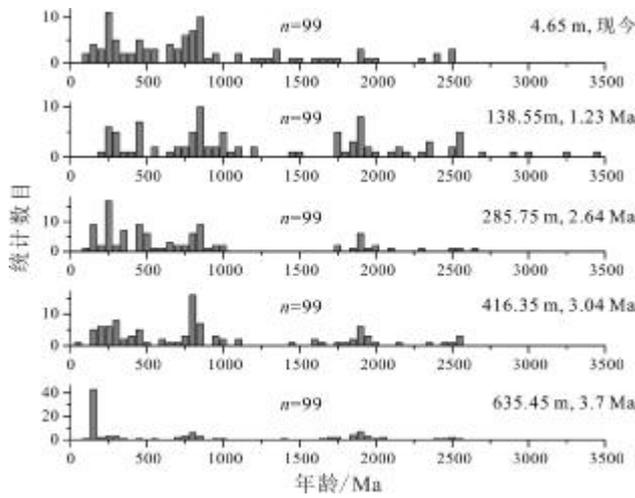


图6 TZK3孔碎屑锆石U-Pb年龄谱系图  
(据文献[147])

Fig. 6 U-Pb age distribution of detrital zircon from TZK3 borehole  
(From Reference [147])

组成,下半部分(2~8 m)由棕黄色的粉砂和泥组成。通过对钻孔中所取样品进行粒度、主量元素、微量元素分析发现,上下两部分的沉积物分别来自不同的源区,上半部分的源区与黄河中游黄土高原更为接近,表明它们很有可能是黄河改造搬运的黄土再次沉积而形成,与1128年黄河改道形成的所谓“黄泛层”类似。这意味着江淮平原在气候由干冷的末次冰期向暖湿的全新世过渡的气候转型阶段(末次冰消期,13.2 ka)发生过黄河入淮事件<sup>[88]</sup>。

南黄海 CSDP-1 孔位于南黄海盆地西侧,钻孔岩性主要由海相粉-细砂和河流相粗砂-细砂组成,海相和河流相地层中均含有大量的生物碎屑。Zhang et al. 对钻孔样品进行了高精度的黏土矿物分析以及 Sr-Nd 同位素分析,结果表明 0.8 Ma 之前沉积物主要来源于长江流域,而 0.8 Ma 之后长江向南迁移至目前的长江口位置,钻孔沉积物主要来源于黄河流域。这表明黄

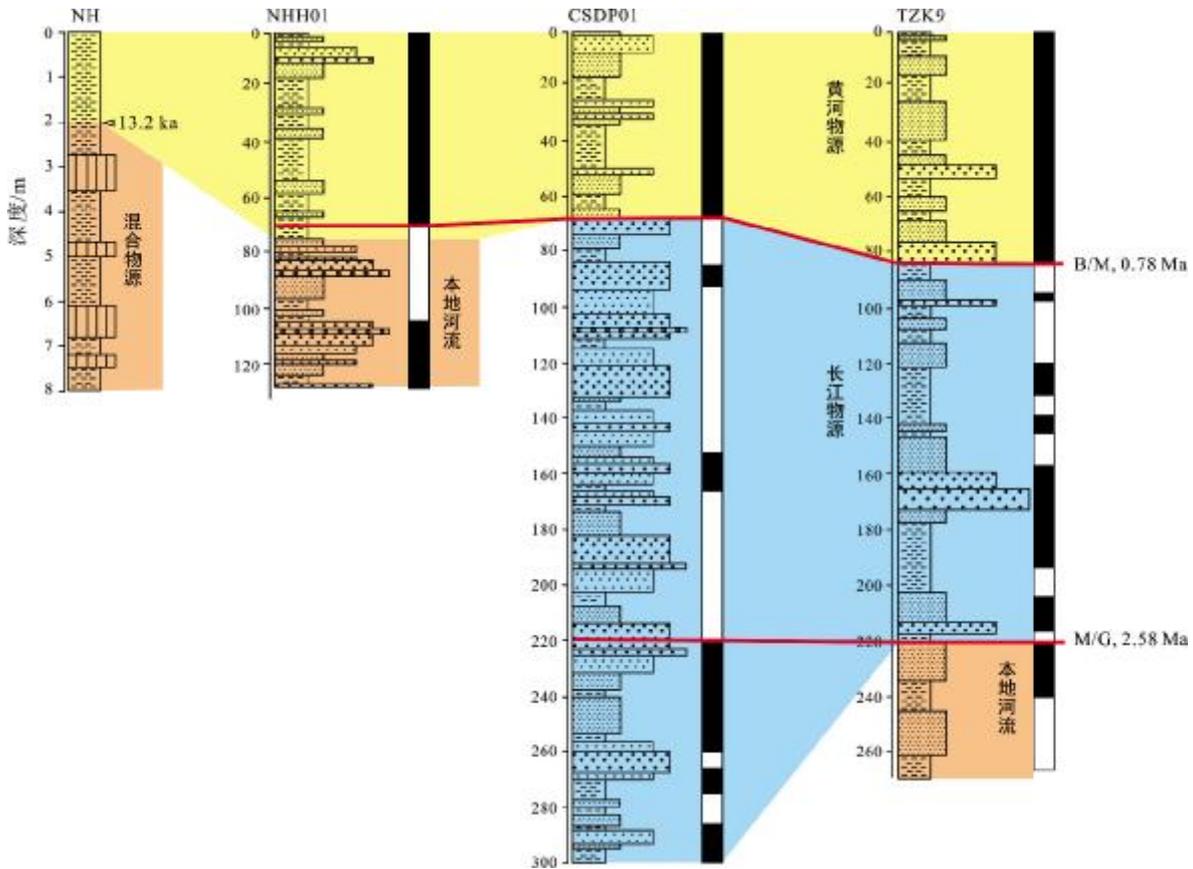


图7 中国不同地区的河流沉积记录  
(据文献[87-88, 148-149]修改)

Fig. 7 River sedimentary records in different regions of China  
(Modified from Reference [87-88, 148-149])

河很有可能在这一时期贯通三门峡入海<sup>[88]</sup>。

TZK9 孔位于长江三角洲北翼,磁性地层及重矿物结果显示 3.0~2.6 Ma 的沉积物主要来自淮河流域,而相比晚上新世,第四纪地层中的磷灰石、锆石、金红石、电气石含量的增加,表明该地区开始受到了长江流域的影响<sup>[149]</sup>。

## 5 晚更新世以来重要海侵事件及沉积记录

根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告预测,到本世纪末全球平均气温将升高 1.8~4.0 °C, 中国区域增幅可达 3.9~6.0 °C。在地质历史时期,末次间冰期是距现今最近的典型温暖期之一。研究表明,末次间冰期全球温度比现在高 2~3 °C,中国末次间冰期温度比现在高 2~5 °C。晚更新世气候变化较好地涵盖了未来我国沿海地区可能的气候变化范围,对晚更新世海侵特征的认识能够为预测未来不同气候变化幅度下海陆作用提供参照。因此,晚更新世时期的海侵特征研究逐渐受到越来越多的关注。目前为止,人们对晚更新世阶段中国东部沿海地区海侵发生期次、相对强度及发生机制等方面的认识仍不统一。

### 5.1 华北平原北部海侵

晚新生代以来,渤海湾沿岸历经多次随气候冷暖变化发生的海侵海退事件,尤其是晚更新世以来海岸带地区受海陆交互作用的影响,海相和陆相地层交替发育,记录了丰富的海陆环境变化信息。前人通过大量研究,发现渤海湾西岸晚更新世以来共记录了 3 次海陆变化旋回,发育有 3 套海相层,在时间上限定于 102~70 ka、39~23 ka 和 8.5 ka,分别对应于 MIS5、MIS3 和 MIS1(图 8)。在渤海湾西岸分别命名为沧州海侵、献县海侵和黄骅海侵。然而,渤海湾西岸黄骅拗陷 BZ1 孔的第二海侵层和第三海侵层要更老一些<sup>[151]</sup>,是否受到了年龄测试影响需要进一步工作。

第 I 海相层:埋深 2.8~19.71 m,海河附近底界埋深在 16 m 左右。灰色或深灰色淤泥质粉质黏土或黏土,含大量有孔虫和海相介形虫,发育浅海潮间带沉积,反映海平面上升、海水大范围入侵的沉积环境,年代在 3~6 ka,海河附近最早可达 8 ka 左右。其底界大多有一层约 10 cm 厚的黑色泥炭层,<sup>14</sup>C 年代为 7~9 ka。

第 II 海相层:埋深 21.91~32.85 m,以灰色淤泥质黏土、粉质黏土为主,局部夹亚砂土薄层,饱和、软塑,

含有机质及螺类化石碎片,见有孔虫、海相介形虫及软体动物,时代为更新世晚期(65~79 ka)。

第 III 海相层:埋深 43~61 m,以灰色淤泥质黏土、粉质黏土为主,含褐灰色粉砂,可塑,局部贝壳碎片富集,见有孔虫、海相介形虫及软体动物。时代大致为更新世中期(130~200 ka)。

### 5.2 灌云地区海侵

通过对江苏灌云地区多个钻孔的年代测试及微体古生物分析,表明灌云地区晚更新世以来发生了 4 次海侵(图 9)。根据历次海侵的范围、埋深、沉积物的颜色、岩性、沉积结构和沉积构造以及所含海相微体化石丰度等特征,每期海侵的强度和规模存在较大差异。

第 I 海侵层:埋深 5.90~18.95 m,全区均有分布,形成时代为全新世早期—中期,岩性为深灰色淤泥质粉砂质黏土,为高潮坪、潟湖相、潮上带沉积,沉积底部发育淤泥质粉细砂贝壳层。

第 II 海侵层:底部埋深 16.12~32.60 m,厚 1.90~13.40 m,全区均有分布。岩性为浅灰色粉砂质黏土高潮坪相沉积、黏土与粉砂互层,水平层理发育的中潮坪相沉积,灰绿色粉砂、粉细砂的低潮坪相沉积。地层中含有大量有孔虫及海相介形虫,<sup>14</sup>C 年龄对应 MIS3 阶段。

第 III 海侵层:底部埋深 28~41.36 m,厚 2.9~18.25 m,全区均有分布。该海侵层主要为灰、深灰色淤泥质粉砂质黏土的潮坪相沉积,局部有河口相沉积。其中 GZK01 孔 OSL 年龄为 127.3±6.1 ka, GZK05 孔 OSL 年龄为 129.0±6.2 ka。对应 MIS5 阶段的太湖海侵,时代为晚更新世早期。

第 IV 海侵层:底部埋深 34.66~50.90 m,厚 5.0~11.25 m,大部分地区有分布。该次海侵有潮坪相沉积、河口相沉积以及风暴潮组成的砂坝沉积。GZK01 孔上部 OSL 年龄为 133.2±5.7 ka,下部年龄为 159.8±7.1 ka, GZK05 孔 OSL 年龄为 152.2±7.4 ka。时代为中更新世晚期,相当于 MIS7 阶段的双桥海侵。

### 5.3 长三角第四纪海侵

长三角地区第四系记录了 4 次大规模海侵,由下至上分别为中更新世晚期海侵、太湖海侵、潟湖海侵和镇江海侵,形成时代分别为中更新世晚期、MIS5、MIS3 和 MIS1。海侵层以灰色黏土为主,局部为灰黄色粉砂、粉砂夹黏土、粉砂与黏土互层,水平层理发育,呈“千层

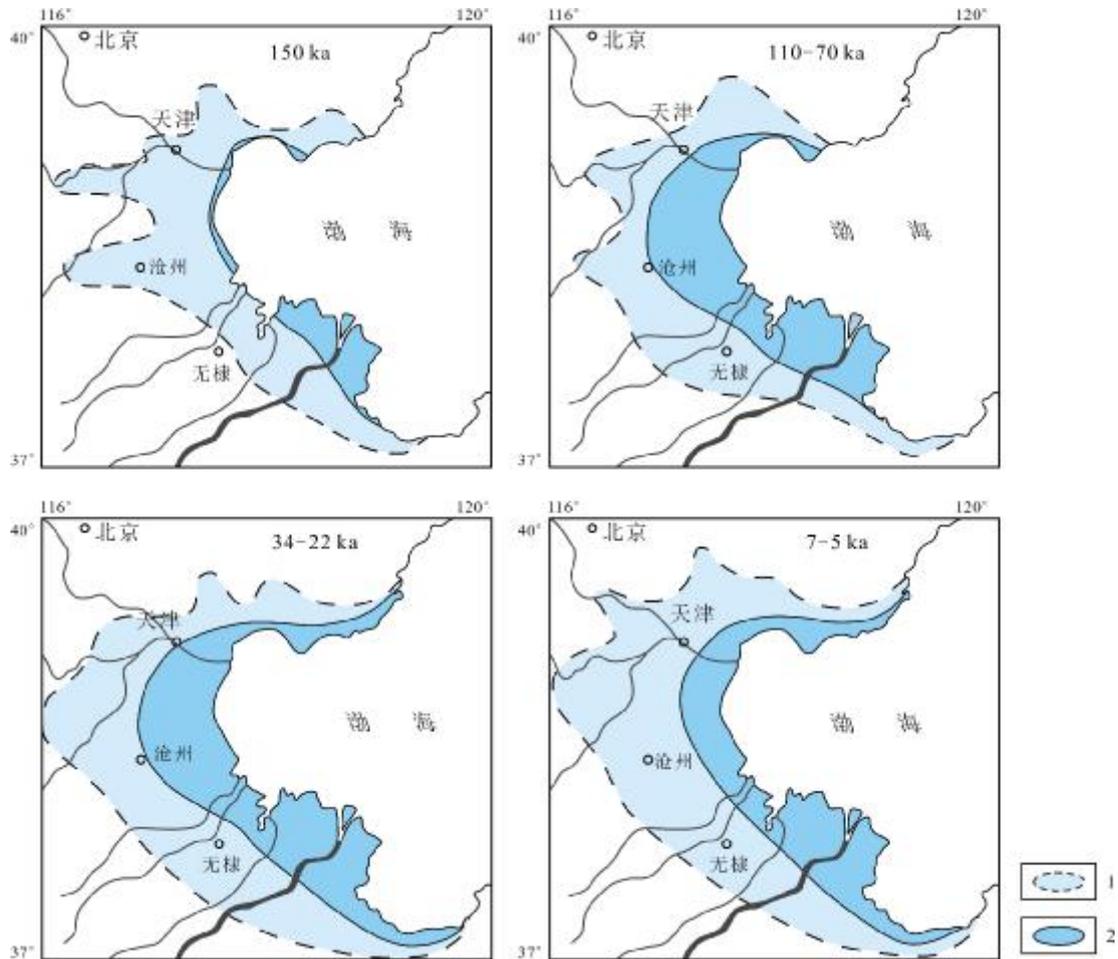


图8 渤海西岸晚第四纪海侵影响范围及古海岸线图  
(据文献[150])

Fig. 8 Late Quaternary transgression influenced area and ancient coastline on the west coast of Bohai Sea  
(From Reference [150])

1—海侵影响范围(transgression influenced area); 2—古海岸线(ancient coastline)

饼”状,含螺、贝壳碎屑。全新世形成的镇江海侵在区内广泛分布,埋藏深度3~50 m,由北向南逐渐变深; MIS3阶段的漏湖海侵和 MIS5阶段的太湖海侵在里下河地区分布广泛,在长江三角洲未见有孔虫,仅在零星钻孔中发现贝壳碎片,可能是与长江三角洲在此阶段沉积物较粗,有孔虫不易保存有关;中更新世晚期海侵主要分布在泰县中东部,为高潮坪沉积。

TZK9 钻孔沉积物很好地记录了第四纪以来的海侵<sup>[152]</sup>。年代框架、沉积特征和有孔虫及介形虫结果显示,90.20~91.90 m、70.50~71.10 m、64.80 m、60.30~61.20 m、57.05~58.50 m 和 51.80~53.70 m 区间内发育黏土夹粉砂的水平层理。沉积物受到潮汐作用的影响,含有异地沉积的有孔虫、虫管贝壳碎片、贝壳砂等,

沉积环境是潮上带,为规模较小的海侵。在45.5~48.2 m、29~40.4 m、7~16.9 m 和 0~3.33 m 层位中鉴定出大量有孔虫和介形虫(图10),对应了 MIS7、MIS5、MIS3 和 MIS1 四个阶段的大规模海侵事件。

#### 5.4 中国东部不同地区海侵层的对比

受中国东部陆架持续沉降以及全球海平面变化影响,中国东部沿海第四纪发生了多起海侵海退事件。至今,已发现海侵层数最多的为黄海陆架区,存在8个海侵层,其中研究较多的集中于晚更新世以来的3期。一方面,晚更新世海侵是距离现今较近的海侵过程,其地质记录相对完整;另一方面,海侵的发生与气候变化尤其是全球温度变化息息相关。

针对沿海第四纪海侵期次和海进海退过程,人们

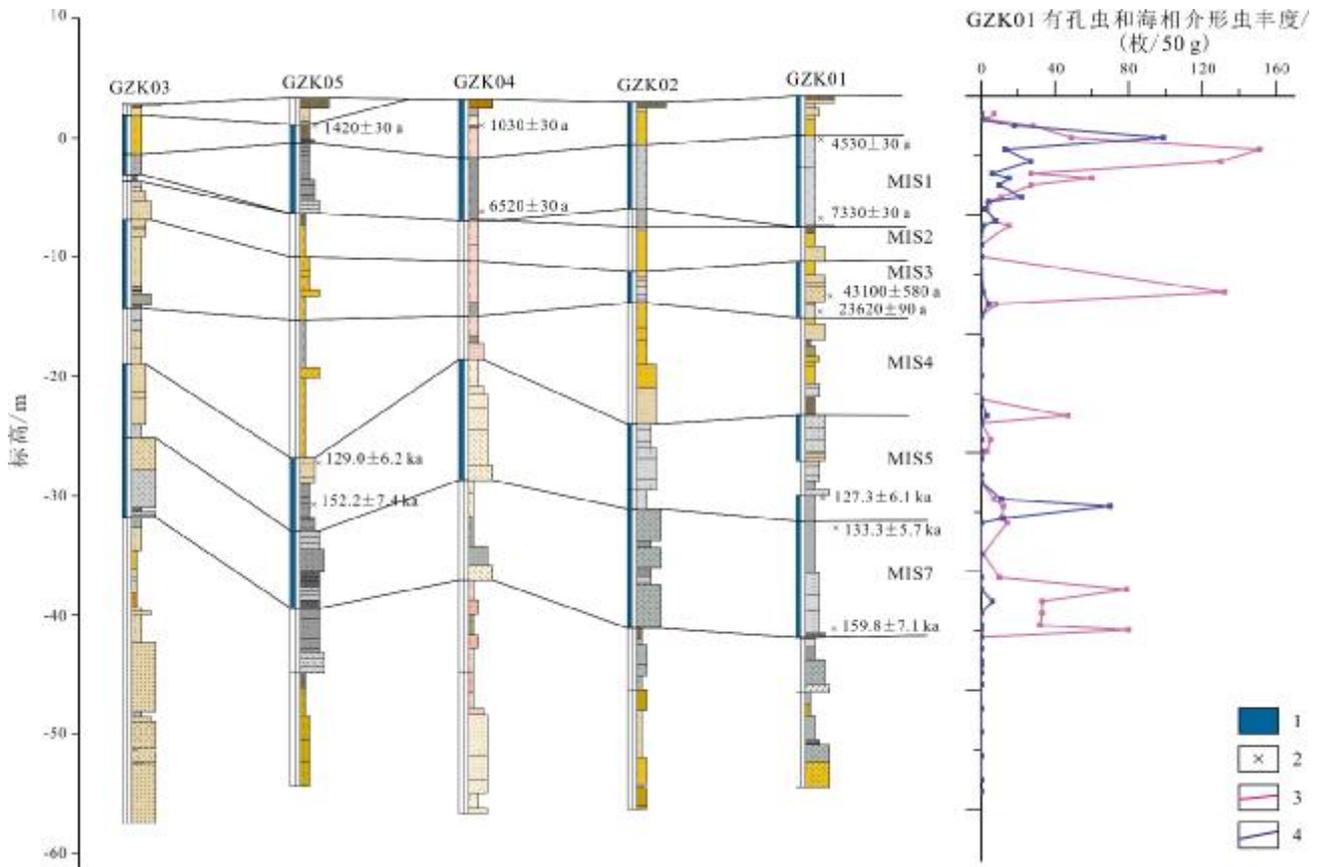


图9 灌云地区海侵层对比图<sup>①</sup>

Fig. 9 Comparison of transgressive layers in Guanyun area

1—海侵层(transgressive layer);2—测年位置(dating sample position);3—有孔虫丰度(abundance of foraminifera);4—海相介形虫丰度(abundance of marine ostracode)

依据渤海湾西岸研究提出了多种海侵期次划分方案(表4)<sup>[153-161]</sup>。

然而,目前对于中国东部沿海地区的晚更新世海侵发生的次数、分别对应的时间以及各期海侵的强度等认识仍不统一。全球第四纪气候-海平面波动曲线显示全球海平面在 MIS5 阶段与现今海平面持平或略高,而至 MIS3 阶段则较现今低 30~70 m<sup>[162]</sup>。然而,在长江三角洲沿海地区和渤海湾地区,晚更新世以来海平面变化与全球海平面变化出现明显差异,具体表现为 MIS3 阶段海侵高于 MIS5 阶段<sup>[161]</sup>。而根据中国东部沿海地区第四纪厚度、沉降速率和海侵层埋藏深度计算中国东部 MIS3 海平面<sup>[149, 163-167]</sup>,深度在-5~-20 m<sup>[156, 168-169]</sup>,低于该时期全球海平面<sup>[170-172]</sup>。部分研究者认为这是测年误差所导致的,基于 <sup>14</sup>C、古地磁和光释光建立的海侵地层序列,由于样品性质和年代学方法限制,使得测

年误差较大。<sup>14</sup>C 测年结果可能明显年轻,因此其显示的 MIS3 海侵事件应属 MIS5 期, MIS4—MIS2 期应为长时间沉积间断,表现为陆相地层<sup>[173]</sup>。而事实上,测年结果引发的海侵时间的不确定性在渤海湾地区同样存在。近年来通过外释光方法测得的渤海湾沿岸第三海侵层年龄在 201±20 ka,第二海侵层上部光释光年龄为 45~50 ka,第一海侵层时代则位于全新世。3 次海侵事件分别对应于 MIS7、MIS5 和 MIS1 阶段<sup>[174]</sup>。因此部分研究者更倾向于认为 MIS3 期海侵可能并不存在<sup>[174]</sup>。也有研究者认为是构造运动的结果,中国东部第四纪以来持续沉降,构造运动对中国东部晚第四纪的海侵进程产生了重大的影响,使得 MIS3 的海侵范围远大于 MIS5 的海侵。

而对东部陆架海域,南黄海及东海陆架区的研究目前已较多,对于晚更新世两次主要海侵的相对强度

<sup>①</sup>江苏省地质调查研究院. 江苏 1:5 万灌云县(150E011022)、同兴街(150E010022)区域地质调查报告. 2019.

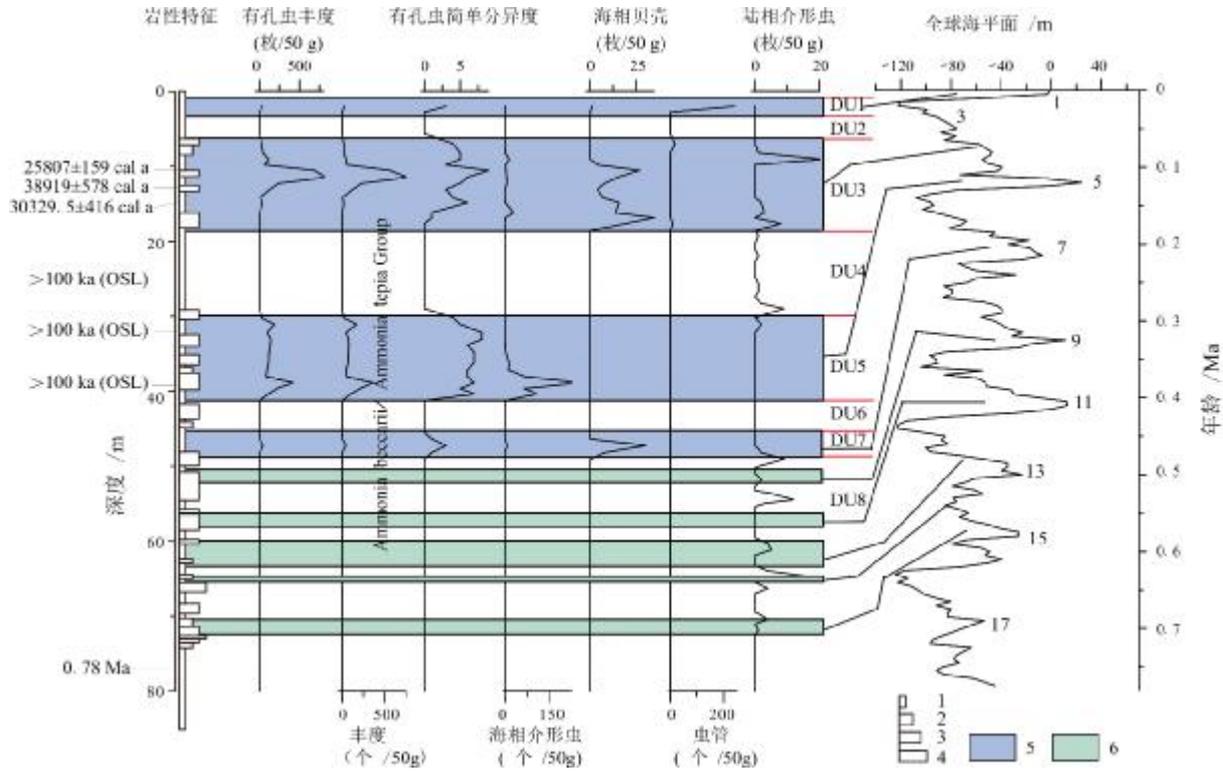


图 10 TZK9 孔有孔虫、介形虫的垂向分布  
(据文献[152]修改)

Fig. 10 Vertical distribution of foraminifera and ostracode in TZK9 borehole  
(Modified from Reference [152])

1—黏土(clay);2—粉砂质黏土(silty clay);3—黏土质粉砂/粉砂与黏土互层(interlayer of silt and clay);4—粉砂/砂砾层(silt/gravel);5—大规模海侵事件(large-scale transgression);6—小规模海侵事件(small-scale transgression)

表 4 黄淮海平原沿海地区的海侵期次划分

Table 4 Transgressive periods in the coastal areas of the Yellow River-Huaihe-Haihe plain

地点	海侵期次及名称	参考文献
黄骅、沧州、保定等地	渤海海进(早更新世),海兴海进(中更新世),黄骅海进(晚更新世早期),白洋淀海进(晚更新世早期),沧州海进(晚更新世早期),天津海进(全新世)	[153]
渤海湾西岸	沧州海进(102~70 ka),献县海进(39~23 ka),黄骅海进(8~2 ka)	[154]
河北平原东部	海兴海进,黄骅海进,青县海进,沧西海进(40~20 ka),献县海进(8.5~5.5 ka),沧东海进(5~3.5 ka)	[162]
中国东部平原	星轮虫海进(110~70 ka),假轮虫海进(40~25 ka),卷转虫海进(15~2 ka)	[156]
台湾海峡以北沿海平原	盘旋虫海进(中更新世早期),星轮虫海进(晚更新世早期),假轮虫海进(晚更新世中期),卷转虫海进(全新世)	[157]
渤海西、南岸平原	早更新世(2.26 Ma),中更新世(约 0.30 Ma),晚更新世(约 100 ka),晚更新世(39~24 ka)、全新世(<10 ka)	[158-159]
长江三角洲	如皋海进(早更新世中期)、上海海进(中更新世早期)、太湖海进(晚更新世早期)、涪湖海进(晚更新世晚期)、镇江海进(全新世)	[161]

据文献[68].

认识较为统一: MIS5 时期海侵最强, MIS3 时期海侵较弱, 与全球海平面变化一致. MIS5 时期的海侵影响范围可能深入苏北平原, 并进入海岸带内上百米. 而

MIS3 时期海侵强度目前认识有所差异. 有研究者认为当时海平面较低, 在-30~-40 m<sup>[175-176]</sup>, 南黄海沉积物偶尔会受到海洋影响; 东海海侵范围也较小, 东海

中陆架北部表现为河口湾沉积环境,更多地受到了周边河流的影响.另外的研究认为 MIS3 时期海侵在南黄海发育较强,在区域上形成海相地层,海平面深度可能与现在接近.

在苏北平原,海侵事件的发育表现有所差异.灌云地区 GZK01 孔揭露了中更新世以来共发育了 4 次海侵,时代分别为 MIS7、MIS5、MIS3、MIS1,强度为 MIS5>MIS1>MIS3>MIS7,这些海侵事件的时代和强度与全球海平面的变化较为一致,表明了其沉积作用主要受海平面变化控制<sup>[147]</sup>.而苏北平原西部的 4 次海侵,其强度由强到弱表现为 MIS3≈MIS5>MIS7>MIS1,与全球海平面高度明显不同,存在较大的差异,这可能由于区域海平面变化不仅受全球海平面变化的影响,也受多重海陆升降复杂效应的影响.例如,全新世时期中国东部地区的大规模海侵,已影响至扬州-镇江一带<sup>[177]</sup>,但在苏北平原贝壳堤和沙坝的形成,导致了该时期苏北平原西部的海侵强度较弱,表现为潟湖相沉积<sup>[147]</sup>.

本研究选取华北平原中北部叁 9 钻孔、渤海湾西岸平原 BZ1 孔、江淮平原灌云地区 GZK01 孔、长三角平原 TZK9 孔进行对比,以了解中国东部沿海不同地区海侵层的发育情况、不同期次的海侵事件发育强度

以及同构造运动、海平面变化之间的关系(图 11、12).

## 6 新生代火山作用

新近纪是新生代中国东部火山活动的高潮期,华北西部张家口、围场、赤峰、集宁一带广义汉诺坝玄武岩形成分布面积达 20 000 km<sup>2</sup> 以上的熔岩台地,以碱性玄武岩与拉斑玄武岩复合产出;东部沿郯庐断裂带(鲁苏皖)及其北延的依兰-伊通断裂分布.相比而言,中国第四纪火山活动主要集中分布于东北部,其规模和频率远不如古近纪-新近纪.

新生代以来中国西部三大岩区的火山活动划分为 3 个时期:古新世-始新世(60~40 Ma)仅限于西羌塘地区,以产出钠质基性火山岩为代表;渐新世-晚中新世(30~10 Ma)喷发强度大,范围广,在西藏和甘肃、云南三地以钾质熔岩喷发为主<sup>[179]</sup>;中新世末至第四纪(<10 Ma),集中产出在西藏东、北部和云南的部分地区.

东南沿海雷琼及环北部湾地区分布着中国南方最大的一片第四纪火山岩,仅琼北火山区形体可辨的各种类型火山锥就有 100 余座,北部湾内还有一座中国大陆最大的火山岛——涠洲岛,是研究岩浆喷发活动的理想场所.

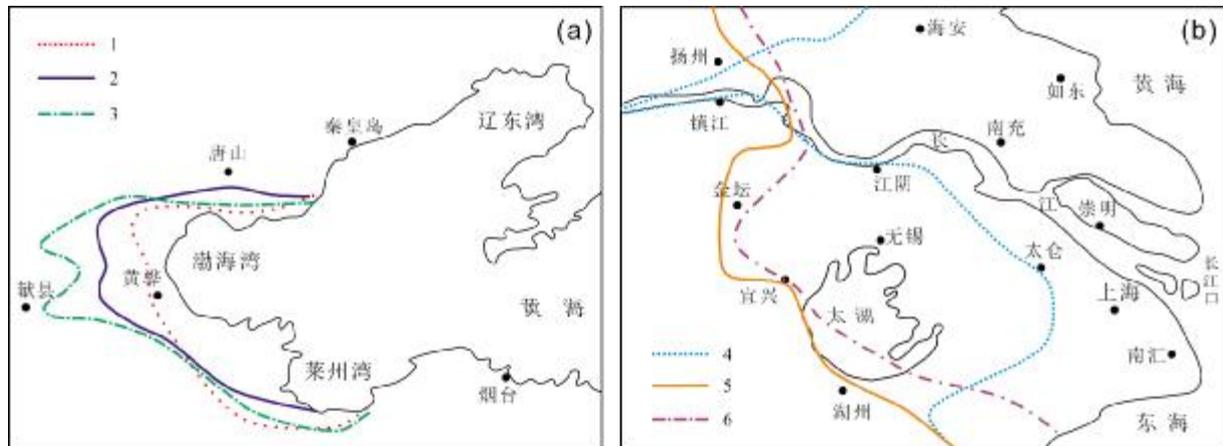


图 11 渤海湾西部平原与长三角晚更新世海侵范围

(据文献[161,165]修改)

Fig. 11 Late Pleistocene transgressive area in the Bohai Bay West Plain and the Yangtze River Delta

(Modified from Reference [161,165])

a—渤海湾西部平原区(western plain of Bohai Bay); b—长三角地区(Yangtze River Delta region); 1—黄骅海侵(Huanghua transgression); 2—献县海侵(Xianxian transgression); 3—沧州海侵(Cangzhou transgression); 4—镇江海侵(Zhenjiang transgression); 5—漏湖海侵(Gehu transgression); 6—太湖海侵(Taihu transgression)

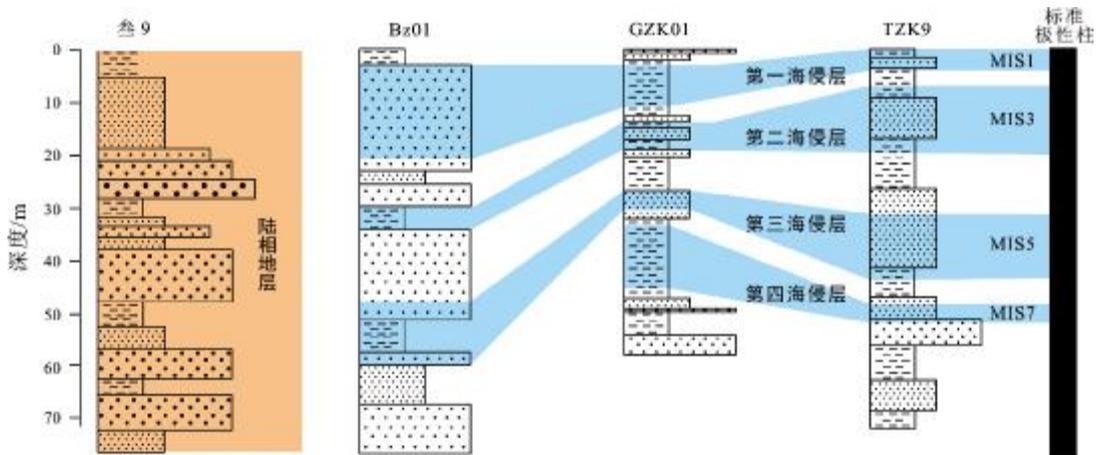


图 12 中国东部不同地区海侵层对比  
(据文献[147,178]修改)

Fig. 12 Correlation of transgressive strata between different regions in eastern China  
(Modified from Reference [147,178])

### 7 结论

中国晚新生代以来地貌格局发生重大变化,以至于经历了非常复杂的构造剥蚀、沉积过程及古环境与古气候演化. 本文只是简略地总结了主要区域的相关地质记录,以期在区域地质调查过程中有所启发和应用.

1)晚新生代重大构造事件,主要表现为青藏运动、昆黄运动和共和运动. 这些构造事件不仅奠定了高原基本地貌格局,而且在中国东部山脉的隆升和地貌格局的形成、东部陆架的沉降与海陆格局的形成,以及长江黄河为代表的东部水系的调整等重大地质事件中都扮演了关键角色,同时也控制了自青藏高原到中国东部边缘海这一重要源汇体系的形成演化.

2)晚新生代以来我国三级地貌格局已经形成,东亚季风环流也早在中新世晚期形成. 华北地区发育两个沉积体系:主要受构造及地貌格局控制的河湖相沉积地层和主要受到东亚季风控制的风成沉积体系. 同时,华北不同区域由于构造作用和季风强弱的变化,河湖相地层和风成沉积常相互交替、覆盖,不同区域或以河湖相地层为主,或以风成黄土沉积为主.

3)新生代青藏高原隆升导致中国地形宏观格局发生巨大变化,黄河、长江为代表的中国东部水系发生重大调整. 黄河贯通三门峡进入华北平原,巨量的泥沙从中上游黄土高原搬运至华北平原,在华北平原上形成了一个巨大的扇体,并由西向东逐步推移,这一过程

深刻改变了华北平原的地表过程和源汇体系,对华北平原以及边缘海沉积环境有着巨大的影响;而长江的贯通也导致了中游江汉盆地和下游苏北盆地沉积环境的巨大变化,古近纪时期江汉盆地为内陆咸化盆地,未堆积大范围河流沉积物,新近纪则开始发育厚层河流砂砾沉积物.

4)北方黄土和南方红土壤是晚新生代重要气候事件的沉积记录. 黄土高原风成堆积由中新世—上新世风成红土(22~3.5 Ma)、晚中新世—上新世的三趾马红土(8~2.6 Ma)和第四纪黄土(2.6~0 Ma)组成;南方红土壤是我国中、低纬度地区在第四纪季风气候影响下形成的特征沉积物,底界年龄一般在0.7~1.2 Ma. 北方黄土和南方红土壤记录的气候变化,与全球具有相似性,22 Ma至今黄土高原连续的风尘堆积精确记录了晚新生代以来的气候演变,与深海氧同位素所解释的全球变化十分吻合. 南方红土壤记录的古气候、古环境信息能够与黄土进行较好的对横向比. 第四纪青藏高原的隆升导致亚洲季风的演变,晚中新世以来三趾马红土和第四纪黄土沉积记录了亚洲季风的演化历史,南方红土壤的矿物学和地球化学特征也经历了与青藏高原隆升相一致的变化.

5)晚新生代中国东部发生多次海侵事件,在华北平原、苏北盆地、长江三角洲地区发育了典型的海相层. 但晚更新世以来海侵发生的次数、时间以及海侵的强度目前仍有争议. 渤海湾地区和长江口地区海侵

层所表现的模式与全球海平面曲线存在明显差异,其原因则主要归因于年代学方法的误差和区域构造运动的影响。渤海湾沿岸 MIS3 期海侵事件强度明显高于 MIS5 期;东部大陆架和南黄海地区 MIS5 时期海侵最强, MIS3 时期海侵较弱;苏北平原灌云地区海侵强度为 MIS5>MIS1>MIS3>MIS7,而苏北平原西部 4 次海侵强度表现为为 MIS3≈MIS5>MIS7>MIS1。

6)新生代以来中国西部三大岩区的火山活动划分为 3 个时期:古新一始新世(60~40 Ma)仅限于西羌塘地区,以产出钠质基性火山岩为代表;渐新世一晚中新世(30~10 Ma)在西藏和甘肃、云南三地钾质熔岩喷发为主;中新世末至第四纪(<10 Ma)集中产出在西藏东、北部和云南的部分地区。东南沿海雷琼及环北部湾地区分布着中国南方最大的一片第四纪火山岩。

### 参考文献(References):

- [1]姜作勤. 国内外区域地质调查全过程信息化的现状与特点[J]. 地质通报, 2008, 27(7): 956-964.  
Jiang Z Q. Present status and features of informationization of the full process of regional geological survey at home and abroad[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(7): 956-964.
- [2]陈克强. 面向 21 世纪的中国区域地质调查工作[J]. 中国区域地质, 1995(1): 1-5.  
Chen K Q. China's regional geological survey work facing the 21st century[J]. Regional Geology of China, 1995(1): 1-5. (in Chinese)
- [3]胡道功, 刘凤山, 吴珍汉, 等. 欧美地质填图方法: 经验、试点与建议——以东昆仑造山带地质填图试验为例[M]. 北京: 地质出版社, 2013.  
Hu D G, Liu F S, Wu Z H, et al. Geological mapping techniques in Europe and America: Experience, experiments and suggestions, taking the geological mapping test in the east Kunlun orogenic belts as an example[M]. Beijing: Geology Press, 2013. (in Chinese)
- [4]胡健民, 陈虹, 梁霞, 等. 特殊地区地质填图技术方法及应用成果[J]. 地质力学学报, 2017, 23(2): 181.  
Hu J M, Chen H, Liang X, et al. Geological mapping techniques in special areas and their achievements[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(2): 181. (in Chinese)
- [5]胡健民, 陈虹. 覆盖区区域地质填图指导思想与方法体系的创新与探索——特殊地质地貌区填图试点项目成果概述[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 1001-1002.  
Hu J M, Chen H. Innovation and exploration of guidance thought and method systems of regional geological mapping in covered areas[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 1001-1002. (in Chinese)
- [6]胡健民, 陈虹, 邱士东, 等. 覆盖区区域地质调查(1:50 000)思路、原则与方法[J]. 地球科学, 2020, 45(12): 4291-4312.  
Hu J M, Chen H, Qiu S D, et al. Thoughts, principles and methods of regional geological survey in covered area (1:50 000)[J]. Earth Science, 2020, 45(12): 4291-4312.
- [7]辜平阳, 陈锐明, 胡健民, 等. 高山峡谷区 1:50 000 填图方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
Gu P Y, Chen R M, Hu J M, et al. Guide book of 1:50 000 geological mapping methods in alpine-gorge area[M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [8]吕勇, 潘明, 山克强, 等. 岩溶区 1:50 000 填图方法指南[M]. 北京: 科学出版社.  
Lü Y, Pan M, Shan K Q, et al. Guide book of 1:50 000 geological mapping methods in karst area[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- [9]Dong S W, Li T D, Gao R, et al. Progress of SinoProbe: Deep exploration in China 2008-2012[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(S1): 122.
- [10]董树文, 李廷栋, 陈宣华, 等. 深部探测揭示中国地壳结构、深部过程与成矿作用背景[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 201-225.  
Dong S W, Li T D, Chen X H, et al. SinoProbe revealed crustal structures, deep processes, and metallogenic background within China continent[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 201-225.
- [11]胡健民. 特殊地区地质填图工程概况[J]. 地质力学学报, 2016, 22(4): 803-808.  
Hu J M. Introduction of geological mapping engineering in special area[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(4): 803-808. (in Chinese)
- [12]王国灿, 陈超, 胡健民, 等. 戈壁荒漠覆盖区 1:50 000 填图方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
Wang G C, Chen C, Hu J M, et al. Guide book of 1:50 000 geological mapping methods in gobi desert covered area[M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [13]李向前, 赵增玉, 邱士东, 等. 长三角平原区 1:50 000 填图方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
Li X Q, Zhao Z Y, Qiu S D, et al. Guide book of 1:50 000 geological mapping methods in Yangtze River delta plane area[M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [14]田世攀, 王东明, 苏艳民. 森林沼泽浅覆盖区 1:50 000 填图方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2021.  
Tian S P, Wang D M, Su Y M. Guide book of 1:50 000 geological mapping methods in forest and swamp shallow covered area[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [15]张云强, 专少鹏, 魏文通, 等. 京津冀山前冲洪积平原区 1:50 000 填图方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
Zhang Y Q, Zhuan S P, Wei W T, et al. Guide book of 1:50 000 geological mapping methods in Beijing-Tianjin-Hebei Piedmont

- alluvial plain[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [16]李振宏, 陈虹, 施炜, 等. 活动构造发育区 1:50 000 填图方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- Li Z H, Chen H, Shi W, et al. Guide book of 1:50 000 geological mapping methods in active tectonics region[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [17]李朝柱, 傅建利, 王书兵, 等. 黄土覆盖区 1:50 000 填图方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- Li C Z, Fu J L, Wang S B, et al. Guide book of 1:50 000 geological mapping methods in loess covered area[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [18]卜建军, 吴俊, 邓飞, 等. 中国南方强风化层覆盖区 1:50 000 填图方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- Bu J J, Wu J, Deng F, et al. Guide book of 1:50 000 geological mapping methods in strongly weathered area in southern China[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [19]刘士毅. 物探技术的第三根支柱[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- Liu S Y. The third pillar of geophysical technology[M]. Beijing: Geology Press, 2016. (in Chinese)
- [20]吴俊, 卜建军, 谢国刚, 等. 区域化探数据在华南强烈风化区地质填图中的应用[J]. 地质力学学报, 2016, 22(4): 955-966.
- Wu J, Bu J J, Xie G G, et al. Application of regional geochemical data in geological mapping in strongly weathered area in southern China[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(4): 955-966.
- [21]喻劲松, 荆磊, 王乔林, 等. 特殊地质地貌区填图物化探技术应用[J]. 地质力学学报, 2016, 22(4): 893-906.
- Yu J S, Jing L, Wang Q L, et al. Application of geophysical and geochemical prospecting techniques in special geological and geomorphic areas[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(4): 893-906.
- [22]于长春, 孙杰, 张迪硕, 等. 基于多源遥感与航空物探数据的岩性分类方法[J]. 地质通报, 2022, 41(2/3): 210-217.
- Yu C C, Sun J, Zhang D S, et al. Lithologic classification method based on multi-source remote sensing and aerogeophysical data[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(2/3): 210-217.
- [23]徐强. 我国区域地质调查数字采集系统研究取得重大进展[J]. 地质论评, 2002, 48(2): 167, 146.
- Xu Q. Major progress in the digital acquisition system of regional geological investigation of China[J]. Geological Review, 2002, 48(2): 167, 146.
- [24]张克信, 王国灿, 陈奋宁, 等. 青藏高原古近纪—新近纪隆升与沉积盆地分布耦合[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2007, 32(5): 583-597.
- Zhang K X, Wang G C, Chen F N, et al. Coupling between the uplift of Qinghai-Tibet Plateau and distribution of basins of Paleogene-Neogene[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(5): 583-597.
- [25]Jones S. Introducing sedimentology[M]. Edinburgh: Dunedin Academic Press, 2015.
- [26]张培震, 张会平, 郑文俊, 等. 东亚大陆新生代构造演化[J]. 地震地质, 2014, 36(3): 574-585.
- Zhang P Z, Zhang H P, Zheng W J, et al. Cenozoic tectonic evolution of continental eastern Asia[J]. Seismology and Geology, 2014, 36(3): 574-585.
- [27]任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 85-93.
- Ren J S, Niu B G, Liu Z G. Soft collision, superposition orogeny and polycyclic suturing[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3): 85-93.
- [28]葛肖虹, 任收麦, 马立祥, 等. 青藏高原多期次隆升的环境效应[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 118-130.
- Ge X H, Ren S M, Ma L X, et al. Multi-stage uplifts of the Qinghai-Tibet Plateau and their environmental effects[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6): 118-130.
- [29]李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 381-391.
- Li J J, Fang X M, Pan B T, et al. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(5): 381-391.
- [30]Li J J, Fang X M, Van der Voo R, et al. Magnetostratigraphic dating of river terraces: Rapid and intermittent incision by the Yellow River of the northeastern margin of the Tibetan Plateau during the Quaternary[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B5): 10121-10132.
- [31]程绍平, 邓起东, 闵伟, 等. 黄河晋陕峡谷河流阶地和鄂尔多斯高原第四纪构造运动[J]. 第四纪研究, 1998(3): 238-248.
- Cheng S P, Deng Q D, Min W, et al. Yellow River and Quaternary tectonic movements of the Ordos Plateau[J]. Quaternary Sciences, 1998(3): 238-248.
- [32]陈发虎, 范育新, Madsen D B, 等. 河套地区新生代湖泊演化与“吉兰泰-河套”古大湖形成机制的初步研究[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5): 866-873.
- Chen F H, Fan Y X, Madsen D B, et al. Preliminary study on the formation mechanism of the “Jilantai-Hetao” megalake and the lake evolutionary history in Hetao region[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(5): 866-873.
- [33]王苏民, 吴锡浩, 张振克, 等. 三门古湖沉积记录的环境变迁与黄河贯通东流研究[J]. 中国科学:D 辑, 2001, 31(9): 760-768.
- Wang S M, Wu X H, Zhang Z K, et al. Sedimentary records of environmental evolution in the Sanmen Lake Basin and the Yellow River running through the Sanmenxia Gorge eastward into the sea[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2002, 45(7): 595-608.
- [34]张家声, 徐杰, 万景林, 等. 太行山山前中—新生代伸展拆离构造和年代学[J]. 地质通报, 2002, 21(4/5): 207-210.
- Zhang J S, Xu J, Wan J L, et al. Meso-Cenozoic detachment zones

- in the front of the Taihang Mountains and their fission-track ages[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(4/5): 207-210.
- [35] 吴忱, 张秀清, 马永红. 太行山、燕山主要隆起于第四纪[J]. *华北地震科学*, 1999, 17(3): 1-7.
- Wu C, Zhang X Q, Ma Y H. The Taihang and Yan mountains rose mainly in Quaternary[J]. *North China Earthquake Sciences*, 1999, 17(3): 1-7.
- [36] 徐杰, 高战武, 孙建宝, 等. 区域伸展体制下盆-山构造耦合关系的探讨——以渤海湾盆地和太行山为例[J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 165-174.
- Xu J, Gao Z W, Sun J B, et al. A preliminary study of the coupling relationship between basin and mountain in extensional environments: A case study of the Bohai Bay Basin and Taihang Mountain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 165-174.
- [37] 马寅生, 赵逊, 赵希涛, 等. 太行山南缘新生代的隆升与断陷过程[J]. *地球学报*, 2007, 28(3): 219-233.
- Ma Y S, Zhao X, Zhao X T, et al. The Cenozoic rifting and uplifting process on the southern margin of Taihangshan uplift [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(3): 219-233.
- [38] 龚明权. 新生代太行山南段隆升过程研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2010.
- Gong M Q. Uplifting process of southern Taihang Mountain in Cenozoic [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2010.
- [39] 张蒙, 李鹏霄. 太行山南段主要隆升时期探讨[J]. *国土与自然资源研究*, 2014(4): 55-57.
- Zhang M, Li P X. Discussion on the main uplift period of the southern segment of Taihang Mountains [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2014(4): 55-57.
- [40] 张蕾, 张绪教, 武法东, 等. 太行山南缘晚更新世以来河流阶地的发育及其新构造运动意义[J]. *现代地质*, 2013, 27(4): 791-798.
- Zhang L, Zhang X J, Wu F D, et al. River terraces' development and significance of neotectonic movement on the southern margin of Taihang Mountains since Late Pleistocene[J]. *Geoscience*, 2013, 27(4): 791-798.
- [41] 张哲, 张军龙. 第四纪太行山南段隆升问题的探讨[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(10): 87-92.
- Zhang Z, Zhang J L. Discussion on the uplift of the south section of Taihang Mountain in Quaternary period [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(10): 87-92.
- [42] 马寅生, 崔盛芹, 吴淦国, 等. 辽西医巫闾山的隆升历史[J]. *地球学报*, 2000, 21(3): 245-253.
- Ma Y S, Cui S Q, Wu G G, et al. Uplift history of the Yiwulushan Mountains in west Liaoning [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2000, 21(3): 245-253.
- [43] 吴中海, 吴珍汉. 燕山及邻区晚白垩世以来山脉隆升历史的低温热年代学证据[J]. *地质学报*, 2003, 77(3): 399-406.
- Wu Z H, Wu Z H. Low-temperature thermochronological analysis of the uplift history of the Yanshan Mountain and its neighboring area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(3): 399-406.
- [44] 李越, 季建清, 涂继耀, 等. 燕山东部柳江地区构造属性新解与郯庐断裂系活动[J]. *岩石学报*, 2009, 25(3): 675-681.
- Li Y, Ji J Q, Tu J Y, et al. Structure of Liujiang terrain and implications for displacement of Tanlu fault system [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(3): 675-681.
- [45] 陈详高, 张忠奎, 臧文秀. 北京房山花岗岩闪长岩中锆石的裂变径迹年龄测定和热历史研究[J]. *岩石学报*, 1986, 2(1): 40-44.
- Chen X G, Zhang Z K, Zang W X. Study on fission track dating of zircon and thermal history of the Fangshan granodiorite in Beijing [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1986, 2(1): 40-44.
- [46] 翟鹏济, 张峰, 赵云龙. 从裂变径迹分析探讨房山岩体地质热历史[J]. *地球化学*, 2003, 32(2): 188-192.
- Zhai P J, Zhang F, Zhao Y L. Thermal history of the Fangshan granodiorite intrusion, Beijing: Evidence from fission tracks of apatites and sphenes [J]. *Geochimica*, 2003, 32(2): 188-192.
- [47] 冯乾乾, 邱楠生, 常健, 等. 房山岩体构造-热演化: 来自(U-Th)/He 年龄的约束[J]. *地球科学*, 2018, 43(6): 1972-1982.
- Feng Q Q, Qiu N S, Chang J, et al. Tectonothermal evolution of Fangshan pluton: Constraints from (U-Th)/He Ages [J]. *Earth Science*, 2018, 43(6): 1972-1982.
- [48] 陈子健. 燕山西段延庆-丰宁地区白垩纪岩体剥露过程的低温热年代学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- Chen Z J. Low-temperature thermochronological study on the exhumation process of Cretaceous plutons in Yanqing-Fengning area of the western Yanshan belt [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [49] 李理, 钟大赉. 泰山新生代抬升的裂变径迹证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(2): 457-464.
- Li L, Zhong D L. Fission track evidence of Cenozoic uplifting events of the Taishan Mountain, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(2): 457-464.
- [50] 王振兰, 王金铎, 季建清, 等. 鲁西隆起与济阳拗陷箕状断陷形成时代研究[J]. *石油学报*, 2008, 29(2): 206-212.
- Wang Z L, Wang J D, Ji J Q, et al. Research on formation age of dust pan fault depression in Luxi uplift and Jiyang depression [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 29(2): 206-212.
- [51] 唐智博, 李理, 时秀朋, 等. 鲁西隆起蒙山晚白垩世—新生代抬升的裂变径迹证据[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2011, 50(2): 127-133.
- Tang Z B, Li L, Shi X P, et al. Fission track thermochronology of late Cretaceous-Cenozoic uplifting events of the Mengshan Mountain in the western Shandong rise, China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2011, 50(2): 127-133.
- [52] Grimmer J C, Jonckheere R, Enkelmann E, et al. Cretaceous-

- Cenozoic history of the southern Tan-Lu fault zone: Apatite fission-track and structural constraints from the Dabie Shan (eastern China) [J]. *Tectonophysics*, 2002, 359(3/4): 225–253.
- [53]周祖翼, 许长海, Reiners P W, 等. 大别山天堂寨地区晚白垩世以来剥露历史的(U-Th)/He 和裂变径迹分析证据[J]. *科学通报*, 2003, 48(6): 598–602.
- Zhou Z Y, Xu C H, Reiners P W, et al. Late Cretaceous-Cenozoic exhumation history of Tiantangzhai region of Dabieshan orogen: Constraints from (U-Th)/He and fission track analysis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(11): 1151–1156.
- [54]Hu S B, Raza A, Min K, et al. Late Mesozoic and Cenozoic thermotectonic evolution along a transect from the North China craton through the Qinling orogen into the Yangtze craton, central China[J]. *Tectonics*, 2006, 25(6): TC6009.
- [55]Ge X, Shen C B, Yang Z, et al. Low-temperature thermochronology constraints on the Mesozoic-Cenozoic exhumation of the Huangling massif in the Middle Yangtze Block, Central China[J]. *Journal of Earth Science*, 2013, 24(4): 541–552.
- [56]李庶波, 王岳军, 张玉芝, 等. 南太行山中新世隆升过程: 磷灰石裂变径迹证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(3): 460–469.
- Li S B, Wang Y J, Zhang Y Z, et al. Meso-Cenozoic uplifting of south Taihang Mountains: Constraints from apatite fission track data [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39(3): 460–469.
- [57]Wu L, Wang F, Yang J H, et al. Meso-Cenozoic uplift of the Taihang Mountains, North China: Evidence from zircon and apatite thermochronology [J]. *Geological Magazine*, 2020, 157(7): 1097–1111.
- [58]Cao X Z, Li S Z, Xu L Q, et al. Mesozoic-Cenozoic evolution and mechanism of tectonic geomorphology in the central North China Block: Constraint from apatite fission track thermochronology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 114: 41–53.
- [59]侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中-新生代构造演化研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(6): 845–851.
- Hou G T, Qian X L, Cai D S. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(6): 845–851.
- [60]秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 黄海地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1989.
- Qin Y S, Zhao Y Y, Chen L R, et al. *Geology of Yellow Sea*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1989. (in Chinese)
- [61]刘国纬. 黄河下游治理的地质基础[J]. *中国科学(地球科学)*, 2011, 41(10): 1511–1523.
- Liu G W. On the geo-basis of river regulation in the lower reaches of the Yellow River[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(4): 530–544.
- [62]Yi L, Ye X Y, Chen J B, et al. Magnetostratigraphy and luminescence dating on a sedimentary sequence from northern East China Sea: Constraints on evolutionary history of eastern marginal seas of China since the Early Pleistocene [J]. *Quaternary International*, 2014, 349: 316–326.
- [63]Zhao D B, Wan S M, Jiang S J, et al. Quaternary sedimentary record in the northern Okinawa Trough indicates the tectonic control on depositional environment change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 516: 126–138.
- [64]Liu J, Zhang X H, Mei X, et al. The sedimentary succession of the last ~3.50 Myr in the western South Yellow Sea: Paleoenvironmental and tectonic implications[J]. *Marine Geology*, 2018, 399: 47–65.
- [65]Zhao Y, Cao W H, Hu C H, et al. Analysis of changes in characteristics of flood and sediment yield in typical basins of the Yellow River under extreme rainfall events [J]. *CATENA*, 2019, 177: 31–40.
- [66]Chen J, Wang Z H, Wei T Y, et al. Clay minerals in the Pliocene-Quaternary sediments of the southern Yangtze coast, China: Sediment sources and palaeoclimate implications[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 3(3): 297–308.
- [67]Yue W, Jin B F, Zhao B C. Transparent heavy minerals and magnetite geochemical composition of the Yangtze River sediments: Implication for provenance evolution of the Yangtze Delta [J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 364: 42–52.
- [68]闫纪元, 胡健民, 王东明, 等. 黄淮海平原晚新生代重大地质事件 [J]. *地质通报*, 2021, 40(5): 623–648.
- Yan J Y, Hu J M, Wang D M, et al. The critical geological events in the Huang-Huai-Hai Plain during the Late Cenozoic [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(5): 623–648.
- [69]Yi L, Deng C L, Xu X Y, et al. Paleo-megalake termination in the Quaternary: Paleomagnetic and water-level evidence from south Bohai Sea, China[J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 319: 1–12.
- [70]中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- Department of Marine Geology, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences. *Geology of Bohai*[M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)
- [71]张克信, 王国灿, 季军良, 等. 青藏高原古近纪-新近纪地层分区与序列及其对隆升的响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(12): 1632–1654.
- Zhang K X, Wang G C, Ji J L, et al. Paleogene-Neogene stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qinghai-Tibet Plateau and their response to uplift of the plateau[J]. *Science China Earth Science*, 2010, 53(9): 1271–1294.
- [72]张克信, 王国灿, 洪汉烈, 等. 青藏高原新生代隆升研究现状[J]. *地质通报*, 2013, 32(1): 1–18.
- Zhang K X, Wang G C, Hong H L, et al. The study of the Cenozoic uplift in the Tibetan Plateau: A review [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(1): 1–18.

- [73]郑家坚, 徐钦琦, 金昌柱. 中国北方晚更新世哺乳类动物群的划分及其地理分布[J]. 地层学杂志, 1992, 16(3): 171-181, 190.  
Zheng J J, Xu X Q, Jin C Z. Division of the late pleistocene mammalian fauna in North China and its geographic distribution[J]. Journal of Stratigraphy, 1992, 16(3): 171-181, 190.
- [74]安芷生, 刘晓东. 东亚季风气候的历史与变率[J]. 科学通报, 2000, 45(3): 238-249.  
An Z S, Liu X D. History and variability of monsoon climate in East Asia[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(3): 238-249. (in Chinese)
- [75]蒋复初, 吴锡浩, 肖华国, 等. 中原邙山黄土及构造与气候耦合作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 45-51.  
Jiang F C, Wu X H, Xiao H G, et al. Mangshan loess in China central plains and the coupling effect between tectonics and climate [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(1): 45-51.
- [76]潘保田, 王均平, 高红山, 等. 河南扣马黄河最高级阶地古地磁年代及其对黄河贯通时代的指示[J]. 科学通报, 2005, 50(3): 255-261.  
Pan B T, Wang J P, Gao H S, et al. Paleomagnetic dating of the topmost terrace in Kouma, Henan and its indication to the Yellow River's running through Sanmen Gorges [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(7): 657-664.
- [77]Hu Z B, Pan B T, Bridgland D, et al. The linking of the upper-middle and lower reaches of the Yellow River as a result of fluvial entrenchment [J]. Quaternary Science Reviews, 2017, 166: 324-338.
- [78]Kong P, Jia J, Zheng Y. Time constraints for the Yellow River traversing the Sanmen Gorge [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014, 15(2): 395-407.
- [79]吴锡浩, 蒋复初, 王苏民, 等. 关于黄河贯通三门峡东流入海问题 [J]. 第四纪研究, 1998, 18(2): 188.  
Wu X H, Jiang F C, Wang S M, et al. On problem of the Yellow River passing through the Sanmen Gorge and flowing east into sea[J]. Quaternary Sciences, 1998, 18(2): 188.
- [80]Jiang F C, Fu J L, Wang S B, et al. Formation of the Yellow River, inferred from loess-palaeosol sequence in Mangshan and lacustrine sediments in Sanmen Gorge, China [J]. Quaternary International, 2007, 175(1): 62-70.
- [81]Zheng H B, Huang X T, Ji J L, et al. Ultra-high rates of loess sedimentation at Zhengzhou since Stage 7: Implication for the Yellow River erosion of the Sanmen Gorge[J]. Geomorphology, 2007, 85(3/4): 131-142.
- [82]Shang Y, Prins M A, Beets C J, et al. Aeolian dust supply from the Yellow River floodplain to the Pleistocene loess deposits of the Mangshan Plateau, central China: Evidence from zircon U-Pb age spectra[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 182: 131-143.
- [83]刘书丹, 李广坤, 李玉信, 等. 从河南东部平原第四纪沉积物特征探讨黄河的形成与演变[J]. 河南地质, 1988, 6(2): 20-24.  
Liu S D, Li G K, Li Y X, et al. Discussion on the formation and evolution of the Yellow River from the characteristics of Quaternary sediments in the eastern plain of Henan Province[J]. Henan Geology, 1988, 6(2): 20-24. (in Chinese)
- [84]薛铎. 黄河东段形成时代管见[J]. 河南地质, 1996, 14(2): 110-112.  
Xue D. A humble opinion of the formed age for the eastern section of the Yellow River[J]. Henan Geology, 1996, 14(2): 110-112.
- [85]杨守业, 蔡进功, 李从先, 等. 黄河贯通时间的新探索[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(2): 15-20.  
Yang S Y, Cai J G, Li C X, et al. New discussion about the run-through time of the Yellow River[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(2): 15-20.
- [86]杨吉龙, 胥勤勉, 胡云壮, 等. 渤海湾西岸钻孔记录的沉积演化过程和沉积物风化强度、物源重建[J]. 地球科学, 2018, 43(S1): 287-300.  
Yang J L, Xu Q M, Hu Y Z, et al. The sedimentary evolution process, weathering intensity and provenance reconstruction insight from borehole records of Bohai Bay [J]. Earth Science, 2018, 43(S1): 287-300.
- [87]Yao Z Q, Shi X F, Qiao S Q, et al. Persistent effects of the Yellow River on the Chinese marginal seas began at least ~880 ka ago[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 2827.
- [88]Zhang J, Wan S M, Clift P D, et al. History of Yellow River and Yangtze River delivering sediment to the Yellow Sea since 3.5 Ma: Tectonic or climate forcing? [J]. Quaternary Science Reviews, 2019, 216: 74-88.
- [89]Xiao G Q, Sun Y Q, Yang J L, et al. Early Pleistocene integration of the Yellow River I: Detrital-zircon evidence from the North China Plain[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 546: 109691.
- [90]张磊, 刘嘉麒, 秦小光. 第四纪黄河入淮成因机制与环境效应的研究现状及存在问题[J]. 第四纪研究, 2018, 38(2): 441-453.  
Zhang L, Liu J Q, Qin X G. The environmental effects and mechanism of the Yellow River flooding into the Huaibei Plain during Quaternary: A brief review[J]. Quaternary Sciences, 2018, 38(2): 441-453.
- [91]徐近之. 淮北平原与淮河中游的地文[J]. 地理学报, 1953, 19(2): 203-233.  
Xu J Z. The geography of the Huaibei Plain and the middle reaches of the Huaihe River[J]. Acta Geographica Sinica, 1953, 19(2): 203-233. (in Chinese)
- [92]冯大奎, 张光业. 全新世黄河下游平原地貌和自然环境的演变[J]. 河南大学学报(自然科学版), 1988(1): 27-33.  
Feng D K, Zhang G S. Holocene evolution of geomorphology and natural environment in the plain of the lower reaches of the Yellow

- River[J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 1988(1): 27-33.
- [93]王强, 田国强. 中国东部晚第四纪海侵的新构造背景[J]. *地质力学学报*, 1999, 5(4): 41-48.
- Wang Q, Tian G Q. The Neotectonic setting of late Quaternary transgressions on the eastern coastal plain of China[J]. *Journal of Geomechanics*, 1999, 5(4): 41-48.
- [94]张晋. 3.5 Ma 以来南黄海西部沉积演化史及其环境响应[D]. 青岛: 中国科学院大学, 2019.
- Zhang J. Sedimentary evolution in the western South Yellow Sea and its environmental response since 3.5 Ma [D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [95]王强, 刘立军, 王卫东, 等. 环渤海地区及华北平原第四纪古环境变迁机制[J]. *地质调查与研究*, 2004, 27(3): 129-138.
- Wang Q, Liu L J, Wang W D, et al. The mechanism of quaternary palaeoenvironmental change in Circum-Bohai-Sea region and North China Plain [J]. *Geological Survey and Research*, 2004, 27(3): 129-138.
- [96]叶青超. 华北平原地貌体系与环境演化趋势[J]. *地理研究*, 1989, 8(3): 10-20.
- Ye Q C. Landform system of the great plain of north China and its tendency of environmental evolution [J]. *Geographical Research*, 1989, 8(3): 10-20.
- [97]Zheng H B, Clift P D, Wang P, et al. Pre-Miocene birth of the Yangtze River[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(19): 7556-7561.
- [98]贾军涛, 郑洪波, 黄湘通, 等. 长江三角洲晚新生代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对长江贯通的指示[J]. *科学通报*, 2010, 55(4/5): 350-358.
- Jia J T, Zheng H B, Huang X T, et al. Detrital zircon U-Pb ages of Late Cenozoic sediments from the Yangtze delta: Implication for the evolution of the Yangtze River[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1520-1528.
- [99]范代读, 李从先, Yokoyama K, 等. 长江三角洲晚新生代地层独居石年龄谱与长江贯通时间研究[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2004, 34(11): 1015-1022.
- Fan D D, Li C X, Yokoyama K, et al. Monazite age spectra in the Late Cenozoic strata of the Changjiang delta and its implication on the Changjiang run-through time [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(10): 1718-1727.
- [100]舒强, 张茂恒, 赵志军, 等. 苏北盆地 XH-1 钻孔晚新生代沉积记录特征及其与长江贯通时间的关联[J]. *地层学杂志*, 2008, 32(3): 308-314.
- Shu Q, Zhang M H, Zhao Z J, et al. Sedimentary record from the XH-1 core in north Jiangsu Basin and its implication on the Yangtze River run-through time [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2008, 32(3): 308-314.
- [101]向芳, 杨栋, 田馨, 等. 湖北宜昌地区第四纪沉积物中锆石的 U-Pb 年龄特征及其物源意义[J]. *矿物岩石*, 2011, 31(2): 106-114.
- Xiang F, Yang D, Tian X, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of zircons in the Quaternary sediments from the Yichang area of Hubei Province and its provenance significance [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2011, 31(2): 106-114.
- [102]Shao L, Li C A, Yuan S Y, et al. Neodymium isotopic variations of the Late Cenozoic sediments in the Jiangnan Basin: Implications for sediment source and evolution of the Yangtze River [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 45: 57-64.
- [103]范代读, 李从先. 长江贯通时限研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(2): 121-131.
- Fan D D, Li C X. Reviews on researches of timing of the Yangtze draining the Tibetan Plateau to the East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(2): 121-131.
- [104]黄湘通, 郑洪波, 杨守业, 等. 长江三角洲 DY03 孔沉积物元素地球化学及其物源示踪意义[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(2): 299-307.
- Huang T X, Zheng H B, Yang S Y, et al. Investigation of sedimentary geochemistry of core DY03 in the Yangtze Delta: Implications to tracing provenance [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(2): 299-307.
- [105]Fu X W, Zhu W L, Geng J H, et al. The present-day Yangtze River was established in the Late Miocene: Evidence from detrital zircon ages [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 205: 104600.
- [106]Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present [J]. *Science*, 2001, 292(5517): 686-693.
- [107]郭正堂. 黄土高原见证季风和荒漠的由来[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(4): 421-437.
- Guo Z T. Loess Plateau attests to the onsets of monsoon and deserts [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2017, 47(4): 421-437.
- [108]程峰. 中国南方更新世红土沉积物的特征及其物源研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- Cheng F. Study on characteristics and source provenance of the Pleistocene red earth sediments in southern China [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [109]An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times [J]. *Nature*, 2001, 411(6833): 62-66.
- [110]Zhao L L, Hong H L, Fang Q, et al. Monsoonal climate evolution in southern China since 1.2 Ma: New constraints from Fe-oxide records in red earth sediments from the Shengli section, Chengdu Basin [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 473: 1-15.
- [111]Hong H L, Gu Y S, Li R B, et al. Clay mineralogy and

- geochemistry and their palaeoclimatic interpretation of the Pleistocene deposits in the Xuancheng section, southern China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2010, 25(5): 662-674.
- [112] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21.
- [113] Ren M E. Sediment discharge of the Yellow River, China: Past, present and future — A synthesis[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(2): 1-8.
- [114] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision[J]. *Science*, 1975, 189(4201): 419-426.
- [115] Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet[J]. *Science*, 1992, 225(5052): 1663-1670.
- [116] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 211-280.
- [117] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 2001, 294(5547): 1671-1677.
- [118] Royden L H, Burchfiel B C, Van der Hilst R D. The geological evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Science*, 2008, 321(5892): 1054-1058.
- [119] Zhu R X, Zhang H F, Zhu G, et al. Craton destruction and related resources[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2017, 106(7): 2233-2257.
- [120] 朱日祥, 徐义刚. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(9): 1346-1356.
- Zhu R X, Xu Y G. The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(9): 1340-1350.
- [121] 李容全. 黄河、永定河发育历史与流域新生代古湖演变间的相互关系[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 1988, 24(4): 84-93.
- Li R Q. The relationship between developments of the Yellow River and the Yongding River, and the evolution of fossil lake of drainage basin in the Cenozoic Era[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 1988, 24(4): 84-93.
- [122] 李吉均, 方小敏, 马海洲, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 1996, 26(4): 316-322.
- Li J J, Fang X M, Ma H Z, et al. Geomorphological evolution of the upper reaches of the Yellow River and the uplift of the Tibetan Plateau in the Late Cenozoic[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 1996, 26(4): 316-322. (in Chinese)
- [123] Lin A M, Yang Z Y, Sun Z M, et al. How and when did the Yellow River develop its square bend? [J]. *Geology*, 2001, 29(10): 951-954.
- [124] 张珂, 蔡剑波. 黄河黑山峡口最高阶地宇宙核素的初步年龄及所反映的新构造运动[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(1): 85-91.
- Zhang K, Cai J B. Preliminary result of the dating by TCN technique of the highest terrace of the Heishanxia Gorge Mouth, northeast margin of Tibetan Plateau and its expression of neotectonic movement in that area[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1): 85-91.
- [125] 潘保田, 苏怀, 刘小丰, 等. 兰州东盆地最近 1.2 Ma 的黄河阶地序列与形成原因[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(2): 172-180.
- Pan B T, Su H, Liu X F, et al. Iver terraces of the Yellow River and their genesis in eastern Lanzhou Basin during last 1.2 Ma[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 172-180.
- [126] 刘天明, 李有利. 山西保德黄河最高阶地形成的时代[J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(1): 101-103, 108.
- Liu Y M, Li Y L. Formation age of the highest terrace of the Yellow River in Baode area[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2007, 23(1): 101-103, 108.
- [127] Pan B T, Hu Z B, Wang J P, et al. A magnetostratigraphic record of landscape development in the eastern Ordos Plateau, China: Transition from Late Miocene and Early Pliocene stacked sedimentation to Late Pliocene and Quaternary uplift and incision by the Yellow River[J]. *Geomorphology*, 2011, 125(1): 225-238.
- [128] Pan B T, Hu Z B, Wang J P, et al. The approximate age of the planation surface and the incision of the Yellow River [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 356/357: 54-61.
- [129] Hu X F, Kirby E, Pan B T, et al. Cosmogenic burial ages reveal sediment reservoir dynamics along the Yellow River, China [J]. *Geology*, 2011, 39(9): 839-842.
- [130] Nie J S, Stevens T, Rittner M, et al. Loess plateau storage of northeastern Tibetan Plateau-derived Yellow River sediment [J]. *Nature Communications*, 2006, 6: 8511.
- [131] Liu Y M. Neogene fluvial sediments in the northern Jinshaan Gorge, China: Implications for early development of the Yellow River since 8 Ma and its response to rapid subsidence of the Weihe-Shanxi graben [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 546: 109675.
- [132] Wang Z, Nie J S, Wang J P, et al. Testing contrasting models of the formation of the upper Yellow River using heavy-mineral data from the Yinchuan Basin drill cores [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46: 10338-10345.
- [133] Jia L Y, Zhang X J, Ye P S, et al. Development of the alluvial and lacustrine terraces on the northern margin of the Hetao Basin, Inner Mongolia, China: Implications for the evolution of the Yellow River in the Hetao area since the Late Pleistocene [J]. *Geomorphology*, 2016, 263: 87-98.
- [134] Wu X, Wang H J, Bi N S, et al. Evolution of a tide-dominated abandoned channel: A case of the abandoned Qingshuigou course, Yellow River [J]. *Marine Geology*, 2020, 422: 106116.
- [135] Li J, Xia J Q, Ji Q F. Rapid and long-distance channel incision in

- the Lower Yellow River owing to upstream damming[J]. CATENA, 2021, 196: 104943.
- [136] Hassan M A, Church M, Xu J X, et al. Spatial and temporal variation of sediment yield in the landscape: Example of Huanghe (Yellow River) [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(6): L06401.
- [137] Stevens T, Carter A, Watson T P, et al. Genetic linkage between the Yellow River, the Mu Us desert and the Chinese Loess Plateau [J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 78: 355–368.
- [138] 赵希涛, 贾丽云, 胡道功. 内蒙河套地区黄河阶地与新近纪砾石层的发现及其对黄河发育、中国河流古老性与河湖共存论的意义[J]. 地质学报, 2018, 92(4): 845–886.
- Zhao X T, Jia L Y, Hu D G. Discoveries of fluvial terraces and Neogene gravels in the Hetao area, Inner Mongolia; Implications for the development of the Yellow River, antiquity of Chinese rivers, and coexistence theory of rivers and lakes[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(4): 845–886.
- [139] 朱照宇. 黄河中游河流阶地的形成与水系演化[J]. 地理学报, 1989, 44(4): 429–440.
- Zhu Z Y. The formation of river terraces and evolution of drainage system in the middle Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 1989, 44(4): 429–440.
- [140] 岳乐平, 雷祥义, 屈红军. 黄河中游水系的阶地发育时代[J]. 地质论评, 1997, 43(2): 186–192.
- Yue L P, Lei X Y, Qu H J. The age of terrace development in the middle reaches of the Yellow River[J]. Geological Review, 1997, 43(2): 186–192.
- [141] Sun J M. Long-term fluvial archives in the Fen Wei Graben, central China, and their bearing on the tectonic history of the India-Asia collision system during the Quaternary [J]. Quaternary Science Reviews, 2005, 24(10/11): 1279–1286.
- [142] Li J J, Fang X M, Song C H, et al. Late Miocene-Quaternary rapid stepwise uplift of the NE Tibetan Plateau and its effects on climatic and environmental changes[J]. Quaternary Research, 2014, 81(3): 400–423.
- [143] Hu Z B, Pan B T, Guo L Y, et al. Rapid fluvial incision and headward erosion by the Yellow River along the Jinshaan gorge during the past 1.2 Ma as a result of tectonic extension[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 133: 1–14.
- [144] 王青. 试论史前黄河下游的改道与古文化的发展[J]. 中原文物, 1993(4): 65–74.
- Wang Q. On the diversion of the prehistoric lower reaches of the Yellow River and the development of the ancient culture[J]. Cultural Relics of Central China, 1993(4): 65–74. (in Chinese)
- [145] 岑仲勉. 黄河变迁史[M]. 北京: 人民出版社, 1957.
- Cen Z M. History of the change of the Yellow River[M]. Beijing: People's Publishing House, 1957. (in Chinese)
- [146] 江苏省地质矿产局. 江苏省及上海市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 346–370.
- Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Jiangsu Province and Shanghai City [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 346–370. (in Chinese)
- [147] 程瑜, 李向前, 赵增玉, 等. 长江三角洲地区 TZK3 孔碎屑锆石 U–Pb 年龄及其物源意义[J]. 地质力学学报, 2018, 24(5): 635–644.
- Cheng Y, Li X Q, Zhao Z Y, et al. Detrital zircon U–Pb ages and its provenance significance in the TZK3 core from the Yangtze River Delta[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(5): 635–644.
- [148] Zhang L, Qin X G, Liu J Q, et al. Geochemistry of sediments from the Huaibei Plain (East China): Implications for provenance, weathering, and invasion of the Yellow River into the Huaihe River [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 121: 72–83.
- [149] 程瑜, 李向前, 赵增玉, 等. 苏北盆地 TZK9 孔磁性地层及重矿物组合特征研究[J]. 地质力学学报, 2016, 22(4): 994–1003.
- Cheng Y, Li X Q, Zhao Z Y, et al. Magnetostratigraphy and heavy minerals records of TZK9 core in Subei Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(4): 994–1003.
- [150] 王强, 张玉发, 袁桂邦, 等. MIS3 阶段以来河北黄骅北部地区海侵与气候期对比[J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 79–95.
- Wang Q, Zhang Y F, Yuan G B, et al. Since MIS3 stage the correlation between transgression and climatic changes in the north Huanghua area, Hebei[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(1): 79–95.
- [151] 陈宇坤, 李振海, 邵永新, 等. 天津地区第四纪年代地层剖面研究[J]. 地震地质, 2008, 30(2): 383–399.
- Chen Y K, Li Z H, Shao Y X, et al. Study on the Quaternary chronostratigraphic section in Tianjin area [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(2): 383–399.
- [152] Cheng Y, Li X Q, Shu J W, et al. Sedimentary evolution and transgressions of the western Subei basin in eastern China since the Late Pliocene[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(1): 155–166.
- [153] 林景星. 华北平原第四纪海进海退现象的初步认识[J]. 地质学报, 1977, 51(2): 109–116.
- Lin C H. Preliminary notes on Quaternary transgressions and regressions in N. China Plain[J]. Acta Geologica Sinica, 1977, 51(2): 109–116.
- [154] 赵松龄, 杨光复, 苍树溪, 等. 关于渤海湾西岸海相地层与海岸线问题[J]. 海洋与湖沼, 1978, 9(1): 15–25.
- Zhao S L, Yang G F, Cang S X, et al. On the marine stratigraphy and coastlines of the western coast of the gulf of Bohai[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1978, 9(1): 15–25.
- [155] 杨子庚, 李幼军, 丁秋玲, 等. 试论河北平原东部第四纪地质几个基本问题[J]. 地质学报, 1979, 53(4): 264–279, 363–364.
- Yang Z G, Li Y J, Ding Q L, et al. Some fundamental problems of

- Quaternary geology of Eastern Hebei Plain [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1979, 53(4): 264-279, 363-364.
- [156]王靖泰, 汪品先. 中国东部晚更新世以来海面升降与气候变化的关系[J]. *地理学报*, 1980, 35(4): 299-312.
- Wang J T, Wang P X. Relationship between sea-level changes and climatic fluctuations in East China since Late Pleistocene [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1980, 35(4): 299-312.
- [157]汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]. *地质学报*, 1981, 55(1): 1-13.
- Wang P X, Min Q B, Bian Y H, et al. Strata of Quaternary transgressions in East China: A preliminary study [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1981, 55(1): 1-13.
- [158]王强. 渤海湾西岸第四纪海相及海陆过渡相介形虫化石群及古地理[J]. *海洋地质研究*, 1982, 2(3): 36-46, 86.
- Wang Q. The ostracod fauna of marine and marineterrestrial transitional facies in western coast of the Bohai Gulf (North China) and paleogeography during Quaternary [J]. *Marine Geological Research*, 1982, 2(3): 36-46, 86.
- [159]王强, 李凤林, 李玉德, 等. 十五万年来渤海西、南岸平原海岸线变迁[C]//赵松龄, 苍树溪. 中国海平面变化(IGCP200 项中国工作组). 北京: 海洋出版社, 1986: 43-52.
- Wang Q, Li F L, Li Y D, et al. The change of shore line in west-southern plain of the Bohai Sea since 150 ka [C]//Zhao S L, Cang S X. Sea-level change in China (IGCP200 Project China National Working Group). Beijing: China Ocean Press, 1986: 43-52.
- [160]王强, 李凤林. 渤海湾西岸第四纪海陆变迁[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1983, 3(4): 83-89.
- Wang Q, Li F L. The changes of marine-continental conditions in the west coast of the bohai gulf during quaternary [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1983, 3(4): 83-89.
- [161]吴标云, 李从先. 长江三角洲第四纪地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1987.
- Wu B Y, Li C X. Quaternary geology of the Yangtze River Delta [M]. Beijing: China Ocean Press, 1987. (in Chinese)
- [162]Siddall M, Rohling E J, Almogi-Labin A, et al. Sea-level fluctuations during the last glacial cycle [J]. *Nature*, 2003, 423(6942): 853-858.
- [163]杨子赓. 从北海第四纪地层、沉积研究中所得到的启示[J]. *海洋地质动态*, 1987(12): 3-6.
- Yang Z G. Enlightenment from the study of Quaternary stratigraphy and sedimentation in the North Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 1987(12): 3-6. (in Chinese)
- [164]汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等. 关于东海残留沉积物的微体化石特征[J]. *海洋学报*, 1980, 2(1): 67-78.
- Wang P X, Min Q B, Bian Y H, et al. Micropaleontologic characteristics of relict sediments of the East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1980, 2(1): 67-78.
- [165]易亮, 姜兴钰, 田立柱, 等. 渤海盆地演化的年代学研究[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(5): 1075-1087.
- Yi L, Jiang X Y, Tian L Z, et al. Geochronological study on Plio-Pleistocene evolution of Bohai Basin [J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(5): 1075-1087.
- [166]汪品先, 成鑫荣. 东海底质中钙质超微化石的分布[J]. *海洋学报*, 1988, 10(1): 76-85.
- Wang P X, Cheng X R. Distribution of calcareous nannoplankton in bottom sediments of the East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1988, 10(1): 76-85. (in Chinese)
- [167]Liu J X, Liu Q S, Zhang X H, et al. Magnetostratigraphy of a long Quaternary sediment core in the South Yellow Sea [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 144: 1-15.
- [168]杨达源, 陈可锋, 舒肖明. 深海氧同位素第3阶段晚期长江三角洲古环境初步研究[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(5): 525-530.
- Yang D Y, Chen K F, Shu X M. A preliminary study on the paleoenvironment during MIS 3 in the Changjiang Delta region [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 525-530.
- [169]张振克, 谢丽, 张云峰, 等. 苏北平原 MIS 3 阶段海侵事件的沉积记录[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(5): 883-891.
- Zhang Z K, Xie L, Zhang Y F, et al. Sedimentary records of the MIS 3 transgression event in the North Jiangsu Plain, China [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(5): 883-891.
- [170]Imbrie J, Hays J D, Martinson D G, et al. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marined  $\delta^{18}\text{O}$  record [C]//Berger A. *Milankovitch and Climate*, Part 1. New York: Reidel Publishing Company, 1984: 269-305.
- [171]Shackleton N J. Oxygen isotopes, ice volume and sea level [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1987, 6(3/4): 183-190.
- [172]Chappell J, Omura A, Esat T, et al. Reconciliation of Late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 141(1/4): 227-236.
- [173]Yim W W S, Ivanovich M, Yu K F. Young age bias of radiocarbon dates in pre-Holocene marine deposits of Hong Kong and implications for Pleistocene stratigraphy [J]. *Geo-Marine Letters*, 1990, 10(3): 165-172.
- [174]Li Y, Tsukamoto S, Shang Z W, et al. Constraining the transgression history in the Bohai Coast China since the Middle Pleistocene by luminescence dating [J]. *Marine Geology*, 2019, 416: 105980.
- [175]夏非, 殷勇, 王强, 等. MIS3 晚期以来江苏中部海岸的层序地层[J]. *地质学报*, 2012, 86(10): 1696-1712.
- Xia F, Yin Y, Wang Q, et al. Sequence stratigraphy of the central part of north Jiangsu coasts since Late MIS3, eastern China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(10): 1696-1712.
- [176]尚帅, 范代读, 王强, 等. MIS 3 以来浙江温瑞平原 YQ0902 孔古环境与古气候变化记录[J]. *古地理学报*, 2013, 15(4): 551-564.

- Shang S, Fan D D, Wang Q, et al. Records of palaeoenvironment and palaeoclimate changes since the MIS 3 in Borehole YQ0902 at Wenrui Plain, Zhejiang Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(4): 551–564.
- [177] 同济大学海洋地质系三角洲科研组. 全新世长江三角洲的形成和发育[J]. *科学通报*, 1978, 23(5): 310–313.
- Delta Research Group, Department of Marine Geology, Tongji University. Formation and evolution of the Yangtze River Delta [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1978, 23(5): 310–314. (in Chinese)
- [178] 肖国桥, 郭正堂, 陈宇坤, 等. 渤海湾西岸 BZ1 钻孔的磁性地层学研究[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(5): 909–916.
- Xiao G Q, Guo Z T, Chen Y K, et al. Magnetostratigraphy of BZ1 borehole in west coast of Bohai Bay, northern China [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 909–916.
- [179] 邓万明. 中国西部新生代火山活动及其大地构造背景——青藏及邻区火山岩的形成机制[J]. *地学前缘*, 2003, 10(2): 471–478.
- Deng W M. Cenozoic volcanic activity and its geotectonic background in West China: Formative excitation mechanism of volcanic rocks in Qinghai-Xizang and adjacent districts [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(2): 471–478.
- 
- (上接第 258 页/Continued from Page 258)
- [33] Гагиева А М, Жуланова И Л. Геохронометрия среднепалеозойских вулканитов Омолонского массива: сопоставление K-Ar, Rb-Sr, U-Pb, геологическая интерпретация (Северо-Восток Азии) [J]. *Тихоокеанская Геология*, 2011, 30(3): 3–19.
- Gagieva A M, Zhulanova N L. The geo-chronometry of Middle Paleozoic that is vulcanite the Omolon massif: Comparison of K-Ar, Rb-Sr and U-Pb geological interpretations (Northeast of Asia) [J]. *Pacific Ocean Geology*, 2011, 30(3): 3–19. (in Russian)
- [34] 王廷印, 王金荣, 刘金坤, 等. 宗乃山-沙拉扎山陆壳基底火山弧火成岩组合及地球化学特征[J]. *地球化学*, 1994, 23(S1): 162–172.
- Wang T Y, Wang J R, Liu J K, et al. Igneous rock associations and geochemical characteristics of volcanic arc with continental crustal basement in Zongnaishan-Shalazhashan [J]. *Geochimica*, 1994, 23(S1): 162–172.
- [35] 葛肖虹, 刘永江, 任收麦, 等. 对阿尔金断裂科学问题的再认识 [J]. *地质科学*, 2001, 36(3): 319–325.
- Ge X H, Liu Y J, Ren S M, et al. Re-understanding on some academic problems of the Altun fault [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(3): 319–325.
- [36] 吕洪波, 冯雪东, 王俊, 等. 狼山发现蛇绿混杂岩——华北克拉通与中亚造山带碰撞边界的关键证据[J]. *地质论评*, 2018, 64(4): 777–805.
- Lv H B, Feng X D, Wang J, et al. Ophiolitic mélanges found in Mount Langshan as the crucial evidence of collisional margin between North China craton and Central Asian orogenic belt [J]. *Geological Review*, 2018, 64(4): 777–805.
- [37] Zorin Y A. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt, Trans-Baikal Region (Russia) and Mongolia [J]. *Tectonophysics*, 1999, 306(1): 33–56.
- [38] 唐克东, 邵济安, 李永飞. 松嫩地块及其研究意义[J]. *地学前缘*, 2011, 18(3): 57–65.
- Tang K D, Shao J A, Li Y F. Songnen massif and its research significance [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(3): 57–65.
- [39] 郝爱华, 葛玉辉, 李绪俊, 等. 中亚蒙古造山带东段造山事件的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 同位素年代学证据[J]. *中国地质*, 2006, 33(5): 1059–1065.
- Xi A H, Ge Y H, Li X J, et al. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar isotope chronological evidence for the orogeny in the eastern segment of the Central Asian-Mongolian orogenic belt [J]. *Geology in China*, 2006, 33(5): 1059–1065.
- [40] 乔秀夫, 高林志, 彭阳, 等. 内蒙古腮林忽洞群综合地层和白云鄂博矿床赋矿微晶丘[J]. *地质学报*, 1997, 71(3): 202–211.
- Qiao X F, Gao L Z, Peng Y, et al. Composite stratigraphy of the Sailinhuodong Group and ore-bearing micrite mound in the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 71(3): 202–211.