

文章编号: 1006-6616 (2008) 04-0295-25

晚新生代地壳构造运动研究

高名修

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要: 通过地球表面清、新的构造地貌与现代水文网记录, 研究晚新生代年轻地壳构造运动。研究发现高原—山带—盆地排列有序形影相依的定式, 与现代水文网的演化相辅相成, 揭示高原边缘山带本质上就是高原边缘流水深切切割的产物。论证了于晚中新世时期全球曾准平原化, 发育了全球统一的准平原, 散布全球不同高度的高原面、齐平山顶部与盆地底面时代相当可广泛对比。现代构造地貌演化始于导致晚中新世准平原面分裂解体的上新世以来, 同时证明晚新生代地壳构造运动属垂直拱曲块断差异升降构造运动, 仅在某些特定部位局部派生次级不同规模的引张构造变形和层间滑动薄皮挤压构造变形。现代水文网发育经历了上新世—早更新世属盆地向心水系伴以河湖相沉积, 以及中更新世以来串珠状水系与相关的河流相沉积, 两套地层呈假整合或不整合, 明确记录了晚新生代地壳构造运动进程的两个主要阶段。约近 70~80 万年的中更新世以来, 新一轮强烈的地壳的差异升降构造运动, 显著的改造了已有的格局。自俄罗斯远东山地, 经蒙古高原和青藏高原至印度西北阿拉瓦利山, 地球表面规模最雄伟的、分开太平洋水系与北冰洋水系的亚洲巨型分水岭的出现, 标志新兴的全球现代构造地貌与水文网的形成, 奠定了今日构造地貌与水文网的景观。研究表明, 大陆与大洋晚中新世全球统一准平原面一脉相承, 晚新生代地壳构造运动完全可以对比。深入系统研究年轻的晚新生代地壳构造运动不仅有实用价值, 同时也有重要的科学意义, 特别是为探究全球构造运动本质和地球动力学提供了一个新的视角。

关键词: 晚新生代地壳构造运动; 构造地貌; 准平原面; 高原—山带—盆地 (平原) 组合; 拱曲隆升; 块断差异升降运动

中图分类号: P546

文献标识码: A

0 前言

地球表面清晰、新鲜的构造地貌与现代水系, 实质上是晚新生代地壳构造运动最主要的地质记录, 晚新生代地壳构造运动保存完整的清新地质记录, 有利于直观广泛的地质对比, 对研究地壳构造运动具有较其他遭受过多期次改造破坏、残缺不全的任何老地质时期的地质

收稿日期: 2008-01-03

作者简介: 高名修 (1933), 男, 研究员, 1956 年毕业于原北京地质学院水文地质及工程地质系。中国地震局地质研究所研究员。长期从事地震构造与地震预报, 全球构造与大陆地球动力学以及环境工程地质研究与教学。

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

记录所无法比拟的优势,为认识和研究地壳构造运动开启了一扇窗口。前苏联地质学家奥布鲁切夫等早就注意到与欧洲阿尔卑斯构造运动性质完全不同的年轻的和现代地壳构造运动,并定义第三纪末到第四纪的年轻构造运动为“新构造运动”,作为大地构造学的一个分支学科。新构造运动一词虽被广泛接纳和采用,然而,由于不同研究者视角不同,对新构造运动的时限和理解各异,甚至完全相佐,致使新构造运动一词的时限和内涵迥异。为避免混淆,作者直接采用晚新生代地壳构造运动一词。晚新生代的时限以全球可对比的中新世晚期,或可持续至上新世初的准平原面作为判定标志,把发生在该准平原面之后,导致该准平原面分裂解体、变形的地壳构造运动,即上新世以来的年轻地壳构造运动,称之为晚新生代地壳构造运动。之所以把研究晚新生代地壳构造运动与其他时段地壳构造运动相区别,主要有三大特有的属性。一则是地球表面的年轻构造地貌与现代水系保持了地壳构造运动最清新、最直观的地质记录,为研究地壳构造运动、全球构造,乃至地球动力学提供了一个重要切入点;二是晚新生代地壳构造运动造就了人类赖以生存的环境,并直接或间接与地震、火山以及其它形形色色相关地质灾害息息相关,为不得不面对的课题;三是影响和制约包括油、气、水和砂金等矿产资源的运移与再富集。晚新生代地壳构造运动虽然是认识地壳构造运动本质的一个重要切入点,然而却往往被统揽于“中、新生代构造运动”名下,实际上对晚新生代地壳构造运动只是一带而过,缺乏实质性内容,研究薄弱,在很大程度上是被忽视了。

本文从构造地貌与现代水系入手,再解读晚新生代地壳构造运动,从中获得点滴新认识,借此与大家分享;期望能引起对晚新生代地壳构造运动的关注,提供一个从现代地壳构造运动的动态角度,处理与环境命题和地震、矿山开采、流体资源开发利用等实际课题,以及自然地质灾害预测、预报、防治对策的新思路。同时也为深入探究地壳构造运动、全球构造乃至地球动力学,以及验证某些流行的观念与学说提供一个新的视角。

1 地球表面构造地貌的基本组合特征

无论大陆或大洋,不同规模的隆起与凹陷、高原与盆地(平原)相匹配的现象,往往被视为地球表面的基本构造地貌单元^[1]。进一步考察不难发现,大陆的年轻山带无不位处隆起与凹陷或者高原与盆地之间的转折过渡部位,显示高原(Plateau)—山脉(Mountains)—盆地(Basin)(P-M-B)‘三位一体’、相辅相成、形影相依、有序排列的组合定式^[2](图1)。这一构造地貌组合定式具普遍意义,无论古生代的阿巴拉契亚、中生代的阿尔卑斯,还是新生代的喜马拉雅等山带均不例外,不仅大陆,大洋也是如此。事实上P-M-B构成地球表面最基本的构造地貌架构^[3]。

地球表面构造地貌的P-M-B系统系内、外营力共同作用的结果。作为外营力重要组成部分的流水动力作用,既受控于地表岩体构造变动,又是塑造构造地貌的重要动力源。全球的水系几乎全都源于高原,在高原边缘切过并镶入今天的年轻山带,属先成河,无论喜马拉雅山、阿尔卑斯山或落基山等山带的河流均不例外^[4-7]。所有高原边缘的先成河比降普遍显著增大。以雅鲁藏布江为例,在长约2000km的河段落差近5000m,然而,约60%的比降集中在横穿喜马拉雅山的大拐弯峡谷段^[8]。印度斯河经西藏扎达盆地边缘深切喜马拉雅山高差也在1000m以上。其实,所有切过喜马拉雅山带河流的河床比降都明显远大于均衡剖面^[9]。源于青藏高原的长江具相似的剖面,大致宜昌以上年轻的山区河流比降显较宜昌以下盆地区的比降大^[10]。一致指示高原边缘年轻山带强烈垂直下切与向源侵蚀的水动力条件。流水动力

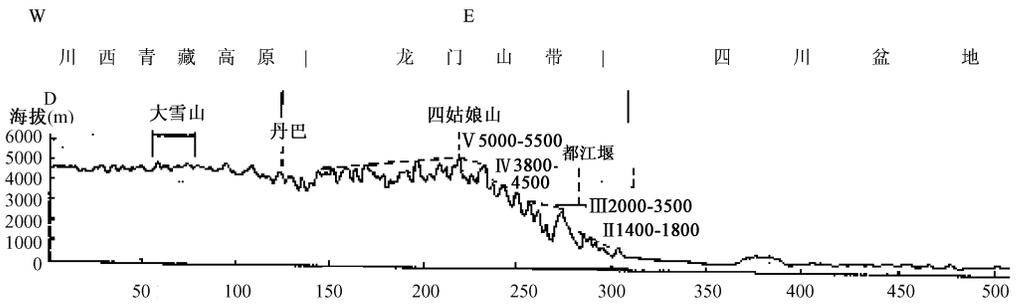


图 1 地球表面 P-M-B 型基本构造地貌组合，川西青藏高原—
龙门山—四川盆地地形剖面^[3]

Fig. 1 The essential assemblage of morphostructure on the Earth surface shown
as plateau mountain belt-basin (P-M-B)^[3]

条件受分水岭与侵蚀基准面或排泄基准面间高差或势能的制约，高原隆升与盆地下降差异升降运动过渡带的高原边缘地表径流强烈溯源侵蚀与深切割的有利条件，直接‘雕塑’了年轻的山带，这就意味着年轻山带本质上就是被侵蚀切割破坏残缺不全的高原边缘，通常以保持与高原面高程大致相当的山顶齐平面为特征，例如青藏高原边缘、年轻山带山顶齐平的高程与高原面高程一脉相承（图 2）。

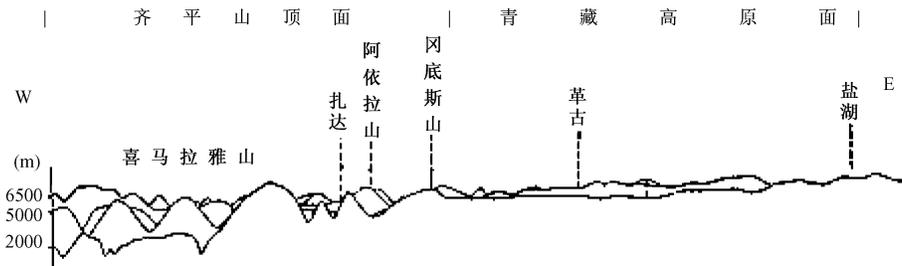


图 2 青藏高原西南缘喜马拉雅山深切割山顶齐平^[11]

Fig. 2 Summit concordance caused by deep dissection in the Himalayas
at southwestern margin of the Tibetan Plateau^[11]

之所以称 P-M-B 为基本构造地貌组合是因为实际构造地貌结构显然要更多样和复杂得多，但都可剖析和追溯到它们的构件仍然是以 P-M-B 组合为基调。最基本的复合组合可归为两类，一类为并列对称的 P-M-B 地垒式组合型，呈盆地—山脉—中央高原或平顶山—山脉—盆地（B-M-P-M-B）型。中央高原的跨度可以不同，无论小跨度的塔里木盆地—天山—准噶尔盆地或是大跨度的青藏高原，无论中央高原是否发生次级纵向张裂作用裂谷式断陷，如穿过小亚细亚半岛安纳托利亚中央高原与美国西部科罗拉多高原的盆—岭构造等，或是以澳大利亚、南非、南美、印度半岛等^[12]为代表中央高原下陷区，都属这一组合类型的实例。引人注目的是 B-M-P-M-B 型组合不仅在大陆，就是在岛弧^[13]（图 3A）或是大洋中脊^[14]（图 3B）也不例外，可算是地球表面名副其实的基本构造地貌组合。

另一类为 P-M-B 基本结构连续顺序排列，可解读上一级盆地面与下一级高原面相当（B=P），两 P=B 面间仍是侵蚀切割山带（M），即阶梯式 P-M-B=P-M-B=P-M-B 型构造地貌组合，这一阶梯式构造地貌组合也是地球表面地形按高程呈阶梯式成层现象的基础。从地球表

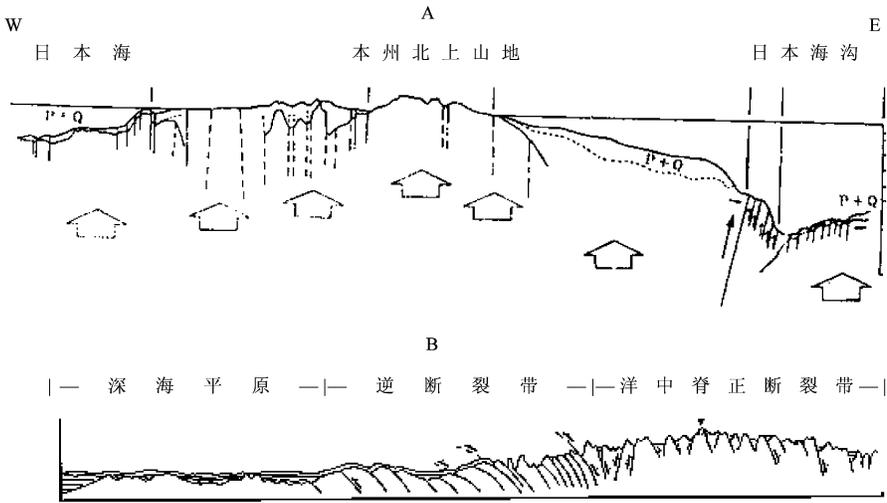


图3 海域 B-M-P-M-B 地垒型组合

Fig 3 The horst-like morphostructure assemblage of B-M-P-M-B in sea area

A—日本本州拱曲隆升伴以中央块断盆地^[13], 空心箭头示垂直上升力;

B—沿 N 13° 过大西洋中脊地形剖面^[14] 及地质解释^[15]。

面“屋顶”的青藏高原至东海剖面^[10]即为最具代表性的实例。

综上所述,地球表面的构造地貌虽然千变万化,但是组成地貌的基调万变不离其宗,即以P-M-B结构为基调的复杂组合系列。高原隆升、盆地下降伴以年轻山带的形成其实并不局限于构造地貌问题,而是研究晚新生代地壳构造运动的症结,也是探究全球构造和地球动力学必需面对的一个基本命题。

2 地球表面 P-M-B 构造地貌形成的时限

19世纪末叶全球大陆具普遍意义的准平原面问题就引起了研究者的广泛关注,而今处于高原面、山顶面或山顶齐平面与盆地底面普遍保存同时代的准平原面,明确揭示地球表面清新的P-M-B构造地貌形成大体是同时的,因而也就记录了晚新生代年轻构造运动的下限和起始时间。

2.1 高原广泛保存晚中新世准平原面

全球高原分水岭地区普遍残存时代基本可对比的准平原面,特别是非洲高原保存完好的多层地形,清晰的记录了四层不同高度的多期次夷平面,即晚中生代冈瓦纳古陆面残余,早新生代准平原面,以及两层晚新生代准平原面1和2^[4](图4),其中晚新生代两级被视为同一面分裂变形的结果,为研究准平原面提供了可对比的参照。晚新生代夷平面这一现象不仅在非洲,就是在我国,乃至全球都有广泛分布^{①[4~8 16~26]}。例如蒙古—戈壁准平原面^[19]、青藏高原晚中新世的山原面^[8 20]或‘主夷平面’^[21]相当,表明非洲的晚新生代夷平面1和2,蒙古高原的蒙古与戈壁准平原面,以及青藏高原的山原面与盆地面都相当,均属一期夷平原面

① 何科昭,何浩生.论滇西横断山的形成演化与自然环境之变迁.中国地质学会第四纪冰川及第四纪地质专业委员会,中国第四纪地质与地球表层系统科学讨论会论文摘要汇编,郑州,1994,4,14~19

变形的结果。特别值得关注和强调的是, 无论非洲的、蒙古的、或者青藏高原的晚新生代夷平面, 都是中新世或晚中新世同时代的, 这意味着这些准平原面是统一准平原面分裂解体的产物。

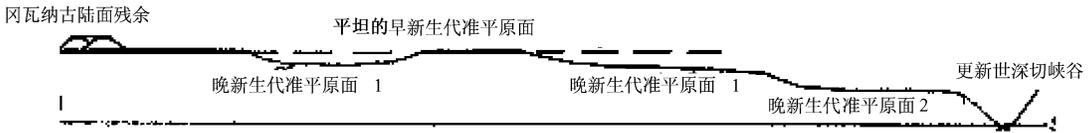


图4 非洲残存于高分水岭的晚中生代冈瓦纳古陆面, 晚白垩纪—古近纪准平原面构成非洲的基本面, 上覆中新统

Fig. 4 Late Mesozoic and Cenozoic peneplain in Africa continent

盆地只不过是同一准平原面变形下降接受了上新世—第四纪沉积的结果。青藏高原的主夷平面^[21]与邻近的云贵高原面^[22~23]、土耳其—伊朗高原面^[24]和印度西北分水岭阿拉瓦利岭隆起保存的中中新世以来的夷平面^[25]的时代基本可对比。蒙古高原面与广布的古生代—中生代水平地层、保持良好夷平面的西伯利亚地台山带的拱形隆起一脉相承^[6, 25~26]。西起南爱尔兰, 经中欧到波兰南部, 包括科西嘉岛和撒丁岛在内的起伏不一的分离高地与高原组成了欧洲海西地块, 以法国中央高原为代表, 也可识别分别为后海西、古近期和新近期三个不同时代的夷平面^[6]。北欧斯堪的纳维亚地盾主要出露前寒武结晶变质岩, 冰期前长期遭受侵蚀作用, 理论上不难识别两不同时代的夷平面, 一为广见于寒武纪平缓砂岩区, 被称为亚寒武或前寒武纪夷平面, 另一夷平面始于中生代, 主要形成于新生代早—中期, 或第四纪前, 因无盖层时代难以确定^[6]。北美科罗拉多高原大部分显生宙时期都处在海平面附近, 只是后来被抬升, 科罗拉多高原及其西南的索诺兰沙漠面均存在晚中新世夷平面^[27~28]。南美安第斯山中中新世遭受到强烈的地势夷平降低, 总面积可能仅次于青藏高原的南美阿尔蒂普拉诺, 秘鲁和中安第斯高原发育晚中新世区域性夷平面, 于阿尔蒂普拉诺高原的夷平面年龄确认为5 Ma^[29~31]。与南美高原相当的准平原面也可在南极追索到, 南极夷平面的年龄大致从白垩纪到新近纪^[31~32]。综上, 各大洲高原面基本保持有可对比的, 时代为晚中新世或可持续到上新世初期的准平原面。

2.2 平顶山与山顶齐平面大多残存晚中新世夷平面

虽然高原上残留的老山山顶面多与新近纪前的老夷平面有关, 但是高原周边受流水深切切割的年轻山带, 山顶同样普遍被侵蚀、夷平和准平原化, 大多保持如图2的平顶山和山顶齐平。经典和流行的板块说造山运动理论认为属不同时代的造山带, 大多保存有时代相当、可对比的夷平面, 诸如古生代美洲阿巴拉契亚山带^[16, 33]、中生代欧洲阿尔卑斯山带^[6, 17]和新生代喜马拉雅的山带, 滇西横断山、川西龙门山、天山和印度阿拉瓦利山^[25], 以及北美西部内华达和南美安第斯山等, 无例外地一致保持平顶或山顶齐平可对比的夷平面^[4~7, 16~17, 29, 31~33], 它们的时代均为晚中新世, 有的或可持续到上新世初期, 与高原夷平面的时代是一致的。

2.3 盆地沉积底部下伏晚中新世夷平面

从大陆到大洋的晚新生代年轻盆地, 广泛接受了时代基本相当、大体可对比的沉积, 其

所含动、植物化石与其它测年手段所确定地层时代主要为上新世—早更新世，大陆以河湖相为主，海域则为海相沉积，覆于上新世前的准平原面上，与下伏地层一般呈不整合。以东亚为例，从青藏高原直至西太平洋岛弧，青藏高原的羌塘组、扎达组；高原周边的西域砾岩、玉门砾岩、大邑砾岩、元谋组、昔格达组，以及印度北部喜马拉雅山前的锡瓦利克系；华北的泥河湾组、华北平原下的明化镇组等，相当沉积直延到苏北平原，日本称大阪组^[35]等。

俄罗斯西西伯利亚低地与毗邻的俄罗斯地台和欧洲低地，广大地区的古生代、中生代，直到新生代地层普遍保持水平产状，到处可见地形隆升和夷平，以及相伴的侵蚀深切切割和周期性沉积韵律交替的构造运动，低地与盆地普遍具上新统一第四系不整合覆于晚中新世夷平面上^[7, 25]。勘探证明欧洲阿尔卑斯山和喀尔巴阡山的山前盆地以中新世准平原面为底，充填上新世—早更新世年轻河—湖相与滨海沉积^[6, 35]。值得一提的是地中海水域及周边 6.2 ~ 5.0Ma 的蒸发岩事件（或所谓盐危机事件），记录了晚中新世时地中海曾被抬升与大西洋分离，海水干涸，海底暴露，事件与晚中新世夷平面时代一致，此后地中海再度下降接受上新世—第四纪沉积^[37]。与欧亚大陆隔洋相望的美洲，同样广泛发育晚中新世夷平面并构成盆地的底，普遍充填上新世—早更新世年轻的河—湖相沉积。例如北美西部太平洋边缘的一系列盆地，如加利福尼亚州 4 ~ 5Ma 后形成的本图拉和洛杉矶盆地都充填了巨厚的上新世—早更新世海岸和近岸沉积。伴随内华达山的隆起，其东北侧的盆—岭构造和其西南侧的大峡谷相应下降，以晚中新世夷平面为底，接受了上新世—早更新世年轻河—湖相沉积和滨海相，与下部地层不整合（图 5），特别值得强调的是同时代的夷平面和其上的上新世—早更新世

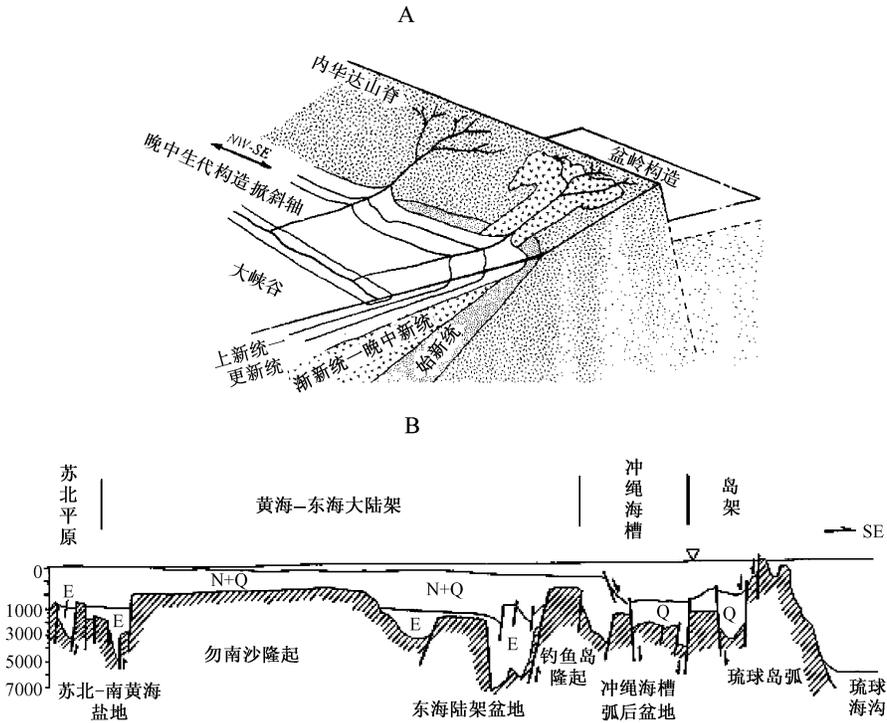


图 5 水平上新统一第四系 (N-Q) 与下伏地层不整合剖面

Fig. 5 The horizontal Pliocene-Quaternary unconformity underlain by continental or marine strata

A—加利福尼亚大峡谷盆地剖面^[37]；B—苏北平原—琉球海沟剖面（马道修等，1997，引自李祥根^[8]）。

沉积不仅在大陆盆地、低地和滨海, 并且直延到大陆架、边缘海、岛链和海沟(图3A, 图5A)^[37-40], 直到大陆架海盆地^[42](图5B)和深海盆地(图3B), 最近又在印度洋得到了验证^[43]。目前已有资料基本确认大洋普遍保存与大陆大体同时期的约7.5~6.0Ma的构造间断面^[44]。

综上, 可以看到晚中新世全球性准平原面或构成P-M-B基本构造地貌组合的高原面与山顶齐平的顶, 以及构成全球上新世—早更新世陆、海年轻沉积盆地和低地的底, 这一共性为在全球大陆、大洋范围广泛构造对比创造了有利的条件。较明确的记录了P-M-B基本构造地貌组合的发育和演化是发生在晚中新世或可持续到上新世初的全球性准平原面与构造间断面之后。同时也记录了全球地球表面构造地貌形成的同时性与地球表面的构造地貌本质上是晚中新世全球性准平原面分裂解体、变形的结果。故本文把晚中新世全球准平原面作为晚新生代地壳构造运动的底限, 把发生于其后、导致该准平原面分裂解体、变形的上新世—第四纪地壳构造运动定义为晚新生代地壳构造运动。

3 晚新生代地壳构造运动的两个主要演化阶段

现代水文网的发育与构造地貌的形成和演化彼此相辅相成, 如同晚新生代地壳构造运动的“应变计”, 通过流水动力作用相关的侵蚀与沉积作用在很大程度上记录了构造运动演化的历程, 为认识晚新生代地壳运动提供了重要的信息和科学依据。

3.1 现代水系纪录了的两个主要演化阶段

作为构造运动“应变计”的现代水系河谷构造地貌与相关沉积, 明确、清晰的记录了晚新生代构造地貌的演化至少历经过两个主要发展阶段。现代外流水系干流河谷构造地貌普遍呈“糖葫芦”似的宽、窄河谷交替的串珠状, 形象地描绘了彼此相对隔离的汇水盆地被年轻的河道切开彼此贯通的结果。例如长江的三峡、黄河的三门峡等就是这类贯通上、下游的河道。在河谷横断面上往往显示年轻的峡谷镶嵌于早期的宽谷之中, 形如喇叭口向上的谷中谷或盆中谷, 直观地记录了经纬分明的两代演化历程。与水系演化两个阶段相对应的两套不难区别的晚新生代相关沉积, 大陆区早期沉积属彼此相对隔离的盆地, 多呈独立向心水系汇水盆地, 主要接纳来自周边隆起高地碎屑物质的河湖相和湖相沉积; 滨海与海域则为滨海相与海相沉积, 这套沉积时代主要属上新世—早更新世。后期的沉积以河流相为主, 时代主要为中更新世以来。现代水文网的河谷地貌和相关沉积明确记录了晚新生代构造运动进程的两个主要阶段, 早期为晚中新世准平原面分裂解体形成P-M-B构造地貌雏形, 发育相对隔离汇水盆地和向心水系为特征; 后期P-M-B构造地貌进一步差异升降运动, 改造了早期孤立水系, 形成现代水系为特征的两期构造地貌演化阶段, 可粗略概括早期属‘成盆期’和晚期属‘成貌期’。

3.2 现代构造地貌形成于中更新世以来

继上新世之后, 全球构造运动再度进入大范围快速活动伴以显著岩浆活动, 最终造就了现代构造地貌, 标志现代构造地貌形成的直接与间接判据主要有三, 一是与构造地貌演化相辅相成的现代水文系形成于中更新世以来; 二是中更新世河流相沉积与下伏盆地河湖相地层不连续具沉积间断, 于某些特定构造部位则呈不整合; 三是受构造地貌制约的现代气候与环境变迁旁证现代构造地貌成型于中更新世以来。

首先, 已有资料表明, 无论我国或是全球贯穿上新世—早更新世分隔汇水盆的现代年轻

水系主要形成于中更新世以来, 这可从分水岭、河段和排泄基准等三方面的事实得到支持。控制区域或地区外流水系分水岭的形成一般不早于中更新世。以亚洲为例, 自东西伯利亚山地, 经蒙古高原—青藏高原, 至印度西北斜跨亚洲大陆的地形脊梁并构成现代亚洲巨型分水岭。这一巨型分水岭地形脊梁当是中更新世以来才加速隆升达到今天的高度^[2-4, 8, 21-23, 27]。亚洲巨型分水岭控制了内、外流水系的分化, 伴随分水岭的形成与演化, 分水岭地区逐渐荒漠化和内流水系湖泊盐碱化等标志事件。青藏高原分水岭高原内、外水系的分化与内流水系的成盐期主要发生在中更新世以来^[44-45]。再则, 现代年轻水系均切入并镶嵌于上新世—早更新世河湖相地层中, 与外流水系相关的沉积均不早于中更新世, 诸如位处分水岭东南侧的雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、元江和长江上游的金沙江等, 以及分水岭西北侧入阿拉伯海的印度河与入北冰洋的西西伯利亚鄂毕河与额尔齐斯河等。特别是指示外流水系形成的重要标志是最终切开贯通外流水系干流上、下游的峡谷, 完成现代外流水系大体是中更新世以来的事, 例如东北的黑龙江切开嘉荫峡, 松花江切开依兰峡形成松、辽、黑水系都在 0.7Ma 左右^①, 黄河上游快速下切与切开三门峡也在中更新世^②, 贯通长江中、下游的长江三峡于 0.5~0.8Ma 切开^[46, 47], 以及珠江水系的西江羚羊峡也大体是同时期的^[48]。本来流入古勒拿河的贝加尔古迳流, 于 0.8Ma~0.5Ma 改道向西南, 切开年轻的贝加尔湖滨山脉隆起, 经今安加拉河外流^③, 鄂毕河与额尔齐斯河均镶嵌上新世—早更新世河湖相地层中^[25]。太平洋东岸加利福尼亚大峡谷地区的现代外流水系同样始于 0.6Ma^[49], 东欧地台河谷也不早于中更新世^[50]。此外, 亚洲大陆东沿周边海域成为亚洲巨型分水岭东南侧外流水排泄基准也是中更新世以来的事。日本列岛上新世—早更新世大阪层的古生物群可与亚洲大陆泥河湾层对比^[34], 亚洲大陆早更新世的象、獏、野牛和熊等均见于日本列岛, 表明直到早更新世脊椎动物可迁徙于亚洲大陆和日本列岛之间。上世纪 70 年代以来, 于东海、黄海大陆架到台湾海峡也相继打捞到猛马象、北方原始牛等哺乳类古脊椎动物化石, 黄海一直延到长江三角洲还采到属寒冷环境草本植物的早更新世末孢子花粉, 甚至有人称“黄海草地”^{④⑤⑥[51, 52]}, 所有这一切都表明中国东海早更新世时当为大陆平原。然而, 亚洲大陆与日本列岛共有的晚中新世—早更新世长鼻类, 于中更新世时期在日本列岛已广泛演化为小体剑齿象变种, 该变种却绝迹于大陆^{④⑤⑥[34, 51]}, 以及亚洲种的象、熊、鹿、啮齿动物等经白令海峡迁移到美洲^[52]。中更新世以来大陆东沿大陆架下降, 致使南中国海到白令海峡所有港湾大致同时期被海水淹没, 并普遍具埋藏河谷^[4], 古河流沉积在大陆架水下可达百米深, 在大陆坡甚至水下千米深

① 初本君, 马广会, 鲁守刚. 距今 3.00Ma 以来黑龙江古水文网变迁. 中国地质学会第四纪冰川及第四纪地质专业委员会等. 中国第四纪地质与地球表层系统科学讨论会论文摘要汇编. 郑州, 1994. 4: 14~19.

② 谢广林. 河南省新构造运动的基本特征. 中南地质科技情报, 1975.

③ Kononov EE, Logatchev NA. History of the Baikal runoffs in the Anthropogene. In: XIII INQUA, China, 1991. 171.

④ Otsuka H. Pleistocene mammalian fauna in the East China Sea. In: 30th IGC. Abstracts 1996. 3 (3): 235.

⑤ Kamiya H, Kobayashi I, Takahashi K. Plio-Pleistocene biological migration between Asian continent and Japanese Islands. In: 30th IGC. Abstracts. 1996. 3 (3): 235.

⑥ Zheng Guangying. Sporollen (1.8Ma) characteristic and its climate epoch sequence in the Yellow Sea, China. In: XIII INQUA, China, 1991. 430.

尚有埋藏河谷^①[51,53]。从珠江三角洲^②至福建沿海^[54]直至俄国远东锡霍特山和萨哈林岛^①，一般缺中更新世前沉积，最年轻的为中更新世以来的河流沉积。中更新世以来，亚洲大陆东沿周边从南海到白令海峡下降为海域，形成亚洲巨型分水岭东南侧外流水系的排泄基准，台湾岛、日本列岛、乃至美洲等因而与亚洲大陆分隔开。按星野通平的研究^[53]，全球海面大幅上升也当是中更新世以来的事。

其次，上新世—早更新世盆地河—湖相沉积与上覆中更新世以来的年轻河流相沉积一般呈假整合接触，但于隆起前缘或盆缘，以及断裂活动等的块断差异升降变动转换过渡带，上新世—早更新世盆地沉积往往受到不同程度的构造变形，与上覆中更新世以来的年轻河相沉积则常呈不整合。这一不整合不仅在我国相当广泛，在全球也具普遍性。例如青藏高原及其周边^[55~58]，喜马拉雅山前中更新世河流相砾石（ Q_2 ）与下伏锡瓦利克系（ N_2-Q_1 ）间^[59]，新疆天山山前河流沉积（ Q_2 ）与下伏西域砾石层（ N_2-Q_1 ）间^[60]，甘肃祁连山前河西走廊酒泉砾岩（ Q_2 ）与玉门砾石层（ N_2-Q_1 ）间，川西盆地边缘雅安砾岩（ Q_2 ）与大邑砾岩层（ N_2-Q_1 ）间，秦岭山前河流沉积（ Q_2 ）与下伏泥河湾层（ N_2-Q_1 ）间^[61]等，直至长江中、下游的苏北平原^[62]与琉球岛弧^[63]，乃至海沟两侧与大陆架（图3A），和大洋深海盆地（图3B）也不例外，为广泛对比研究晚新生代构造运动提供了一个明确的、有意义的重要参照。只不过对运动的命名因地而异，最早由史蒂勒（1936）以南加州帕萨迪命名，欧洲的维拉方运动与之相当^[53]。在我国西部分别称羌塘运动、喀拉昆仑运动、西域运动、元谋运动等等，台湾称之为台湾运动或蓬莱运动^[64~65]，日本称六甲运动或岛弧运动^[13]等。受采用方法不同、仪器精度各异等因素影响，所定不整合时间略有出入，但大体与古地磁地质年表的布容正极性与松山反极性期界线相当，约在0.78Ma前后。这一不整合同时也界定了上新世—早更新世盆地沉积夹持在上、下两不整合之间，限定了成盆期盆地沉积的上、下界（图6）。

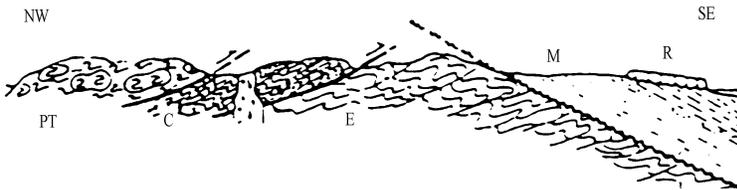


图6 琉球上新统一下更新统（M）与下伏变形古近统（E）和上覆水平中更新统（R）均呈不整合接触。C, PT为前新生代岩系^[66]。

Fig. 6 The unconformities between the Pliocene-Lower Pleistocene (M) and the overlying Middle Pleistocene (R) and the underlying deformed Eocene (E) at the Okinawa-Ryukyu^[66]

再则，20世纪90年代以来，中、外学者注意到构造运动对全球气候的影响与控制作用，特别是如青藏、南美和非洲等高原的大幅隆升成为新生代全球气候变迁的主要动力^[21,66~72]。构造运动在很大程度上是通过构造地貌制约影响环境与气候的变迁，现代环境和气候体系的改变与现代构造地貌的演化形影相依都是中更新世以来形成的。深海钻探测得近70Ma来氧同位素（ $\delta^{18}O$ ）的变动曲线，显示深海氧同位素在历经晚中新世—上新世早期缓

① Korotky AM, Vokov VG, Mikhova IM. Correlation of Quaternary marine and river terraces and estimation of intensity of tectonic movement on the south Far East. In: 30th IGC, Abstract, 1996, 3 (3): 198.

② 朱照宇, 梁池生, 郑洪汉, 等. 广州—湛江沿海第四纪地质与现代热带景观. 第三十届国际地质大会, 地质旅行路线指南 (T346), 1996.

慢波动之后,又进入了一个逐渐增长期,表明大西洋和北半球冰雪体积的增长和全球气候转冷^[67]。第四纪的主要冰期也发生在中更新世,我国青藏高原最大的冰期平均年龄为 0.71Ma ^[73];云南区域植被和气候对高原隆升的响应明显的气候转型发生在 0.73Ma ;南海底栖有孔虫灭绝事件发生在 0.62Ma ^[73];日本海深部生息的新近纪—第四纪早期底栖有孔虫,因冰川时期海底环境恶化而灭绝^[74]。虽然这方面已经累积了大量有说服力的资料,但仍有争辩环境气候造就构造地貌之说,称两者因果关系仍属鸡、蛋之争^[75]。尽管如此,撇开鸡、蛋之争,现代环境气候与现代构造地貌两者在形成时间上是一致的,它们在成因上相关也是合理的,从又一个侧面佐证现代构造地貌形成于中更新世以来。

4 晚新生代地壳构造运动反向现象

早、晚新生代构造盆在地空间上通常彼此不重叠,意味着早、晚新生代地壳构造运动是不连续的。晚中新世准平原面,以及上新世—早更新世盆地沉积与下伏地层不整合,直接记录了地壳构造运动间断。值得注意的是,晚新生代构造运动导致其前构造的回春活动具明显的反向现象。例如晚新生代的年轻断裂活动往往沿袭早期的老断裂回春再活动的结果,但断裂运动性质和方向却相当广泛的与原来的发生了反向现象。大多从早期的挤压性质转为张性块断性质,就是被视为经典碰撞挤压造山带的阿尔卑斯—扎格罗斯—喜马拉雅山带也不例外。例如喜马拉雅山前晚新生代以来已无活动挤压逆冲断层^[76],喜马拉雅山前主边界冲断层(MBT)和主中央冲断层(MCT)也是如此,沿断层许多段落已被证明为正断层^[77-82]。被作为缝合线的扎格罗斯断层,其实早期是一条正断层,后来才转为高角度逆冲断层,与板块构造期望的低角度冲断层不符^[83,84]。在阿尔卑斯与北亚平宁挤压构造带内缺失中、上新世的挤压变形,年轻构造属引张作用^[85],如叠加在阿尔卑斯挤压构造带上的晚新生代维也纳块断构造盆地,记录了阿尔卑斯挤压构造自中新世中期以来已转变为引张,上、下两构造层的变形与受力条件迥然不同^[86]。

板块构造说称之为转换断层的走滑断层,同样具反向现象。被视为平衡印度沿喜马拉雅碰撞带挤压亚洲大陆,夹持在川西左旋鲜水河断层与云南右旋红河断层两断裂带间的地块往东南“逃逸”滑脱,然而该“逃逸”地块南、北边界的走滑断层不仅今天的走滑方向是晚新生代以来反向的结果,并且兼具张性分量^[87]。鲜水河断层在晚新生代以前属右旋走滑兼挤压性质^[88],红河断层也大体同期反向。这就意味着,试图以晚新生代以来反向后的年轻断层走滑分量解释所设想的中生代以来的地块“逃逸”滑脱方向是困难的。对板块构造说举足轻重的北美西部圣安德烈斯、西南亚土耳其安纳托尼亚和新西兰阿尔卑斯三条“转换断层”,今天的断层力学性质与走滑方向其实都是上新世—更新世时期发生反向后的结果。圣安德烈斯断层本来是古近纪—新近纪具裂谷性质的垂直剪切带,以垂直运动为主,走滑只不过是垂直运动派生的,很难与挤压变形扯到一起^[86,89]。安纳托尼亚断层于晚中新世—早上新世实际上是左旋走滑断裂,只不过中更新世后才反向转为右旋走滑断裂^[90]。同样新西兰阿尔卑斯断层其纯走滑运动仅发生在中生代,晚中新世(10Ma)时反向活动,转为右旋逆冲斜滑断层,形成 $100\sim 1000$ 米巨厚的糜棱岩,强烈活动发生在 $10\sim 5\text{Ma}$,断层逆冲盘把阿尔卑斯片岩抬升了近 10km 出露到地表,巨大的垂直运动与走滑断裂的设想也并不相符;中更新世(0.7Ma)以来的断层发生在阿尔卑斯片岩中^[91]。从以上实例不难窥见到晚新生代地壳构造运动反向之一斑。

5 晚新生代构造运动的属性

全球在历经晚中新世全球性准平原化后, 上新世—第四纪又进入了新一轮构造活动期,

致使晚中新世全球性准平原面发生分裂解体和变形, 处于不同高程的解体准平原面片段分别构成 P-M-B 结构的高原面、山顶齐平面, 以及埋藏在年轻盆地或低地的底, 解读和复原准平原面的构造变动, 就为揭示晚新生代地壳构造运动的性质提供了重要的判据。因而地球表面年轻构造地貌与两套晚新生代相关沉积的构造变动与变形, 实质上就是晚新生代地壳构造运动最重要的地质记录, 为验证晚新生代地壳构造运动的性质提供了论据与可操作的地质参照。

5.1 晚中新世准平原面大范围垂直块断差异升降运动

晚中新世全球准平原面明确指示地球表面于晚中新世至上新世初已基本被夷平, 地形起伏并不大, 而今准平原面的残片散布于不同海拔高度, 或构成高原面与山顶齐平面, 或构成盆地底, 特别引人注目的是许多不同时代的地质层, 尤其是一些海相地层, 今天虽已处于不同高程但仍保持水平产状。例如占据欧亚广大地区的俄罗斯地台低地、西西伯利亚低地, 以及西伯利亚地台隆起三个构造单元, 尽管地形起伏高差大, 但古生代、中生代、直到古近纪和新近纪地层均保持水平。又如青藏高原世界最高峰喜马拉雅珠穆朗玛古生界、冈底斯山主峰冈仁波齐峰古近系、帕米尔的水平古生界, 贵州高原海相三叠系、太行山的古生界、北美科罗拉多高原古生界以及台湾岛中央山脉主峰的古生代海相地层等。这些地质记录唯一的解释是晚中新世全球准平原面于上新世—第四纪时期发生了分裂解体变形, 伴以大幅度垂直块断快速下降, 晚中新世已经干涸的地中海又再度下降为海水所淹没等等。今天地球表面的构造地貌基本成型于这一地壳构造运动变动阶段。诸如青藏高原整体抬升, 环太平洋的陆地加速隆升伴以块断与火山活动, 美洲西部落基山脉与南美西部安第斯山脉如前所述从无到有, 从低海拔隆升到今天的高度, 另一方面全球海盆几乎同时期与大陆相连, 如日本列岛周边于海深 1000m 和 2000m 还保存有晚上新世或早更新世阶地, 1000m 深海阶地为来自山脉或高原年轻的上新世砾岩层, 大陆坡地形的形成记录了这种海陆垂直差异升降运动^[2, 3, 26~29, 31~33, 92~101]。总之, 今日地球表面的构造地貌景观记录了全球在经历过一段地壳构造运动相对宁静期之后, 于上新世—第四纪又进入了一个全球规模的垂直块断差异升降运动新阶段, 至今仍在进行中。

5.2 晚中新世准平原面大范围拱曲变形与派生大规模引张

块断构造变形伴随地壳垂直差异升降运动, 晚中新世夷平面波状拱曲隆起变形也是年轻构造运动的一种基本类型^[4, 60], 无论是古老的苏格兰高原还是年轻的天山与蒙古高原^[4, 26, 102]均不例外。准平原面拱曲隆起有利于构成地区或区域分水岭, 因而地区或区域分水岭多较好的与上新世—第四纪时期晚中新世夷平面拱曲隆起变形一致。例如东非的拱曲隆起分水岭、澳洲的主分水岭也都是中更新世以来平原地区拱曲隆升的结果^[4]。然而, 地球表面规模最大、最醒目的区域分水岭, 莫过于前述的东北—西南向斜穿亚洲大陆分开北冰洋与太平洋水系的东亚巨型分水岭, 这一巨型分水岭实质就是一个巨型的拱曲块断隆升的地形高隆起带, 东北段俄国远东山地—蒙古高原, 以及藏南雅鲁藏布江与印度河、印度北部恒河与印度河间的水分水岭拱曲隆起都比较清晰^[3]。同样, 图 3 所示日本本州岛和大西洋中脊都有类似的拱曲块断隆起, 说明岛弧和大洋中脊也是拱曲隆起变形的结果^[98, 103]。明确表明大陆与大洋完全可

对比，具一脉相承的共性，也为认识和研究全球构造提供了重要的启示。

地球表面拱曲隆起的顶部诱发地球表面最主要的引张机制，广泛发育引张块断构造，成为地球表面最重要的、规模最大的张裂构造区，地球表面的大型张性构造区无不与这一机制有关。例如西班牙科迪勒拉中央高原的裂谷式块断张裂区（图 7A）和澳大利亚、南非和印度半岛等为代表的高原中央引张下陷区（图 7B）。我国青藏高原广泛的近南北向断陷湖盆地构造与张破裂、内陆最深的贝加尔裂谷盆地系、北美西部的盆—岭构造、著名的东非裂谷盆地系等，都是地球表面拱曲变形伴生的大规模张裂构造。同样值得关注的是日本列岛顶部与大西洋中脊隆起中央的张裂也是大规模的张裂区（图 3），表明岛弧与大洋中脊的张性变形与大陆构造地貌完全可以类比，一致描绘出晚新生代地壳拱曲隆升派生大量平行拱曲轴向的引张块断和次级张性断陷盆地。

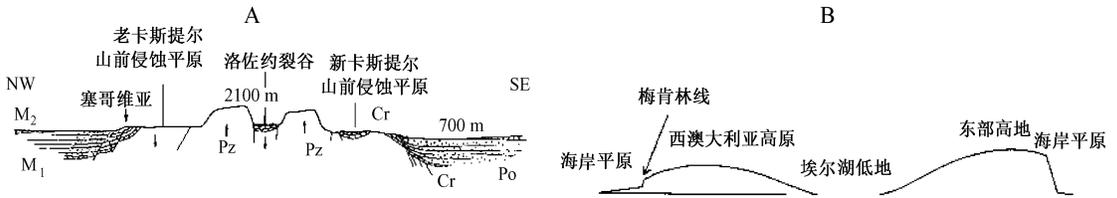


图 7 B-M-P-M-B 地垒式构造地貌组合中央引张块断剖面

Fig 7 The main extensional block faulting areas of the B-M-P-M-B horst-like morphostructure assemblage

A—西班牙中部科迪勒拉中央高原块断⁶；B—澳大利亚为代表的中央高原相对下凹¹¹²。

Pz 古生界；Cr 白垩系；Pa 大陆古新统；M₁ 科迪勒拉边缘中新世粗碎屑岩；M₂ 晚中新世灰岩。

5.3 晚新生代垂直拱曲隆起侧翼挠曲部位诱发的块断差异升降运动

拱曲构造地貌变形基本组合的升、降转换拱曲侧翼挠曲部位，普遍发生不同程度的块断差异升降运动，拱曲侧翼挠曲部位发生断裂以平衡拱曲隆升块体与两侧相对下降块体间的垂向引张作用，受原有断层性质影响，侧翼断裂形式或正或逆。近些年来证实在许多山带，如喜马拉雅、阿尔卑斯—喀尔巴阡、内华达等山带的山前盆地，普遍属张性断陷^[37, 82~86, 90, 104~106]，甚至岛弧也不例外^[107]。不过这类正断层可能是下盘上升的结果，例如从海拔 5000m 上下的青藏高原至 2000m 左右的云贵高原的阶梯式地形下降，即可视为拱曲侧翼挠曲块断下盘层层上升的一个实例（图 8A）^[3, 95]。同样，低喜马拉雅北与高喜马拉雅间的主中央断层（MCT）和南与外喜马拉雅间的主边界断层（MBT）均已不活动，代之以与高原上升相适应的北边界断层（NME）与南边界断层（SMF）的正断活动^[78, 79]。

拱曲侧翼挠曲块断也可表现为逆断层，甚至逆冲断层，主要取决于再活动断层的产状。该前陆或山前逆或逆冲断层虽常被解释为水平挤压的结果。然而，晚新生代以来，在前陆或山带前地层挠曲部位发生的断裂与块断差异升降运动拱曲隆升有关，派生的次级地层挠曲并伴以逆断甚至逆冲断作用的推力指向山外。例如天山，以及美洲西部落基山构造提供了一个逆冲断作用的实例（图 9B），从剖面中可形象地看到发生在山—盆过渡带的逆冲甚至倒转作用，同样是地层挠曲诱发的局部现象，以及同一古生代地层在盆地和在拱曲抬升的山体顶部，基本保持水平产状^[16, 108]，因此很难把这类逆或逆冲断层与水平挤压作用联系起来。这类冲断作用也发生在图 3 的岛弧与大洋中脊。

总之这类变形不仅可见于手标本，1999 年发生在台湾中央山脉西山麓的 7.6 级吉吉大地震^[109]，实测的地震地表断裂与变形展示了一个地震引发表层挠曲滑动褶皱及逆断层作用

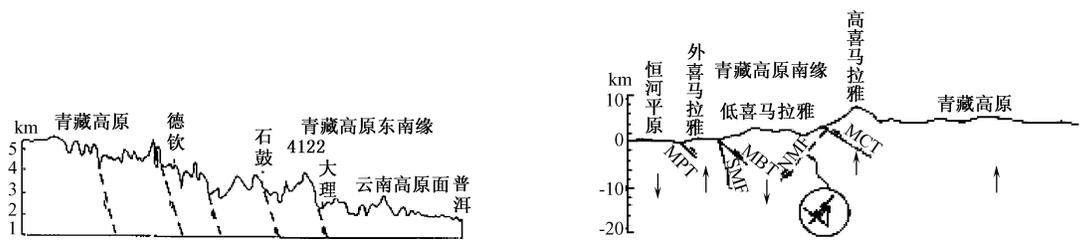


图 8 块断隆起侧翼正断型实例

Fig 8 Example on normal faults occurring in the transitional belt between blocks with differentially uplifting and subsiding movement

A—青藏高原至云南高原过渡带 阶梯式正断层与层层下降地形剖面^[3];

B—喜马拉雅山前活动的正断层 NMF 和 SMF 取代已停止活动的老冲断层 MBT 与 MCT^[78 79]。

(flexural-slip folding and reverse faulting) 的真切实例 (图 10), 提供了一个表层弯曲隆起顶部引张、侧翼挠曲形成逆冲断层的一比一“模拟实验”。2008 年四川汶川 8.0 级大地震的形变就显示川西高原上升、四川盆地下降的差异升降运动伴以逆断现象。显然这类逆断层作用引起的水平位移系上升地块侧向减荷引起的外移, 不同于所谓水平挤压的短缩现象。

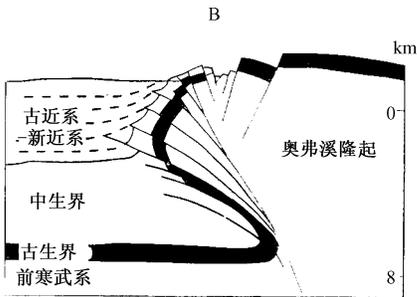


图 9 拱曲隆升伴以逆断块断抬升。美国怀俄明州落基山脉构造

Fig 9 Plateau uplift with reverse faulting on flank of the arching uplift

Owl Creek 山隆升, 伴以山前风河盆地边缘古近系—新近系逆断变形^[19]。

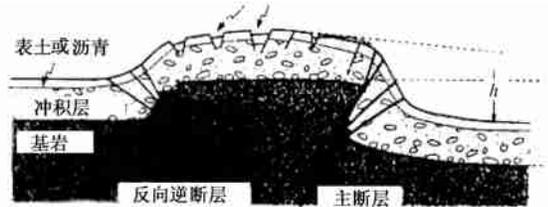


图 10 台湾中央山脉西山麓 1999 年吉吉 7.6 级大地震伴生层间弯曲滑动褶皱的地表断裂与变形, 顶部引张, 侧翼逆断^[109]

Fig 10 The large earthquake ($M=7.6$) of Taiwan in 1999, showing a modal of extension on the top of uplift and reverse faulting at both flanks^[109]

如图 3A 海沟带的地质问题本质上也是与图 9 和图 10 的拱曲隆起侧翼逆断类型类似。流行观点主张海沟带属板块聚合挤压边界, 致使海沟带成为验证大范围区域水平挤压作用的一个关键场所。受海域影响对海沟带地质的认识还有很大的局限性, 不过从海沟沉积与变形、海沟内侧加积作用与变形、海沟海底地貌、海沟深地震与消减作用以及地球物理资料等方面入手, 还是可鉴别海沟带的区域水平挤压的真实性。首先, 海沟形成时代是很年青的, 为上新世—早更新世全球地壳隆升, 特别是与环太平洋隆升相辅相成伴生的负地形^[13, 53, 92~94]。海沟沉积可分为上、下两套, 下部为晚中新世—早更新世半深海沉积, 自海沟陆坡底部直延伸到洋盆, 如在西南日本、阿留申、中美和秘鲁—智利等海沟所证实的。海沟按该套沉积层变形与否, 可分为两类, 一类为陆侧坡底部的下沉积层具叠瓦冲断变形, 如日本、千岛—堪察加和阿留申等海沟, 另一类则没有, 变形, 如伊豆—小笠原海沟、北马里亚纳海沟和中美海

沟等, 指明那里处于引张应力场。海沟的上部沉积为中更新世以来的年轻陆缘沉积, 位于阿拉斯加海沟的 DSDP180 孔钻入海底 470 米, 在海沟充填一半处打到海泥而不是泥岩, 其时代最老为 0.6 Ma 中更新世, 这套年轻的海沟沉积均属未受扰动的水平地层^[10]。至于前一类下部沉积虽发生冲断变形, 但并非‘大洋壳’上冲, 而是大陆块向洋上冲的结果^{①②[53, 111~113]}。其次流行观点设想强烈挤压加积作用的海沟内侧, 并未获得正面的调查结果。以板块构造说代表人物上田城也直接参与的马里亚纳岛弧—海沟系的调查结果表明, 至少在马里亚纳海沟内侧并未找到太平洋板块加积与强烈挤压作用, 相反那里呈引张作用和高角张性断层, 于海沟两侧显示垂直升降运动^[107]。

再则, 也可从海底地貌^[114]窥见一斑。作为记录海洋侵蚀作用, 以及被解释为海底水平移动标志的海底平顶山, 在海沟底部仍保持平顶的水平位置^[53]。

最后也是最有争议的消减作用问题。巴基斯坦—伊朗的马克兰大陆边缘一向被认为是阿拉伯板块与欧亚板块于聚合边界, 阿曼湾深海平原向北消减到大陆之下, 但地球物理探测并无明确的消减带的迹象, 于近大陆侧前陆盆地边缘年轻沉积虽有局部褶皱, 但往南至大洋侧则渐恢复水平产状^[115]。近年来, Choi 等一批研究者, 重新系统研究海沟地区的地球物理和深地震资料, 并做出了许多与流行说法相悖的新解释, 据地震资料的再解释否定了海沟带存在消减作用, 那里的深地震活动与大陆—大洋过渡带的垂直差异升降运动有关。重新系统解读海沟地区的地球物理和深地震资料获得了新的认识, 否定了流行的板块聚合与水平挤压的设想^{①②[53, 111~116]}。以上地质与地球物理资料相互印证意味着海沟带至少缺乏晚新生代大规模区域水平挤压作用的地质记录。

5.4 晚新生代垂直拱曲块断差异升降运动诱发上新统一早更新统局部挤压构造变形

上新世—早更新世盆地沉积的变形程度、形式、力学条件以及规模等, 为识别和解读晚新生代地壳构造运动性质, 提供了又一个地质记录的直接判据。广泛对比全球晚新生代地质资料清楚表明, 晚新生代上新世—早更新世盆地沉积与中更新世以来的河流相沉积两套地层, 后者基本无挤压变形, 除有限的断裂, 特别是正断作用外, 总的构造变动较微弱。上新世—早更新世盆地沉积构造变动程度不一, 因地制宜, 从变动较微弱, 局部受块断差异升降运动牵引与重力作用可诱发次级挤压变形, 到甚至逆冲、倒转等强烈挤压变形。尽管如此, 并无区域性水平挤压变形的地质证据, 表明晚新生代不存在全球统一的区域性挤压作用, 这可从以下方面上新统一早更新统挤压构造变形的地质记录得到证实。

首先, 上新世—早更新世盆地沉积大多未遭受到显著构造变形, 一般保持水平产状, 但也确有上新世—早更新世盆地沉积遭受过挤压变形, 与上覆中更新统呈不整合接触, 表明上新世—早更新世盆地沉积确有不同程度变形, 甚至是显著的强烈挤压变形。纵观比较这类挤压构造变形, 可以清楚看到上新世—早更新世盆地沉积挤压构造变形相对集中或局限于某些特定部位, 通常相对集中或局限于 P-M-B 组合转折过渡、块断差异升降运动部位。最普遍的是发生在下降块体的山前盆地边缘的上新世—早更新世年轻沉积中, 例如最具代表性的阿尔卑斯—扎格罗斯—喜马拉雅山带山前盆缘的上新世—早更新世盆地沉积挤压变形都具代表性, 一致指示块断差异升降运动牵引与重力作用导致层间滑动而诱发的次级挤压变形, 地质

① Rezanov IA. Disproof of subduction. *New Concepts in Global Tectonics*. No. 30. s 2003.

② Murdock JN. Unrecognized failure of a critical test of strict plate tectonics: the trench region offshore of Guatemala, and a comparison with the Aleutians. Part IV. *New Concept In Global Tectonics*, 1999, 12: 2~9.

记录明确表明动力或推覆方向主要由山体指向山外。值得注意的是这类挤压变形主要局限于差异下降块体一侧。反之上升块体内则无显著的同期挤压变形。以青藏高原为例, 于高原上的上新世—早更新世盆地沉积一般无挤压变形现象, 如西藏扎达盆地中的上新世—早更新世扎达群。中、法合作对西藏一侧考察的报告结论特别指出, “在印度—欧亚大陆碰撞带的西藏一侧, 未发现第四纪的褶曲与逆断层, ……最有意义的观察结果是雅鲁藏布江蛇绿岩以北最新的沉积层中未见巨大的收缩作用。……在拉萨附近及更往北的第三纪层系中, 变形更为有限, ……”, 结论是“显然不可轻易地用地壳减薄作用和‘折叠式’收缩作用这样的机制来解释西藏的高海拔, 至少第三纪以来是不成立的”^[117~118]。至于上升块体内部岩体的挤压变形现象虽属普遍, 但该挤压变形的时间要老得多, 与年轻的挤压变形不是一码事。其一是老的挤压变形主要发生在晚新生代前, 二是普遍伴有不同程度的动力和/或热变质作用以及韧性变形, 表明发生变动的环境与高温高压有关, 当时处在地壳的深层, 中地壳甚至更深, 只不过被晚新生代年轻的垂直拱曲块断差异升降运动抬升出露到地表。例如北美西部科罗拉多高原大峡谷地区, 不整合于强烈挤压变形老岩系上的水平古生界已被抬升成高原, 该挤压变形显然与晚新生代以来的垂直拱曲差异升降运动并无因果关系, 它们的出露却鉴证了年轻的垂直运动。

其次, 挤压变形的强度同样有局限性, 挤压变形明显的紧邻P-M-B组合转折过渡的块断差异升降运动部位, 受挤压变形的强度随远离该部位的距离增大而显著减弱, 以台湾中央山脉西麓为例(图11)^[119], 中央山脉西麓的上新统—下更新统发生向山外的强烈倒转褶皱和冲断, 甚至出现强烈挤压的叠瓦变形, 这种变形的强度往台湾海峡方向逐渐减弱, 台湾海峡的物探、钻探揭示该套地层已恢复近水平产状, 同时不整合于其上的中更新统仍保持水平产状。

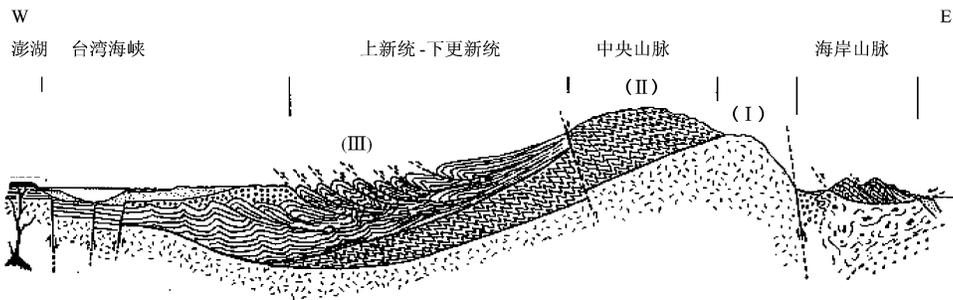


图11 台湾地质剖面^[119]

Fig. 11 Geological profile of Taiwan showing thin-skinned tectonism on western slope of the Centre Mountain^[119]

I—基底; II—古近纪地层 III—上新统—早更新统表层滑动冲断、倒转褶皱、强烈挤压变形的薄皮叠瓦构造, 往台湾海峡变形减弱至恢复水平产状, 与上覆中更新统不整合, 伴以高角度正断层

再则, 显著强烈挤压变形的强度随深度增大而减弱, 如图11所示。换言之, 主要挤压变形仅仅局限于表层的年轻沉积中, 属表层滑动薄皮构造, 基岩一般未被卷入, 类似的薄皮构造挤压变形也见于阿尔卑斯^[120]等地区。

综上, 导致山前盆缘未成岩或成岩较差的年轻沉积物显著挤压变形大体可识别两种机制, 一是因山体垂直块断差异升降运动, 下降盘的沉积盖层受到上升盘隆起块体上升的牵引, 诱发表层次级滑动。二是上升地块隆起边坡加大, 势能增大, 导致年轻盖层重力失稳,

诱发次级层间滑动, 更可能的是较复杂的综合叠加效应。因而上新统一早更新统挤压变形的地质记录取决于局部动力条件, 很难用大范围区域性水平挤压作用得到合理的解释。

5.5 上新世—第四纪玄武岩浆活动

别洛乌索夫把中、新生代广泛的玄武岩浆溢流活动称之为地球演化的玄武岩阶段或玄武岩期; 星野通平强调玄武岩浆活动就是驱动地壳隆升的动力源, 主张地球的玄武岩层是很年轻的, 晚新生代全球所有高原和山脉的上升, 都是由于来自软流层的熔融玄武岩浆上升底侵作用, 形成下垫玄武岩层所驱动的结果^[53]。刘嘉麒研究对比中国和世界其他地区晚新生代岩浆活动, 表明上新世—第四纪环太平洋玄武岩浆活动确也进入了一个新的高活动期^[121], 事实上它与全球晚新生代垂直差异升降, 特别是与高原隆升运动同步, 诸如青藏高原、科罗拉多高原、土耳其—伊朗高原等均普遍伴有来自幔源的碱性玄武岩浆活动。这种与垂直差异升降运动相伴的幔源碱性玄武岩浆活动, 表明晚新生代地壳构造运动与下地壳和上地幔的深部过程当有密切的因果联系。

以上事实支持地球表面构造地貌形成于晚新生代上新世—第四纪, 造就构造地貌的造貌运动属垂直差异升降运动伴以拱曲变形、张性块断作用与深部热活动。

6 现代地壳构造运动的基本特征

相当全新世时期的现代地壳构造运动继往开来, 是晚新生代最新和正在进行的构造运动阶段, 是链接对地壳构造运动理论与应用于环境、自然灾害、某些资源利用等的关键环节, 也是我们研究晚新生代地壳构造运动的重要落脚点之一。受现代地壳构造运动研究有赖于微观手段的局限, 目前还很薄弱, 认识也很不成熟, 然而现代地壳构造运动的现实意义则是不可忽视的。

6.1 现代地壳构造运动的基本表现形式

地球不同于它的卫星月球, 最根本的区别就在于月球的构造运动已经停止几十亿年, 月球上已经没有磁场, 以及测不到月震, 月球因而被视为构造运动‘死亡’的星球。地球则不同, 是仍在演化的星球, 不仅有磁场、有构造运动, 地球上每年数以百万计大大小小的地震就像地球的脉搏标志着地球的生命力。因而现代地震活动本质上就是现代地壳构造运动最基本、也是最重要的一种表现形式。除地震形式活动外, 也还有大量非地震形式的构造活动表现, 彼此相辅相成相互响应, 生动地展现了现代地壳构造运动的面貌。不过由于测震学与测震技术较为成熟, 能较确切的提供地震的定位、规模、空间分布等相关参数。然而, 非地震形式的构造活动则因分散、有限或缺乏定量仪器观测, 往往难于判定真伪, 致使对非地震形式构造活动的认识局限、不确定性, 甚至在很大程度上被忽视了。有幸的是已经累积了大量构造运动引起非震活动间接的资料和信息, 包括微破裂活动, 以及对流体运动、对地球物理场和地球化学场的影响等^[3, 122], 为认识现代地壳构造运提供了一把间接探究和观测现代地壳构造运动的‘钥匙’。

6.2 地震活动与构造地貌拟合勾画出东亚现代地壳构造运动基本格局

把看来是分散的地震与非地震两种形式的构造活动串连起来, 为认识现代地壳构造运动提供了重要的信息。例如 1966~1976 的十年间, 我国东部相继发生十次 ≥ 7.0 级大地震, 结

合地震与非震活动勾画出一条东北—西南向现代地壳构造运动带的轮廓^①^[123~129], 空间上处于青藏高原—蒙古高原的东南侧的块断过渡带, 西南自青藏高原与云南高原过渡带, 经华北平原—松辽平原, 直到黑龙江下游, 与东亚北东向块断构造地貌总的形势是一致的^[3]。中国的地震分布空间上也与北东构造地貌格局大体拟合。喜马拉雅构造带的地震活动同样受横切喜马拉雅的北东向构造制约, 近百年来喜马拉雅构造带的四次 ≥ 8.0 级地震前后的地震活动, 均作北东向分布^[3, 37~39, 125]。

6.3 继承性垂直差异升降运动趋势不变

现代地壳构造运动仍显示显著的继承性垂直运动, 以东亚水系为例, 标志东亚巨型分水岭隆升内、外水系分化仍在继续, 例如西昆仑山南麓的近期湖泊与水系变化^[123], 今天处于外流喀拉喀什河上游的郭扎错、阿克赛钦湖和苦水湖三个独立内陆湖泊, 都是近50000年来地壳上升逐步与下游外流河分离的结果。在印度西北部的印度河与恒河分水岭附近的现代水系变迁也相当活跃^[5]。

于大陆边缘的大地震揭示了那里的升降运动, 例如1960年东南太平洋8.9级智利大地震和四年后的1964年东北太平洋8 $\frac{1}{2}$ 级阿拉斯加大地震, 两次大震都观测到大陆大幅度抬升的垂直运动。智利大地震时大陆850km海岸带竟上升了5.7米, 邻近海域在800km长、75~110km宽的范围内下降了2.7米^[127]。同样阿拉斯加大地震时, 断层垂直位错5.2m, 大陆侧至少60000km²大范围抬升, 最大达10m, 近岸甚至达15m, 相邻的下降区达110000km², 平均降幅1m^[128]。海沟大地震突然能量释放, 明确的延续了晚新生代陆升、海降的基调。山区大地震同样显示山体上升、盆地下降, 2008年的四川汶川8.0级大地震即为一例。某些地震形变, 例如1966年河北邢台7.2级地震观测到与美国1954年的美景峰7.4级地震完全可对比的、垂直与水平的位错弹性回跳。1976年唐山7.8级大地震具相似的张性构造地表变形^[129]。

6.4 现代地壳构造运动的动平衡调整

地震活动既是现代构造运动的表现形式之一, 就不可能是孤立的事件, 实际观测表明, 地震与非震活动间具有复杂的相关关系, 无论能否合理解释, 地震活动沿块体边缘过渡带迁移与动平衡调整则是客观的现象。例如1966~1976年高地震活动期, 一系列中、小和弱震活动, 描绘出一条斜贯我国的现代活动构造带, 地震与非震、大震与小震, 以及小震群活动此起彼伏, 时、空相关, 相互响应, 显示其间具动平衡调整, 意味着它们存在必然的因果联系, 这可从以下实例获得一定程度的验证。于1879年甘肃南部武都8.0级大震后的10年间, 均曾先后发生过中强到强震活动, 两期先后相继发生的地震, 活动空间远距离相关, 后来的地震强度升级, 明确表明这些地震事件决非孤立事件。又如对比大陆地震与岛弧地震活动, 青藏高原东缘与菲律宾岛链的地震活动明显相关, 两地强震近乎一一对应, 一般岛链地震稍晚于大陆, 彼此响应, 动平衡调整关系明确^[3]。台湾虽是我国的一个多震区, 但近代地震记录的7 $\frac{1}{2}$ ~8.0级最大地震事件不过7次左右, 这些大震事件几乎都与大陆的几次大震活动事件大体同步。如台湾最大的1920年8.0级和1922年7.6级大震与1920年的宁夏海原8 $\frac{1}{2}$ 级大地震; 1966年台湾的7.8级大震与同年邢台7.2级地震同时; 1999年的台湾南投7.6级大震较西藏玛尼7.9级地震约晚一年多。以上事例具一定的重复再现和规律性, 提供了有关

① 高名修, 东亚大陆第四纪北东向块断构造运动与人类环境. 载: 中国地质学会第四纪冰川及第四纪地质专业委员会等, 中国第四纪地质与地球表层系统科学讨论会论文摘要汇编, 郑州, 1994, 4, 14~19.

动平衡调整有意义的信息。

6.5 现代地壳构造运动的动静交替, 强弱相间

地震作为一种地壳构造运动形式, 在统一构造作用下的活动具有大范围同步的特点, 地震就不可能是孤立的事件。20世纪60~70年代, 我国相继发生 $M \geq 7.0$ 地震十次, 地震分布呈东北—西南带状斜穿我国东部, 据1966邢台7.2级与1976年唐山7.8级两次代表性大地震的实测形变与震源机制, 结合大量非地震形式活动, 表明是一次张性构造活动事件^[3,129]。值得关注的是这一事件并不局限在我国, 而是一次全球范围引张构造活动事件的一个组成部分。同时期在全球具代表性的引张活动构造区几乎都发生了不同程度的张性构造活动事件, 从著名的贝加尔裂谷始, 环球一周都可见到其踪影。贝加尔裂谷西南于1967年发生并不多见的 $M=7.8$ 级大震; 西至东非裂谷与红海裂谷交汇处的阿法地区, 也是全球最具代表性的活动引张构造区, 1978年于阿法西南部发生一次极典型的, 以地面张裂群、弱震群与玄武岩浆活动所表征的引张裂谷活动事件; 往西的爱琴弧引张构造区, 于1978年发生了两次当地15年来最显著的中强震 ($M=5.5, 6.1$), 伴以张性裂隙群活动; 再往西, 1977年罗马利亚发生罕见的7.2级弗朗恰地震; 更西进入大西洋, 位出大样中脊的冰岛于1975~1979年间发生了约100~150年一次的张裂群、小震群、地面膨胀与下降, 以及岩浆活动等经典引张裂谷活动事件; 往西登陆美洲, 1976年于中美危地马拉发生7.5级大震; 加利福尼亚州发生距上次大地震已22年的1979年帝国谷6.6级地震; 美国西部圣海伦火山继中美秘鲁1914~1917年中等火山喷发后, 于1980年发生强烈喷发的圣海恩斯火山活动事件; 再西进入太平洋, 1975年夏威夷岛的卡拉帕纳火山南侧发生了一次裂谷活动事件, 伴以7.1级地震; 西至太平洋西缘的岛弧, 处于西北太平洋边缘的堪察加半岛于1975~1979也发生了一次显著的引张裂谷活动事件; 特别直得关注的是我国东邻日本, 1964年先在日本海东岸发生7.5级新泻大地震, 继而1965~1966年爆发了持续不下十年的著名的松代震群活动, 我国1966~1976年的高地震活动就是在这一背景下拉开大幕的。同时也不要忘记, 上述台湾近代大震与大陆大震大体同时发生的事实。以上资料可窥见全球现代地壳构造运动大体同步之一斑, 至少也可说明地震并非孤立事件, 地震与非震活动相辅相成一致指示, 现代地壳构造运动在大范围内具动静交替、强弱相间的活动特点。我们可以利用这些规律为预测、预报地震服务^{①②}。在总结1966~1976年中国东部高地震活动时, 又注意到龙门山带与该带活动相辅相成^[3]。近十余年来, 全球地震活动又进入新一轮高活动期, 据不完全统计, 自1997年西藏玛尼7.9级大震以来的十来年间, 全球已发生8.0级左右大震近20次, 我国汶川8.0级大地震正是在这一背景下发生的。笔者据东亚及全球大地震活动动态, 以及沿我国1966~1976年高地震构造活动带, 大范围发生以煤矿瓦斯溢出和地下水突水非震张性构造事件成带活动, 于2005年初直接上书, 强调我国地震活动预兆增强, 提出加强监测与研究的建议, 今年汶川地震的发生得到初步验证。以地震和非震活动所表征的现代地壳构造活动明显具同时性, 并有时强、时弱, 动、静交替的规律, 应用获得的地壳构造活动动态信息, 追踪活动规律与地震趋势为捕捉未来地震危险提供了可能性。

① 高名修. 地震构造活动态势追踪——一条可能实现地震预报的途径. 国际地震动态, 1983, 9: 1~3.

② 高名修. 关于川西北及甘南临近地区地壳稳定性问题的初步认识. 水文地质工程地质论文集(第二辑), 1962, 98

6.6 现代地壳构造运动与环境、地质灾害息息相关

自然环境与地质灾害本质上就是现代地壳构造运动造就的结果或产物, 自然环境的继续演化, 以及自然和地质灾害的频发, 现代地壳构造运动都施加了积极的影响。反之, 动态的自然环境演变与广泛的地质灾害, 在一定程度上又反映了现代地壳构造运动的某些特征与规律, 为认识和研究似乎‘看不见’的现代地壳构造运动提供了可识别的判据。以我国为例, 构造地貌及其演化对我国的地理、植被、地表径流与地下水、土壤、气候、地方病, 乃至人口等的分布均有直接或间接影响。此外, 我国地震和形形色色的地质灾害具明显的成带性, 甚至看来是性质各异的不同地质灾害带彼此重叠或叠加, 从而明显的勾画出现代地壳活动构造的轮廓。综上, 我国西南到东北斜穿我国东部的一条包括地震与非震两种不同形式活动的多重环境与地质灾害带^[3, 133~135], 为认识与研究现代地壳构造运动提供了重要的信息。

看来, 换一个思路认识现代地壳构造运动, 并从现代地壳构造运动动态的视角, 探索有关环境和地震在内的地质灾害命题, 或许别有洞天。

7 结语

本文对晚新生代地壳构造运动的研究获得了点滴新认识:

(1) 本文研究地球最年轻的晚新生代地壳构造运动, 定义以全球普遍发育, 并可广泛对比的约7Ma~5Ma晚中新世或稍晚的准平原面为标志, 发生在该准平原面形成之后, 导致该准平原面变形和分裂解体, 并造就地球表面现代构造地貌, 至今仍在持续的地壳构造运动称之为晚新生代地壳构造运动, 其全新世以来的最新阶段即现代地壳构造运动及比较。

(2) 地球表面构造地貌的基调呈高原—山带—盆地(平原)(P-M-B)形影相依、排列有序的定式, 被分裂解体的准平原面保留在高原和山带顶部, 以及构成包括大洋盆地在内的底, 现代构造地貌的基本组合和规律的格局展示了它们彼此间内在的成生联系, 也是晚新生代地壳构造运动最清、新的地质记录, 为研究地壳构造运动和地球动力学开启了一扇窗口。

(3) 依附晚新生代地壳构造运动发育的现代水文网和相关沉积, 如同地壳构造运动的“应变计”, 记录了晚新生代地壳构造运动主要历经过早、晚两期重要演化阶段。早期上新世—早更新世可视为成盆期。晚期约0.78Ma±的中更新世以来, 为现代构造地貌形成时期, 可视为成貌期。

(4) 保留在不同高度可对比的准平原片断和变形, 为复原准平原、鉴别地壳构造运动的属性提供了重要的判据。明确地记录了晚新生代地壳构造运动以垂直拱曲块断差异升降运动为主, 伴以与深部地幔活动有关的碱性岩浆岩活动。垂直拱曲块断差异升降运动诱发的次级挤压变形, 无论在变形的空间分布、变形的规模, 以及变形波及的深度上, 都有很大的局限性, 应属派生的次级构造变形, 与区域性大规模水平挤压作用伴以不同程度的高温、高压变质作用迥然不同。

(5) 全新世时期的现代地壳构造运动是晚新生代地壳构造运动的最新阶段, 现代地壳构造运动表现为地震与非地震两种不同的表现形式。晚新生代地壳构造运动, 特别现代地壳构造运动打造了今天人类赖以生存的环境, 也制造了包括地震、火山、及与动力地质有关的各种地质灾害, 对某些能源和流体矿藏资源, 以及人类工程建设等都施加了不同程度的直接或间接的影响。所有这些在威胁人类的生存的同时, 又提供了研究现代地壳构造运动的机会和重要的切入点。

(6) 本文概括地研讨了晚新生代地壳构造运动, 从中不难窥视到晚新生代地壳构造运动的丰富内涵。清新的地质纪录为认识和研究地壳构造运动和地球动力学提供了一个切入点。年轻的晚新生代地壳构造运动与其他许多地球科学分支学科, 乃至与人类生存、生活相关的许多学科有着千丝万缕的联系。晚新生代地壳构造运动涉及的领域极为广阔。所有这些都要求人们深入地系统地研究晚新生代地壳构造运动。然而有关晚新生代地壳构造运动的零散资料虽然不少, 但研究和认识还很薄弱, 系统研究不够。期望通过本文能引起对晚新生代地壳构造运动的兴趣和关注。

最后, 本文的完成得到邓乃恭教授诚挚的督促, 以及对修改文稿的宝贵意见, 借此, 表示衷心的感谢。不当之处, 望识者不吝指正。

参 考 文 献

- [1] Suvorov AI. Recent global kinematics of the lithosphere (on the basis of regional tectonic pairs) [J] . Geotectonics English Translation, 1978, 12: 79 ~ 89.
- [2] Gao Ming-xiu. Late Cenozoic vertical movement either a specific case or a universal law [C] . New Concepts in Global Tectonics. Colorado: Otero Junior College La Junta, 2002.
- [3] 高名修. 东亚北东向块断构造与现代地裂运动 [M] . 北京: 地震出版社, 1995.
- [4] King LC. The Morphology of the Earth; A Study and Synthesis of World Scenery [M] . London: Oliver And Boyd, 1962.
- [5] Wadia DN. Geology of India [M] . London: Macmillan & Co. LTD. Third Edition (Revised), 1975.
- [6] Embleton C. Geomorphology of Europe [M] . London: Macmillan Publishers, 1984.
- [7] Bridges EM. World Geomorphology [M] . Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [8] 杨逸畴, 李炳元, 尹泽生, 等. 西藏地貌 [M] . 北京: 科学出版社, 1983.
- [9] Seeber L, Gomitz V. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics [J] . Tectonophysics, 1983, 92 (4): 335 ~ 367.
- [10] 任美镛, 包浩生. 中国自然地理、地貌 [M] . 北京: 科学出版社, 1980.
- [11] 张荣祖, 郑度, 杨勤业. 西藏自然地理 [M] . 北京: 科学出版社, 1982.
- [12] Oller C, Pain C. The origin of mountains [M] . Routledge, Taylor & Francis Group, London and New York, 1998.
- [13] 藤田至则. 岛弧变动について. 地团研专报 第 24 号 别刷, 1982.
- [14] Antipov MP, Zharkov SM, Kozhenov V Ya, et al. Structure of the Mid-Atlantic Ridge and adjacent parts of the abyssal plain at Lat. 13°N [J] . International Geology Review, 1990, 32: 468 ~ 478.
- [15] Meyerhoff AA, Taner I, Moris AEL, et al. Surge Tectonics: a new hypothesis of Earth dynamics [A] . In: Chatterjee S, Hotton N III (Eds). New Concepts in Global Tectonics. Lubbock: Texas Tech University Press, 1992: 309 ~ 409.
- [16] Eardley AJ. Structural Geology of North America [M] . New York: Harper & Brothers Publishers, 1951.
- [17] De Sitter LU. Pliocene uplift of Tertiary mountain chains [J] . American Journal of Science, 1952, 250 (4): 297 ~ 307.
- [18] 李祥根. 中国新构造运动概论 [M] . 北京: 地震出版社, 2002.
- [19] 施雅风, 李吉均, 李炳元. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化 [M] . 广州: 广东科技出版社, 1998.
- [20] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古自治区及东北西部地区地貌 [M] . 北京: 科学出版社, 1980.
- [21] Shackleton RM, Chang Chengfa. Cenozoic uplift and deformation of the Tibet Plateau; the geomorphologic evidence [J] . Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1988, A 327: 365 ~ 378.
- [22] 黄培华. 论云南之地貌发育问题 [J] . 中国第四纪研究, 1960, 3: 39 ~ 55.
- [23] Sengor AMC, Kidd WSF. Post-collisional tectonics of the Turkish-Iranian Plateau and a comparison with Tibet [J] . Tectonophysics, 1979, 55 (3~4): 361 ~ 376.
- [24] Verma PK, Singh KK. Evidence motive forces and the time frame of neotectonism in the Aravalli mountain range, India [C] . In: Wadia Institute of Himalayan Geology. Seminar On Himalayan Geology & Geophysics (New Data And New Approaches). Dehra Dun, Wadia Institute of Himalayan Geology, 1993.

- [25] Nalivkin DV, Richey JE, Cloud Preston E Jr. The geology of the U S S R: A short outline [M] . London: Pergamon Press. 1960.
- [26] Ufimtsev GF. Morphotectonics of the Mongolia-Siberian mountain belt [J] . Journal of Geodynamics. 1990. 11 (4): 309 ~ 325.
- [27] McQuarrie N, Chase CG. Raising the Colorado plateau [J] . Geology, 2000. 28 (1): 91 ~ 94.
- [28] Morrison RB. Quaternary geology of the southern Basin and Range province [A] . In: Morrison RB. Quaternary Nonglacial Geology: Contemporaneous US. Colorado: Geological Society of America. 1991.
- [29] 李春芬. 南美洲地理环境的结构 [M] . 北京: 科学出版社, 1962.
- [30] González-Fernández O. Volcanic and tectonic evolution of the northern Antarctic peninsula-late Cenozoic to recent [J] . Tectonophysics. 1991, 114: 389 ~ 409.
- [31] Lamb S, Hoke L. Origin of the high plateau in the Central Andes, Bolivia, South America [J] . Tectonics, 1997, 16 (4): 623 ~ 649.
- [32] Ferran OG. International Symposium On Andean and Antarctic Volcanology Problems [M] . Santiago: Universidad de Chile. 1974.
- [33] Sevon WD, Potter N, Crowl GH. Appalachian peneplains: An historical review [J] . Earth Sciences History, 1983, 2: 156 ~ 164.
- [34] 日本第四纪学会. 日本第四纪研究 [M] . 北京: 海洋出版社, 1984.
- [35] Matenco L, Bertotti G, Dinu C, et al. Tertiary tectonic evolution of the external South Carpathians and the adjacent Moesian platform (Romania) [J] . Tectonics, 1997, 16 (6): 896 ~ 911.
- [36] Rouchy JM, Martin JPS. Late Miocene events in the Mediterranean as recorded by carbonate-evaporites [J] . Geology, 1992, 20 (7): 269 ~ 322.
- [37] Unruh JR. The uplift of the Sierra Nevada and implications for late Cenozoic epeirogeny in the western Cordillera [J] . Geological Society of America Bulletin, 1991, 103 (11): 1395 ~ 1404.
- [38] Yeats RS, Rockwell TK. Quaternary geology of the Ventura and Los Angeles Basins, California [A] . In: Morrison R B. Quaternary Nonglacial Geology: Contemporaneous US. Colorado: Geological Society of America. 1991.
- [39] Dupre WR, Morrison RB, Clifton HE, et al. Quaternary geology of the Pacific margin [A] . Morrison RB. Quaternary Nonglacial Geology: Contemporaneous US. Colorado: Geological Society of America. 1991.
- [40] McNeill LC, Goldfinger C, Kulm LD, et al. Tectonics of the Neogene Cascadian forearc basin: Investigations of a deformed late Miocene unconformity [J] . Geological Society of America Bulletin, 2000. 112 (8): 1209 ~ 1224.
- [41] 石和田靖章. 东中国海的区域不整合 [J] . 海洋地质译丛, 1982. 1: 35 ~ 39.
- [42] Krishna KS, Bull JM, Scuttton RA. Evidence for multiphase folding of the central Indian Ocean lithosphere [J] . Geology, 2001, 29 (8): 715 ~ 718.
- [43] Keller G, Barron JA. Paleodepth distribution of Neogene deep-sea hiatuses [J] . Paleoceanography, 1987, 2 (6): 697 ~ 713.
- [44] 郑绵平, 向军, 等. 青藏高原盐湖 [M] . 北京: 科学出版社, 1989.
- [45] 陈克造. 中国盐湖的基本特征 [J] . 第四纪研究, 1992, 3: 193 ~ 201.
- [46] 谢明. 长江三峡地区第四纪以来新构造上升速度和形式 [J] . 第四纪研究, 1990. 4: 308 ~ 315.
- [47] 唐贵智, 陶明. 长江三峡地区新构造运动及其对工程建设影响的研究 [J] . 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, 1991, 第十七号: 1 ~ 68.
- [48] 吴继远. 羚羊峡的形成与西江改道 [J] . 广西地质, 1993, 6 (总29): 45 ~ 51.
- [49] Clifton HE, Leithold EL. Quaternary coastal and shallow-marine facies Sequences. Northern California and the Pacific Northwest [A] . In: Morrison RB. Quaternary Nonglacial Geology: Contemporaneous US. Colorado: Geological Society of America. 1991.
- [50] Aseev AA, Blagovolin NS, Serbryanni LR. Exogenic landforms of Europe [A] . In: Geomorphology of Europe. London: Macmillan Publishers. 1984.
- [51] 新野 弘. 探索中国东海宝库—钓鱼岛等岛屿周围的海底地质调查 [J] . Ocean Age. 1970. 11.
- [52] Gladenkov Yu B. Neogene biotic events [A] . In: Tsuchi R, Ingle J C Jr. Pacific Neogene Environment, Evolution and Events [M] . Tokyo: University of Tokyo Press. 1992.
- [53] Michihel H. The expanding earth: evidence, causes and effects [M] . Tokyo: University of Tokyo Press. 1998.
- [54] 姚庆元. 福建沿海第四纪地层划分的若干问题与区域地层表 [J] . 福建地震, 1982. 3: 66 ~ 75.
- [55] 潘桂棠, 王培生, 徐耀荣, 等. 青藏高原新生代构造演化 [M] . 北京: 地质出版社, 1990.
- [56] 葛肖虹, 段吉业, 刘先文, 等. 中国西北的大地构造 [R] . 岩石圈构造与动力学开放研究实验室年报. 北京: 中

- 国科技出版社, 1992.
- [57] 崔之久, 五永秋, 刘耕年, 等. 青藏公路昆仑山垭口天然剖面记录 [C]. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1998.
- [58] 金小赤, 王军, 任留东, 等. 西昆仑地质构造的几个问题 [C]. 构造地质学—岩石圈动力学研究进展 (马杏垣纪念册). 1999.
- [59] Valdiya KS. Neotectonics of Himalayan Belt [A]. In: International Symposium on Neotectonics in South Asia [C]. Dehra Dun, India, 1986.
- [60] 黄汲清. 中国新构造运动的几个类型 [C]. 中国科学院. 第一次新构造运动座谈会发言记录. 北京: 科学出版社, 1957.
- [61] 刘东生, 黄万波, 王挺梅. 三门系地层的新构造运动 [C]. 中国科学院. 第一次新构造运动座谈会发言记录. 北京: 科学出版社, 1957.
- [62] 方鸿琪. 长江中下游的新构造运动 [J]. 地质学报, 1959, 39 (3).
- [63] Letouzey J, Kimura M. Okinawa trough genesis: structure and evolution of a backarc basin developed in a continent [J]. Marine and Petroleum Geology, 1985, 2 (2): 111~130.
- [64] 何春荪. 台湾地质概况 (台湾地质图说明书) [M]. 經濟部中央地质调查所, 1994.
- [65] 颜沧波. 台湾的地质和地史 [J]. 海洋科学, 1977, 9 (8).
- [66] Ruddiman WF, Kutzbach JE. Forcing of late Cenozoic northern hemisphere climate by plateau uplift in southeast Asia and the American Southwest [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94 (D15): 18409~18427.
- [67] Raymo ME. Late Cenozoic evolution of global climate [A]. In: Tsuchi R, Ingle J C Jr. Pacific Neogene Environment, Evolution and Events. Tokyo: University of Tokyo Press, 1992.
- [68] Raymo ME, Ruddiman WF. Tectonic forcing of the late Cenozoic climate [J]. Nature, 1992, 359: 117~122.
- [69] DeMenocal PB. Plio-Pleistocene African Climate [J]. Science, 1995, 270: 53~59.
- [70] 潘保田, 方小敏, 李吉均, 等. 晚新生代青藏高原隆升与环境变化 [A]. 施风, 李吉均, 李炳元. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化 [M]. 广州: 广东科学技术出版社, 1998.
- [71] Dupont LM, Donner B, Schneider R, et al. Mid-Pleistocene environment change in tropical Africa began as early as 1.05 Ma [J]. Geology, 2001, 29 (3): 195~198.
- [72] Montgomery DR, Balco G, Willett SD. Climate, tectonics, and morphology of the Andes [J]. Geology, 2001, 29 (7): 579~582.
- [73] 刘东生, 施雅风, 王汝建, 等. 以气候变化为标志的中国第四纪对比表 [J]. 第四纪研究, 2000, 20 (2): 108~128.
- [74] 的场保望. 从底栖和浮游有孔虫看日本海的古环境变迁 [J]. 海洋地质, 1982, 2: 65~71.
- [75] Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg? [J]. Nature, 1990, 346: 29~34.
- [76] Nakata T. Active faults of the Himalaya of India and Nepal [C]. In: Malinconico Jr LL, Lillie RJ. Tectonics of the western Himalaya. Geological Society of America Special Paper 232, 1989. 243~264.
- [77] GAO Ming-xiu. Geodynamic significance of NE-SW transected fault system in Himalaya [C]. In: Seminar On Himalayan Geology & Geophysics (New Data And New Approaches), Abstracts. Dehra Dun; Wadia Institute Of Himalayan Geology, 1993.
- [78] 高名修. 青藏高原南缘现今地球动力学研究 [J]. 地震地质, 1996, 18: 143~155.
- [79] Gao Ming-xiu. Seismotectonics of the Kumaun Himalaya [C]. In: Jain AK, Manickavasagam RM. Geodynamics of the NW Himalaya. Gondwana Research Group Memoirs, 1999.
- [80] Jain AK, Manickavasagam RM, Patel RC, et al. Extensional tectonics in the collisional NW-Himalayan belt [C]. In: Seminar On Himalayan Geology & Geophysics (New Data And New Approaches), Abstracts. Dehra Dun; Wadia Institute of Himalayan Geology, 1993.
- [81] Mugnier JL, Chalaron E, Hughe P, et al. The active normal faults close to the Main Boundary Fault in western Nepal: a peculiar feature of a fold and thrust compressional wedge [C]. In: Seminar On Himalayan Geology & Geophysics (New Data And New Approaches), Abstracts. Dehra Dun; Wadia Institute of Himalayan Geology, 1993.
- [82] Blisniuk PM, Sonder LJ, Lillie RJ. Foreland normal fault control on northwest Himalayan thrust from development [J]. Tectonics,

- 1998, 17 (5): 766~779.
- [83] Jackson JA, Fitch TJ, McKenzie DP. Active thrusting and the evolution of the Zagros fold belt [C]. In: McClay K, Price N. Special Publication (No 9). London: Geological Society of London, 1981. 371~379.
- [84] Kashfi MS. Geological evidence for a simple horizontal compression of the crust in the Zagros Crush Zone [C]. In: Chatterjee S, Hottot N III, (eds.). New Concepts in Global Tectonics. Lubbock: Texas Tech University Press 1992 119~130.
- [85] Ratschbacher L, Frisch W, Neubauer F, et al. Extension in compressional orogenic belts: The eastern Alps [J]. *Geology*, 1989, 17 (5): 404~407.
- [86] Janoschek WR, Matura A. Geology of the European countries Austria, Federal Republic of Germany, Ireland, The Netherlands, Switzerland, United Kingdom [M]. the Comite National Français de Géologie, 1980.
- [87] 高名修, 唐荣昌. 鲜水河断裂带新构造特征与地震关系的初步研究 [C]. 鲜水河断裂带地震学术讨论会文集. 北京: 地震出版社, 1985.
- [88] 四川省地震局. 鲜水河活动断裂带 [M]. 成都: 四川科学出版社, 1989.
- [89] Martin BD. Constraints to major right-lateral movements, San Andreas fault system, central and northern California, USA [A]. In: Chatterjee S, Hottot N III, (eds.). New Concepts in Global Tectonics. Lubbock: Texas Tech University Press 1992.
- [90] Hancock PL, Barka AA. Plio-Pleistocene reversal of displacement on the North Anatolian fault zone [J]. *Nature*, 1980, 286: 591~594.
- [91] Sibson RH, White SH, Atkinson BK. Structure and distribution of fault rocks in the Alpine Fault Zone, New Zealand [A]. In: McClellan KR, Price NJ. (eds.). Thrust and Nappe Tectonics. Published for The Geological Society of London by Blackwell Scientific Publications Oxford London Edinburgh Boston Melbourne. Ocean lithosphere. Geological Society of America, 1981, 29: 715~718.
- [92] 藤田至则. 隆起と陥没——环太平洋变动の問題. シンポジウム [隆起と陥没], 1986, 1~32. (日文)
- [93] Damon P. Continental uplift at convergent boundaries [J]. *Tectonophysics*, 1979, 61 (1~3): 307~319.
- [94] Dupre WR, Worrison RB. Quaternary geology of the Pacific margin [A]. In: Morrison RB. (ed.). Quaternary Nonglacial Geology: Contemporaneous US. Colorado: Geological Society of America, 1991. 141~214.
- [95] Gao Ming-xiu. Late Cenozoic taphrogeny and related earth dynamics in East Asia [A]. In: Proceedings of International Symposium on New Concepts in Global Tectonics, 1998.
- [96] Zorin Yu A, Frensov NA. On Geodynamics of Cenozoic uplifts in Central Asia [J]. *Tectonophysics*, 1979, 61: 271~283.
- [97] 平山次郎, 浅野周三. 中央复活山脉—帕米尔, 喜马拉雅山脉 [J]. *科学*, 1972, 42 (6). (日文)
- [98] Caminati E, Giunchi C, Argani A, et al. Plio-Quaternary vertical motion of the Northern Apennines: Insight from dynamic modeling [J]. *Tectonics*, 1999, 18 (4): 703~718.
- [99] Unruh JR. The uplift of the Sierra Nevada and implications for late Cenozoic epeirogeny in the western Cordillera [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1991, 103 (11): 1395~1404.
- [100] Morgan P, Swanberg CA. On the Cenozoic uplift and tectonic stability of the Colorado Plateau [J]. *Journal of Geodynamics*, 1985, 3 (1): 39~63.
- [101] Smith AG. Late Cenozoic uplift of stable continents in a reference frame fixed to South America [J]. *Nature*, 1982, 296: 400~404.
- [102] Cunningham WD. Cenozoic normal faulting and regional doming in the southern Hangay region, Central Mongolia: implications for the origin of the Baikal rift province [J]. *Tectonophysics*, 2001, 331 (4): 389~411.
- [103] Yano T, Matsumoto Y, Wu G. Pacific genesis induced from Phanerozoic reheating of upper mantle [J]. *Himalayan Geology*, 2001, 22: 51~64.
- [104] Bertotti GR, Picotti CV. Extension controls Quaternary tectonics, geomorphology and sedimentation of the N-Apennines foothills and adjacent Po Plain [J]. *Tectonophysics*, 1997, 282: 291~301.
- [105] Caminati E, Giunchi C, Argani A, et al. Plio-Quaternary vertical motion of the Northern Apennines: Insights from dynamic modeling [J]. *Tectonics*, 1999, 18: 703~718.
- [106] Scisciani V, Calamita F, Tavarnelli E, et al. Foreland-dipping normal faults in the inner edges of syn-orogenic basins: a case from the Central Apennines, Italy [J]. *Tectonophysics*, 2001, 330: 211~224.
- [107] Hussong DM, Uyeda S. Tectonic processes and the history of the Mariana Arc: a synthesis of the results of deep sea drilling project

- Leg 60 [J]. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 1981, 60: 909~929.
- [108] Wise DU. Keystone faulting and gravity sliding driven by basement uplift of Owl Creek Rocky Mountains of Montana and Wyoming [J]. GSA Bulletin, 1963, 75: 287~306.
- [109] Lin A, Ouchi T, Cen A, et al. Co-seismic displacements, folding and shortening structures along the Chelungpu surface rupture zone occurred during the Chi-Chi (Taiwan) earthquake [J]. Tectonophysics, 2001, 330: 225~244.
- [110] Murdock JN. Unrecognized failure of a critical test of strict plate tectonics: the trench region offshore of Guatemala, and a comparison with the Aleutians; Part IV [J]. New Concept In Global Tectonics, 1999, 12: 2~9.
- [111] Michiel H. Ocean trenches [A]. In: Proceedings of International Symposium on New Concepts in Global Tectonics. Tsukuba, 1998.
- [112] Choi DR. Subduction does not exist-from seismic data interpretation [J]. New Concepts in Global Tectonics, 2000, 15.
- [113] Choi DR. Deep earthquakes and deep-seated tectonic zones [J]. New Concepts in Global Tectonics, 2003, 27.
- [114] Smoot NC, Choi DR, Bhat MI. Mareing geomorphology [M]. Xyibrie corporation, 2001.
- [115] White RS. Deformation of the Makran Continental Margin [A]. In: Farah A, GeJong K (eds.). Geodynamics of Pakistan. Quetta: Geological Survey of Pakistan, 1979.
- [116] Chanier F, Ferrère J. Extensional deformation across an active margin, relations with subsidence, uplift, and rotations: the Hikurangi subduction, New Zealand [J]. Tectonics, 1999, 18: 962~976.
- [117] 叶·达包尼叶, 普鲁斯特, 等. 印度—欧亚碰撞带的西藏一侧 [A]. 中国地质科学院法国科学研究中心编. 中法喜马拉雅考察成果 (1980). 北京: 地质出版社, 1984.
- [118] Fielding E, Isaacs B, Barazangi M, et al. How flat is Tibet? [J]. Geology, 1994, 22: 163~167.
- [119] Chai BHT. Structure and tectonics evolution of Taiwan [J]. American Journal of Science, 1972, 272: 389~422.
- [120] Sissingh W. Tectonostratigraphy of the North Alpine foreland basin: correlation of Tertiary depositional cycles and orogenic phases [J]. Tectonophysics, 1997, 282: 223~256.
- [121] 刘嘉麒. 中国火山 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [122] 汪成民, 张洪波. 地震前地下水的短期与临震变化异常 [J]. 地震学报, 1982, 4 (4).
- [123] 高名修. 中国大陆内的一条重要地质灾害带 [A]. 天地生综合研究进展——第二届天地生相互关系学术讨论会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1989.
- [124] GAO Ming-xiu. Effect of the processes of continental dynamics for environmental engineering geology in China [A]. In: Msinos PG, Koukis GC, Tsiambaos GC, et al. Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environment. Athens: Greek National Group of laeg, 1997.
- [125] Dasgupta S, Mukhopadhyay M, Nandy DR. Active transverse features in the central portion of the Himalaya [J]. Tectonophysics, 1987, 136: 255~264.
- [126] 王富葆, 曹琼英, 刘福涛. 西昆仑山南麓湖泊和水系的近期变化 [J]. 第四纪研究, 1990, 4: 316~325.
- [127] Plafker G, Savage JC. Mechanism of the Chilean earthquakes of the May 21 and 22, 1960 [J]. GSA Bulletin, 1970, 81 (4): 1001~1030.
- [128] Plafker G. Tectonic deformation associated with the 1964 Alaskan earthquake [J]. Science, 1965, 148 (3678): 1675~1687.
- [129] 高名修. 华北块断区的现代引张应力场 [J]. 地震地质, 1979, 1 (1).

STUDY ON LATE CENOZOIC CRUSTAL TECTONISM

GAO Ming-xiu

(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper deals with late Cenozoic crustal tectonism by studying morphostructure and associated water system in a global scope. As young mountain belt is caused by deep dissection at the edge of a plateau, the keynote of complex morphostructure on Earth surface is actually made up of sequentially fixing arrangement of plateau-mountain-basin (P-M-B), with horst-like assemblage of B-M-P = P-M-B and step-like assemblage of P-M-B = P-M-B = P-M-B in different scales. It is found that the late Miocene planation surface preserved on the plateaus is comparable in age with the unconformity at the base of the Pliocene-early Pleistocene basins. Both imply the existence of a unified peneplain on the Earth surface until the latest Miocene. So the late Miocene peneplain substantially constrains the framework of the late Cenozoic crustal tectonism, and it is the late Cenozoic crustal tectonism that led to the breaking-up of the unified peneplain and brought about today's morphostructure. From sedimentation, unconformity, and evolution of the water system, two evolutionary stages can be recognized for the late Cenozoic crustal tectonism, namely the Pliocene-early Pleistocene and middle Pleistocene-present. The paper also demonstrated the Asian mega-dividing. It extends from the mountain area of East Siberia in the northeast, passing through the Mongolian and Tibetan Plateaus, to the Aravalli Range in northwestern India to the southwest, and that divides water systems into the Pacific and Indian Oceans and the Arctic Ocean, respectively. It has emerged since middle Pleistocene (0.78 Ma), indicating the forming time of the global morphostructure. Geological records related to deformation of broken peneplain fragments indicate that vertical arching movement with block faulting at differential elevation and subsidence is predominant. It is debated that extensional and compressive crustal tectonism can be induced only from vertical movements at some specific areas. Except local compression deformation, no any geological records show that the Pleistocene sediments experienced any processes related with regionally horizontal compression on a global scope. Recent crustal tectonism follows the same keynote.

Key words: late Cenozoic crustal tectonism; tectonic land form; peneplain surface; plateau-mountain range-basin (plain) assemblage (P-M-B); bending uplift; block differential elevated and subsidence movement