

峨眉断块山的形成

王运生, 王登攀, 王浆臻, 傅荣华, 杨艳娜

(成都理工大学 灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 峨眉山为一断块山, 因其宏伟、秀丽而著称, 但峨眉断块山是如何形成的, 缺乏系统深入的研究。基于 1: 25 000 工程地质测绘, 较为系统地研究了峨眉山地质构造形迹及构造叠加特征, 认为峨眉山抬升始于古近纪晚期, 喜山运动第一幕(始新世中期末)峨眉山受青藏高原隆升的影响, 在北西-南东向区域应力场作用下, 形成北北东向褶皱及北东向断层, 并上升成为剥蚀区。上新世以来, 在近东西向区域压应力场作用下, 钝锥形大峨山断块沿北东向峨眉山断层及北缘的北西向边界断裂不断向东强力楔入, 断块前缘早期的北北东向构造受推挤, 地层走向及倾向出现明显偏转: 锥顶前方龙门洞-报国寺一带地层由早期的北北东走向倾向南东的中生代地层转为南北走向, 地层出现倒转(西倾), 而远离断块端部的地层仍然为正常产状。与此同时, 锥顶北侧尖尖石背斜发生移褶, 形成北西向褶皱和断层, 而断块南侧峨眉山断层发生逆冲兼走滑活动。第四纪以来峨眉山间歇性强烈抬升, 经历至少 10 次强烈抬升事件, 逐渐形成现今地貌。新生代以来, 峨眉山断层两盘地层水平位错累计达 4 km, 垂直位错累计达 6 km。

关键词: 大峨山断块; 构造特征; 新生代; 构造叠加; 演化程式

中图分类号: P541 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0110-05

Study on the Formation of the Emei Faulty Block Mountain

WANG Yur sheng, WANG Deng pan, WANG Jiang zhen, FU Rong hua, YANG Yar na

(State Key Lab of Geohazard Prevention and Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Mt. Emei is a faulty block mountain, which is famous for its great and beautiful scenes, but its formation is lack of systematic studies. Based on the engineering geologic mapping of 1:25000 scale, the geological structure features and characteristics of structural superposition are systematically studied in this paper. The uplift of Mt. Emei began in the end of the Eocene, i.e., during the Himalayan movement of the first epoch, under the pressure of NW-SEE regional geostress, the NNE strike folds and NE faults have been formed and uplifted and became the erosion area. Since the Neocene, under the regional pressure of nearly EW geostress field, the blunt-cone Daeshan faulty block was wedging eastward along the NE Emei mountain faults and the NW boundary faults on the northern margin, and the early NNE strike strata of the block frontier bent anticlockwise, resulting in diversion of the strike and dip direction of strata. The strike of the strata in the frontier area (Longmendong-Baoguo) varied from the early leaning NNE towards SE to SN, and the strata dip westward, while the strata far away from the block frontier was still in normal attitude. The Jianjianshi anticline bent eastward in the north boundary of the block, forming the NW folds and faults, while the Emei mountain fault slipped in the south boundary of the block. Since the Quaternary, the intensive intermittent uplift occurred for the Emei mountain, and the current topography was formed due to more than 10 uplifting events. Since the Cenozoic, the horizontal dislocation between two strata of the Emei mountain fault is about 6 000 m, while the vertical dislocation is 4 000 m.

Key words: Daeshan faulty block; features of the structural geology; Cenozoic; structural superposition; evolution process

收稿日期: 2012-10-24 修回日期: 2013-01-08 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1131.017.html>

基金项目: 国家自然科学基金“深切河谷强震作用下谷坡地震动响应监测研究”(41072231); 中国地质调查局项目“汶川地震地质灾害调查评价——川西深切河谷斜坡地震动评价技术研究”(1212010914010)

作者简介: 王运生(1960-), 男, 安徽潜山人, 教授, 博士, 从事工程地质及区域构造稳定研究工作。E-mail: wangys60@163.com

峨眉山不但是中国四大佛教名山之一^[1],而且丰富地质现象也是闻名遐迩^[2],震旦-寒武系层型剖面、龙门洞三叠系沉积剖面在地质界知名度很高^[3-6],成为中外地学科考及国内地质^[7]、地理专业教学实习的基地。20世纪80年代至21世纪初完成的1:50 000填图较全面地揭示了峨眉山地区的地层及构造特征^[8],这期间,一些学者对峨眉地区表生地质作用进行过研究^[9-10],对川西地区的地形变进行了监测^[11],512汶川地震后,许多学者对川西地区地形变及构造应力场进行过较深入分析^[12-15]。但峨眉断块山是如何形成的?为什么在龙门洞一线地层倒转,而在一山之隔的川主河谷一线地层产状正常?已发表的文献资料未就上述问题做深入研究。在前人研究的基础上,本文通过对峨眉地区1:25 000及黄湾地区1:10 000大比例尺工程地质测绘,结合近年来道路开挖揭示的多个剖面编录与分析,对上述问题进行了探讨。

1 层状地貌特征

1.1 剥蚀夷平面

区内发育五级夷平面,一级夷平面分布于金顶-万佛顶一带,顶面海拔3 000~3 100 m,残积物厚0~2 m,以灰色黏土为主;二级夷平面分布于洗象池一带,海拔2 000~2 500 m,残积物为暗棕色黏土;三级夷平面分布于九老洞、大坪、华严寺等地,海拔1 700~1 900 m,残积物为棕色黏土;四级夷平面分布于万年寺、凤凰坪一带,1 200 m,残积物为黄色黏土;五级夷平面为东麓低山山顶面,海拔550~700 m,残积物以黄色、黄棕色黏土为主。根据区域夷平面对比及大渡河流域层状地貌测年成果,一级夷平面形成于上新世末;二级和三级夷平面形成于早更新世;四级、五级夷平面形成于中更新世^[16]。

1.2 阶地

在东麓低山区,河流阶地发育,其中黄湾河坝区阶地发育最全,共发育5级。

I级阶地:分布于罗坝,拔河3~4 m,为堆积阶地,具二元结构,卵砾石新鲜,成分复杂,以灰岩、白云岩、玄武岩、砂岩、泥岩、花岗岩为主,卵砾石以圆-次圆状为主,阶面保存完整,宽50~150 m,形成于全新世。

II级阶地:分布于张坝、天景-欧菜园子、王乡等地,阶地前缘拔河8 m在区内最为发育,为基座阶地,具二元结构,卵砾石新鲜,成分复杂,以灰岩、白云岩、玄武岩、砂岩、泥岩为主,颗粒以圆-次圆状为主,含较多的漂砾,阶面保存完整,宽500~600 m,形成于晚更新世末期。

III级阶地:分布较为局限,仅在高河坝一带发育较好,拔河17 m,为基座阶地,具二元结构,卵砾石及漂石弱风化、成分较简单,以灰岩、白云岩、砂岩为主,颗粒以圆-次圆状为主,含较多的漂砾,阶面改造明显,宽200~300 m,形成于晚更新世晚期。

IV级阶地:分布梁坎、地君庙、姚坪等地,拔河30 m,为基座阶地,具二元结构,卵砾石及漂石强风化-弱风化、成分较简单,以灰岩、白云岩、砂岩为主,颗粒以圆-次圆状为主,含较多的漂砾,阶面改造明显,宽100~200 m,形成于晚更新世早中期。

V级阶地:分布在刘坪等地,拔河约80 m,为基座阶地,

具二元结构,卵漂石强风化、成分较单一,以白云岩、砂岩为主,颗粒以次圆-次棱角状为主,阶面改造强烈,冲沟发育,宽约500 m,形成于中更新世晚期。

2 地质建造

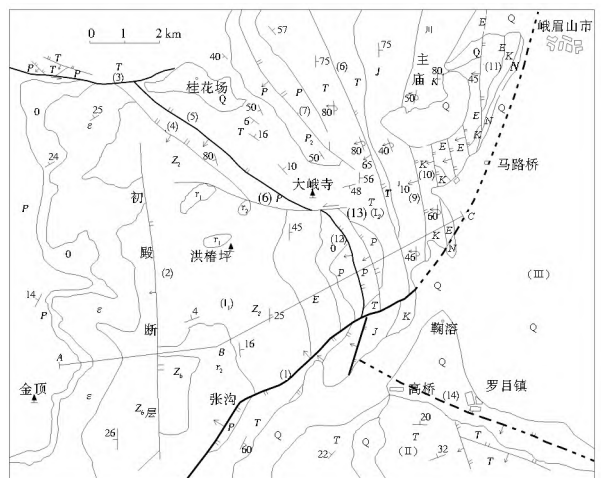
峨眉山地区除中奥陶统-志留系缺失外,其它时代地层发育齐全。从老到新依次为元古代峨眉山花岗岩,上震旦统-下奥陶统碳酸盐岩建造及碎屑岩建造;下二叠统梁山组碎屑岩建造,栖霞组、茅口组碳酸盐岩建造;上二叠统峨眉山玄武岩组大陆溢流玄武岩建造,宣威组碎屑岩建造;三叠系东川组碎屑岩建造,嘉陵江组碳酸盐岩建造及细碎屑岩建造,雷口坡组碳酸盐岩建造,须家河组(广义上的,包括跨洪洞组、小塘子组及狭义的须家河组)海陆交互相含煤建造;侏罗系下统自流井组、中统沙溪庙组、上统遂宁组、蓬莱镇组红色岩建造;白垩系下统夹关组、中统关口组、古近系名山组湖相红色岩建造;凉水井组半胶结前陆盆地类磨拉石建造;第四系下更新统卵砾石层深埋峨眉平原下部,中更新统冲积分布于山麓一带,晚更新统及全新统冲积卵砾石层分布于河流两侧及洪积扇的上部。高桥-峨眉县城一线为典型的冲积平原,堆积厚达300 m。

地层间接触关系较为清楚:震旦系与下伏地层,凉水井组与下伏地层,第四系与下伏地层为角度不整合;梁山组与奥陶系、茅口组与峨眉山玄武岩组、须家河组与下伏地层、自流井组与须家河组、夹关组与蓬莱镇组为平行不整合,其他地层之间为整合接触。

3 构造特征

3.1 构造区划分

峨眉山地处扬子板块西缘,为典型的断块山。以东北走向的峨眉山断层、北西走向的丰都庙断层为界,将峨眉山地区分为三个一级断块(图1),西侧为峨眉山断块(I),南西侧为二



I: 峨眉山断块(I₁大峨山断块; I₂毛草山断块); II: 二峨山断块; III: 峨眉平原断块; (1)峨眉山断层; (2)初殿断层; (3)麻子坝断层; (4)观心庵断层; (5)万年寺断层; (6)大峨寺断层; (7)牛背山断层; (8)善觉寺(伏虎寺)断层; (9)报国寺断层; (10)镜泊山断层; (11)凉水井断层; (12)新开寺断层; 13 马沟断层; 14 丰都庙断层

图1 峨眉山构造简图及构造区划分

Fig. 1 Simplified structural diagram and structural zones for Mt. Emei

峨山断块(II), 东侧为峨眉平原断块(III)。峨眉山断块可进一步分为大峨山断块及毛草山断块。峨眉景区正是位于被峨眉山断层、新开寺断层、马沟断层、大峨寺断层、万年场断层及麻子坝断层围限的顿锥形大峨山断块(图 1)。

3.2 构造形迹特征

峨眉山断块构造形迹可以分为北北东向构造、北东向构

造、近南北向构造、北西向构造及近东西向构造等。宏观上表现为褶皱和断层。北东向构造有峨眉山断层; 北北东向构造有凉水井断层、川主单斜构造及马林岩向斜等; 南北向构造有峨眉山背斜、初殿断层、伏虎寺断层(善觉寺断层)、报国寺断层、镜泊山断层等; 北西向构造有牛背山背斜; 东西向构造有麻子坝断层和大峨寺断层。主要褶皱和断层见表 1。

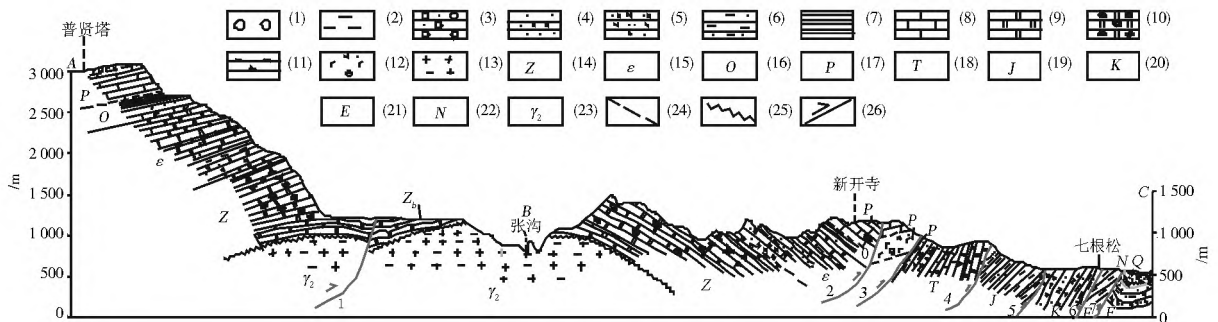
表 1 峨眉地区褶皱、断层一览表

Table 1 The folds and faults in the Mt. Emei area

构造组别	构造名称	主要特征
NNE	褶皱 尖尖石背斜	走向北东, 长 18 km, 核部地层为下二叠统茅口组灰岩, 两翼分别为上二叠统、三叠系、侏罗系。两翼产状正常, 北西翼倾角 45° 左右, 南东翼倾角 40°~65°。
	断层 凉水井断层	南起马路桥, 经凉水井, 过龙马池后, 伏于第四系之下, 长度大于 10 km, 断层走向北北东, 上盘为古近系岷山组, 下盘为新近系凉水井组, 下盘地层陡立。
NE	断层 峨眉山断层	本区一级断裂, 控制地貌演化。断层走向南东, 倾角 50°~70°, 断裂南起金口河, 北至夹江, 在峨眉平原隐伏于第四系之下, 全长 46 km。斜切峨眉山背斜, 水平错距达 4 km 以上, 致使张沟一带峨眉山玄武岩逆冲覆于二叠系、三叠系之上, 最大地层断距 6 km 以上。断层右旋错动导致上盘水系同步向北东扭曲, 断层破碎带宽度 50 m。断层带上盘断层崖地貌显著, 下盘为丘陵地貌。
	褶皱 峨眉山背斜	为区内最为宏观的褶皱构造, 分布面积约 100 km ² 。轴向近南北, 核部地层为前震旦系花岗岩, 出露于张沟-洪椿坪一线。两翼依次出露震旦系、寒武系、奥陶系、二叠系和三叠系。西翼地层产状正常、倾角较平缓, 在山顶一带地层倾角 10°~20° 之间; 东翼岩层倾角较陡, 在新开寺以东, 二叠系及中生代地层倒转。枢纽产状近于水平, 为斜歪水平褶皱。
SN	初殿断层	北起长老坪附近, 经仙峰寺, 南至三湾岗, 走向近南北, 长约 10 km, 断面西倾, 倾角 85°。
	善觉寺断层	发育报国寺北侧, 向东延伸进入阴沟消失于须家河组地层中, 长约 8 km, 断层近南北走向, 倾向西, 在报国寺-龙门洞口间, 上三叠统须家河组逆冲覆于侏罗系沙溪庙组之上, 两盘地层均倒转。
	报国寺断层	南起报国寺西侧, 经黄湾收费站, 消失于五叉沟。断层走向南北, 倾向西, 倾角约 45°, 断层长 8 km。在交大峨眉山校区, 断层上下盘均为白垩系夹关组, 上盘地层倒转, 下盘正常陡倾。断层带呈沟谷地貌。
	断层 镜泊山断层	南起邮电宾馆下游侧, 经西南交大峨眉山校区, 过镜泊山、姚坪后, 继续向北消失于夹关组地层中, 全长约 10 km。断层走向近南北, 倾向西, 西盘夹关组逆冲覆于东侧的岷山组地层之上, 上盘地层陡立, 下盘地层平缓。断层带宽 20 m, 倾角约 50°。
	新开寺断层	南起白杨寺附近, 经新开寺, 北端止于大峨寺断层, 长约 3 km, 走向近南北, 西倾, 倾角约 70°, 上盘下二叠统, 地层东倾, 倾角 40°; 下盘亦为下二叠统, 地层西倾, 倾角 25°。
NW	马沟断层	南起丁沟附近, 过方山西侧, 北端止于马沟, 与大峨寺断层相接。断层长 2.8 km, 走向近南北, 西倾, 倾角 50°。
	褶皱 牛背山背斜	为区内次级褶皱, 南起惠灯寺, 北至尖尖石。中段轴向北西, 北段逐渐转为北东(亦称尖尖石背斜), 长约 27 km。核部地层为下二叠统茅口组灰岩, 两翼分别为上二叠统、三叠系、侏罗系。南西翼产状正常, 倾角 45° 左右; 北东翼南端倒转, 为斜歪倾伏背斜。
	褶皱 桂花场向斜	南起纯阳殿, 北达砚台山, 轴向北西, 长度约 12 km。向斜北西段较宽, 南东段较窄。木鱼山一带核部地层为下三叠统铜街子组, 两翼分别为东川组、宣威组、峨眉山玄武岩组、茅口组。南西翼较缓, 10°~20°, 北东翼较陡, 20°~40°, 为一开阔的斜歪倾向向斜。
EW	观心庵断层	南起新开寺, 往北西延至喻田子附近消失。断层走向北西, 倾角 65°~70°, 为一逆断层。
	断层 万年寺断层	南东始于丁沟, 北西延至神卦山, 走向北东, 长约 13 km, 中倾南西, 倾角 50°, 上盘下二叠统, 下盘上二叠统、三叠系, 两盘地层均倒转。
	牛背山断层	牛背山背斜核部。走向北西, 南东起于麻柳湾, 经两河口、张山, 北西至梁坪, 长约 9 km。其断面南西倾, 倾角 60°。两盘接触紧密, 两河口附近可见下二叠统茅口组灰岩发生碎裂现象。属逆冲兼扭性断层。
EW	麻子坝断层	西起响水洞东, 向东经赵沟, 在净水附近消失, 全长 2.5 km, 断层倾角近于直立, 左旋走滑。
	断层 大峨寺断层	西起石笋沟, 东至华严寺, 走向近东西, 长约 5 km, 横切峨眉山背斜和桂花场向斜, 并错观心庵及万年寺断层, 反扭兼逆冲活动。

从表 1 和图 1、图 2 可知, 区内断层所处构造部位不同, 断层性质也有明显差异。近南北走向的新开寺断层和马沟断层地处锥形断块前端, 为逆断层, 几乎没有走滑分量; 善觉寺断层与报国寺断层紧邻断块前端, 为近南北向西倾逆冲断层, 断失的地层厚度达数百米, 构成较大的地势差; 东侧低山, 西侧中高山。麻子坝断层、大峨寺断层位于断块北缘, 走向与断块运动方向近乎一致, 以走滑为主, 地层水平错距达 2.5 km, 断层两侧地势差

不大, 仅 200~300 m。观心庵断层及万年寺断层同样位于断块北缘, 但走向与断块运动方向交角近 40°, 断层走滑兼逆冲, 巨大的地势差与溯源侵蚀作用耦合导致一线天的形成。牛背山断层位于断块北缘外侧, 紧邻万年寺断层, 为走滑兼逆冲性质, 水平位错约 750 m, 垂直位错约 200 m。峨眉山断层位于大峨山断块南缘, 规模大, 总体走向北东 40°~50°, 为逆冲兼走滑性质, 逆冲分量大于走滑分量, 断层右旋走滑导致张沟一带水系同步扭曲(图 3)。



1. 初殿断层; 2. 新开寺断层; 3. 马沟断层; 4. 普贤寺断层; 5. 报国寺断层; 6. 镜泊山断层; 7. 凉水井断层

图2 大峨山断块剖面图

Fig. 2 The cross section of Daeshan faulty block

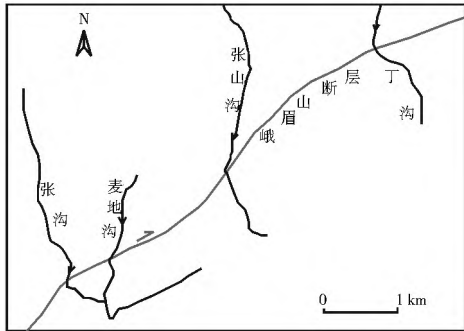


图3 峨眉张沟一带峨眉山断层导致水系扭曲

Fig. 3 Synchronous bending of the streams in the Zhanggou area along the Emei mountain fault

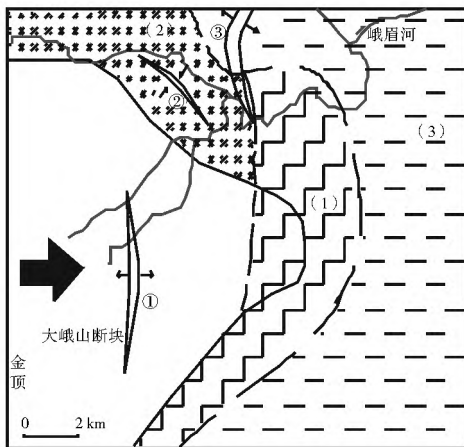


图4 大峨山断块前缘强变形区范围

Fig. 4 Strong deformation distribution in the frontier of Daeshan faulty block

区内构造最大的特点是围绕大峨山顿锥形断块端部北东侧出现移褶现象,使北北东向的尖尖石背斜枢纽由北北东转为北西,平面旋转角度达 40° ;断块前端迭瓦状抬升,地层断失,中生代地层出露宽度由北侧川主河一带 9.5 km 到报国寺一带缩短为 1.5 km ,地层厚度断失约 2000 m ,邻近区地层走向出现明显偏转,由北北东走向($N20^\circ E/SE \angle 45^\circ$)转为近南北走向甚至北北西走向($SN/W \angle 45^\circ$),走向偏转的角度 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间,地层倾向由倾南东发生倒转倾向西,横剖面上旋转角度在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 之间;在断块南缘沿峨眉山断层

强烈走滑逆冲,水平错距约 4 km ,断层下盘地层受挤压向走向由北北东向向北东向偏移,偏转角度 $20^\circ \sim 25^\circ$ 。

从构造形成的时序来看,峨眉山背斜、峨眉山断层及尖尖石背斜形成于喜山早期,北西向构造及近南北向构造形成于新近纪晚期—第四纪。

4 峨眉断块山抬升演化程式

根据地层接触关系、构造形迹及新生代地层颗粒成分成熟度、结构成熟度、磨圆度分析,震旦纪—古近纪始新世构造运动表现为多次升降活动,地层间表现为5个平行不整合。其中中奥陶世—石炭纪末的抬升运动历时最长,剥蚀时间长达 1.5 亿年 ;侏罗纪初期峨眉山地区与西部剥蚀区存在一定高差,有成层的砾岩形成。进入喜山运动早期即始新世中期末,随着印度板块与欧亚板块的最终碰撞,青藏高原率先褶皱抬升,南北受挤压导致深部物质向东挤出^[10],区内受北西西向区域压应力场的影响^[10],大峨山断块在新近纪以来发生向东楔入作用,研究区地层开始褶皱、断裂,形成一系列北北东向褶皱与断层,如北东向尖尖石背斜(川主北东向单斜构造即为的南东翼)。峨眉山背斜也形成于此期,不过当时背斜轴向为北北东向;峨眉山断层下盘在张沟一带地层走向为北东向,亦为早期北北东向地层顺时针旋转而成;断块前端北侧尖尖石背斜南西段受基岩出现移褶,形成北西向斜歪倾伏背斜。

新近纪峨眉地区与西部褶皱系地势差并不大,因为尽管上新世凉水井组角度不整合在老地层之上,卵砾石层既有近源须家河组石英砂岩砾岩又有异源的石英岩卵砾石、石英片岩卵砾石为主,颗粒粒径较小,夹少量漂砾,并有较多的黏土层,后者应该来源于距离较远且率先强烈抬升的西部褶皱变质岩区。上新世末峨眉地区和青藏高原一同进入夷平期,现今的金顶—万佛顶较平缓的山顶面形成于此期。

进入第四纪,受西部区域构造应力的影响,大峨山地区开始快速抬升,峨眉前陆盆地开始断陷,早期的水系格局被打破,出现新的分水岭,构造运动进一步发展。

(1) 早更新世。在近东西向区域应力场作用下大峨山断块进一步向东楔入^[10]。由于周界断裂内倾,断块水平位移的同时,伴有强烈的逆冲活动,从而导致大峨山断块间歇性抬升,分别形成 $2000 \sim 2500\text{ m}$, $1700 \sim 1900\text{ m}$ 两级夷平面,峨眉九老洞形成于第三级夷平期。

(2) 中更新世。峨眉山已抬升至 2 000 m 左右, 与东部的峨眉平原地势差加大, 水系的格架基本形成, 峨眉河溯源侵蚀加剧, 其间经历了 3 次间歇期, 分别形成第四级夷平面 (1 200 m), 第五级夷平面 (550~700 m)、V 级阶地, 从 V 级阶地堆积物的颗粒成分分析, 均是近源的须家河组砂岩、雷口坡组灰岩、白云岩及峨眉山玄武岩等, 以漂、卵石为主, 风化严重。

(3) 晚更新世。河流初具规模, 在河流出山口地带冲洪积发育; 前人圈定的“中更新世冰水堆积”(相当 IV 级阶地), 更像是上游冰湖溃决形成的泥石流堆积, 理由是这些“冰水堆积”局限于山口地带, 泥砾混杂, 磨圆度相对较差, 以次棱角—次圆状为主, 颗粒粗大, 以漂(块)卵(碎石)为主, 成分与河道上游基岩对应。进入晚更新世中晚期, 溯源侵蚀加剧, III 级阶地卵砾石层磨圆度以圆及次圆为主, 成分复杂, 有较多上游地层的卵砾石如花岗岩, 表明当时一线天已形成。此时金顶已经历了快速抬升, 山顶面接近 3 000 m。晚更新世中后期末次冰期冰川作用, 上游物源极其丰富如藏坪坝冰碛, 冰后期冰融水这些物源搬运到黄湾及峨眉平原堆积, 在黄湾地区形成极为发育的 II 级阶地。全新世峨眉断块山继续抬升, 抬升速率每年 1~2 mm^[11,14,15], 抬升幅度达 10~20 m。

5 结论

通过综合分析, 对峨眉断块山的抬升过程有如下几点认识: (1) 峨眉断块山抬升始于古近纪晚期, 喜山运动第一幕(始新世中期末), 受青藏高原隆升的影响, 在北西西—南东东区域应力场作用下, 形成北北东向褶皱和断层, 成为剥蚀区; (2) 上新世以来, 在近东西向区域压应力场作用下钝锥形峨眉断块山沿北东向峨眉断层及北缘的北西向边界断裂系不断向东强力楔入, 断块前缘早期的北北东向构造受推挤, 地层走向及倾向出现明显偏移: 龙门洞—报国寺一带地层由早期的北北东向转为南北向, 地层出现倒转, 形成一系列近南北走向、西倾的迭瓦状构造。 (3) 第四纪以来峨眉山间歇性强烈抬升, 经历至少 10 次强烈抬升事件, 形成 5 级夷平面及 5 级阶地, 并使断块前端南北走向地层及断裂形成向东凸出的弧形构造; 张沟峨眉山断层大幅度走滑、逆冲抬升, 与东侧平距不足 4 km 峨眉平原的幅度达 2 500 m, 形成著名的舍身崖。 (4) 峨眉山地区现今区域应力场方向为北北西—南南东, 与主边界断裂交角大, 以逆冲抬升为主, 走滑分量相对较小。

参考文献(References):

- [1] 张立生. 漫游峨眉山[J]. 火山地质与矿产, 1998, 19(3): 255-267. (ZHANG Li sheng, Adventures in Mt. Emeishan[J]. Volcanology & Mineral Resources, 1998, 19(3): 255-267. (in Chinese))
- [2] 四川省地质矿产局二〇七地质队地质矿产部成都地质矿产研究所. 峨眉山地质旅游[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 64. (Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources of Ministry of Geology and Mineral Resources of Sichuan Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources Geological Team 207. Emeishan Geology Tourism[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1988: 64. (in Chinese))
- [3] 陆元法, 黄慧琼, 叶志良. 峨眉龙门洞中下三叠统的化学地层和沉积地球化学[J]. 中国地质科学院成都地质矿产研究所刊, 1956, 第 7 号: 95-108. (LU Yuanfa, HUANG Huiqiong, YE Zhiling. Chemical Stratigraphy and Sedimentary Geochemistry of Middle and Lower Series of Triassic in Longmengong, Emei, Sichuan[J]. Bull. Chengdu Inst. Geol. M. R., Chinese Acad. Geol. Sci., 1956, NO. 7: 95-108. (in Chinese))
- [4] 张继庆. 四川峨眉龙门洞剖面中下三叠统岩石特征及沉积相分析[J]. 成都地质矿产研究所刊, 1983, 第 3 号: 1-50. (ZHANG Jiqing. Rock Types and The Analysis of Their Sedimentary Facies of The Lower and Middle Triassic Section in Longmengong, Emei, Sichuan[J]. Bull. Chengdu Inst. Geol. M. R., Chinese Acad. Geol. Sci., 1983, NO. 3: 1-50. (in Chinese))
- [5] 林文球, 王洪峯, 宋华彬. 四川峨眉龙门洞晚二叠世—早三叠世地层及其沉积环境[J]. 矿物岩石, 1982, 2(3): 50-55. (LIN Wenqiu, WANG Hongfeng, SONG Huabin. Upper Permian to Lower middle Triassic Strata and Sedimentary Environments in Longmengong, Emei, Sichuan[J]. Mineral Petrol, 1982, (3): 50-55. (in Chinese))
- [6] 王正琪, 李秀华, 王文才, 等. 四川峨眉龙门洞下三叠统嘉陵江组沉积相[J]. 矿物岩石, 1982, 2(3): 56-70. 121-122. (WANG Zhengqi, LI Xiuhua, WANG Wencai, et al. Tidal Flat Deposit of Lower Triassic Jialingjiang Formation in Emei Longmengong, Sichuan[J]. Mineral Petrol, 1982, 2(3): 56-70. 121-122. (in Chinese))
- [7] 夏林圻, 徐学义, 李向民, 等. 亚洲 3 个大火成岩省(峨眉山、西伯利亚、德干)对比研究[J]. 西北地质, 2012, 45(2): 1-26. (XIA Linqi, XU Xueyi, LI Xiangmin, et al. Comparison of Three Large Provinces (Emeishan, Siberia, Deccan) in Asia[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(2): 1-26. (in Chinese))
- [8] 四川省地质矿产局 207 地质队. 1: 50000 峨眉幅、龙池幅区域地质调查报告[R]. 1989. (Sichuan Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources Geological Team 207. 1: 50000 Regional Geological Survey Report in Emei and Longchi[R]. 1989.)
- [9] 骆祥君. 四川峨眉山净水谷地冰川遗迹及其意义[J]. 第四纪研究, 1991, (1): 38-42. (LUO Xiangjun. Glaciated Landform, Erratics and Loess in Jingshui Valley, Emei, Sichuan[J]. Quaternary Sciences, 1991, (1): 38-42. (in Chinese))
- [10] 黄润秋, 王士天, 张倬元, 等. 中国西南地壳浅表层动力学过程及其工程环境效应研究[M]. 成都: 四川大学出版社, 2001: 11-25. (HUANG Runqiu, WANG Shitian, ZHANG Zhuoyuan, et al. The Dynamical Process of Earth's Superficial Crust and Its Engineering Environmental Effect[M]. Chengdu: Sichuan University Publishing House, 2001: 11-25. (in Chinese))
- [11] 王双绪. 川西地区近期大地垂直形变场演化与地壳运动特征[J]. 地壳变形与地震, 1992, 12(2): 17-22. (WANG Shuangxu. Characteristics of the Evolution of Recent Vertical Deformation Field and the Crustal Motion in West Sichuan[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1992, 12(2): 17-22. (in Chinese))
- [12] 滕吉文, 白登海, 杨辉, 等. 2008 汶川 Ms 8.0 地震发生的深层过程和动力学响应[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1385-1402. (TENG Jiwen, BAI Denghai, YANG Hui, et al. Deep Processes and Dynamic Responses Associated with the Wenchuan Ms 8.0 Earthquake of 2008[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(5): 1385-1402. (in Chinese))

(下转第 121 页)

- tured Porous Media[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(2): 305-319.
- [3] 陈崇希. 岩溶管道-裂隙孔隙三重空隙介质地下水流模型及模拟方法研究[J]. *地球科学*, 1995, 20(4): 361-366. (CHEN Chongxi. Groundwater Flow Model and Simulation Method in Triple Media of Karstic Tube-Fissure-Pore[J]. *Earth Science Journal of China University of Geosciences*, 1995, 20(4): 361-366. (in Chinese))
- [4] Rozos E, Koutsogiannis D. A Multicell Karstic a Quifer Model with Alternative Flow Equations[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 325: 340-355.
- [5] 胡云进, 速宝玉, 詹美礼. 裂隙岩体非饱和渗流研究综述[J]. *河海大学学报*, 2000, 28(1): 40-46. (HU Yunjin, SU Baoyu, ZHAN Meili. Review of the Research on Unsaturated Seepage Flow in Fractured Rock Masses[J]. *Journal of Hohai University*, 2000, 28(1): 40-46. (in Chinese))
- [6] Hill C A, Eberz N, Buecher R H. A Karst Connection Model for Grand Canyon, Arizona, USA[J]. *Geomorphology*, 2008, 95: 316-334.
- [7] Quinn J J, Tomasko D, Kuiper J A. Modeling Complex Flow in a Karst Aquifer[J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 184: 343-351.
- [8] Shoemaker W B, Kuniandy E L, Birk S, et al. Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW 2005[M]. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey, 2007.
- [9] Rossmann L A. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0[R]. Cincinnati, OH: U. S. EPA, 2010.
- [10] Peterson E W, Wicks C M. Assessing the Importance of Conduit Geometry and Physical Parameters in Karst Systems Using the Storm Water Management Model (SWMM)[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329: 294-305.
- [11] Hunt B. *Fluid Mechanics for Civil Engineers*[M]. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, 1995.
- [12] 王茂枚. 岩溶地区地下水动力条件物理模拟[D]. 南京: 河海大学, 2008. (WANG Maomei. Physical Modeling of the Groundwater Hydrodynamics in Karst Region[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [13] 鲁程鹏, 束龙仓, 刘丽红, 等. 基于灵敏度分析的地下水数值模拟精度适应性评价[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(1): 26-30. (LU Chengpeng, SHU Longcang, LIU Lihong, et al. Adaptability Evaluation of Numerical Simulation Accuracy of Groundwater Based on Sensitive Analysis[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2010, 38(1): 26-30. (in Chinese))
- [14] Barenblatt G K, Zheltov I P, Kochina N. Basic Concepts in the Theory of Seepage of Homogeneous Liquids in Fissured Rocks[J]. *Prikl. Mat. Mekh.* 1960, 24(5): 852-864.
- [13] 闻学泽, 张培震, 杜方, 等. 2008年汶川8.0级地震发生的历史与现今地震活动背景[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(2): 444-454. (WEN Xueze, ZHANG Peizhen, DU Fan, et al. The Background of Historical and Modern Seismic Activities of the Occurrence of the 2008 Ms8.0 Wenchuan, Sichuan, earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(2): 444-454. (in Chinese))
- [14] 刘宇平, 唐文清, 赵济湘. 青藏高原东部及邻区现代地壳运动GPS监测[M]. 北京: 地质出版社, 2010. (LIU Yuping, TANG Wenqing, ZHAO Jixiang. Crustal Motion and Deformation from GPS Monitoring in the Eastern Qinghai-Tibet Plateau and Adjacent Areas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010. (in Chinese))
- [15] 张希, 张晓亮, 张四新, 等. 青藏块体东北缘近期GPS水平运动特征与汶川大地震影响[J]. *地震研究*, 2010, 23(4): 265-268. (ZHANG Xi, ZHANG Xiaoliang, ZHANG Sixin, et al. Features of Current Horizontal Movement Observed by GPS and Influence of the Great Wenchuan Earthquake in the Northeastern margin of Qinghai-Xizang block[J]. *Journal of Seismological Research*, 2010, 23(4): 265-268. (in Chinese))
- [16] 黄润秋, 王运生, 罗永红, 等. 典型深切河谷重大工程地质问题分析与评价[R]. 成都: 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 2012. (HUANG Runqiu, WANG Yunsheng, LUO Yonghong, et al. Analysis and Evaluation of the Key Engineering Problems in the Typical Deep Valley[R]. Chengdu: State Key Lab of Geohazard Prevention and Environment Protection, Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese))

(上接第114页)