

滇西北宾川地区主要活动断裂及其活动构造体系

罗睿洁^{1,2}, 吴中海², 黄小龙², 黄小巾^{2,3}, 周春景², 田婷婷^{1,2}
LUO Ruijie^{1,2}, WU Zhonghai², HUANG Xiaolong², HUANG Xiaojin^{2,3},
ZHOU Chunjing², TIAN Tingting^{1,2}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048

1. *College of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

3. *College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China*

摘要:通过卫星遥感解译和地表调查,对滇西北宾川地区活动断层进行了相对全面的调查研究,并对该区活动构造体系提出了新认识。研究表明,该区发育以北东向正断层和走滑断层为主的活动断裂,并构成了典型的张扭性帚状构造,控制了宾川地区构造地貌的发育。该活动构造体系的主干活动断裂是近南北向程海—宾川断裂向南至宾川处分解后形成的2条分支断层,即近南北向以正断性质为主兼具左旋的宾川断裂(F1)和北东向左旋走滑的上沧—鱼棚断裂(F2)。宾川地区活动构造体系是在区域近东西向伸展和微地块顺时针旋转的共同作用下形成的,反映了滇西北裂陷带在青藏高原整体瞬时旋转背景下的左旋拉分运动模式。同时,对宾川地区活动构造体系的研究也有助于更好地认识该区未来的强震危险性,对于其中主干断裂(F1、F2)的大震危险性应给予更多关注。

关键词:滇西北裂陷带;活动断裂;宾川帚状活动构造体系;构造地貌;地震

中图分类号:P315.1;P542+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2015)01-0155-16

Luo R J, Wu Z H, Huang X L, Huang X J, Zhou C J, Tian T T. The main active faults and the active tectonic system of Binchuan area, northwestern Yunnan. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(1):155-170

Abstract: In this paper, the research on the principal active fault in Binchuan area was conducted through satellite remote sensing interpretation and surface investigation, and then some new opinions concerning the active structural system of this area were put forward. The results achieved by the authors show that there are mainly NE-trending normal faults and strike-slip faults in this area, which constitute a typical transtension brush-structure and results in the geomorphical evolution of Binchuan area. The major faults of this active structural system are two splay fractures divided by the NS-trending Chenghai fault when the fault extended southward to Binchuan: the NS-trending Binchuan fault (F1) which has both normal and left-lateral strike-slip features, and the NE-trending Shangcang-Yupeng left-lateral strike-slip fault (F2). The formation and evolution of Binchuan's active structural system was under the joint action of the regional EW-trending extension and the clockwise rotation of the micro-massifs, which reflected the NYRZ's left-lateral and pull-apart tectonic movement pattern in the context of the holistic clockwise rotation of the Tibetan Plateau. Meanwhile, the survey of the active structural system will contribute to understanding the future seismic risks in Binchuan area, and it is suggested to pay more attention to the risk of principal faults for strong earthquake.

Key words: Northwestern Yunnan Rift Zone (NYRZ); active fault; Binchuan active brush-structure; structural landform; earthquake

收稿日期:2014-11-15;修订日期:2014-12-01

资助项目:中国地质调查局项目(编号:1212011120163、12120114002101)、中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目(编号:DZLXJK201410)和国家自然科学基金项目(批准号:41171009)

作者简介:罗睿洁(1992-),女,在读本科生,地球化学专业。E-mail: ljdyx@163.com

通讯作者:吴中海(1974-),男,博士,研究员,从事活动构造与地震研究。E-mail: wzhh4488@sina.com

宾川盆地位于滇西北Z字型裂陷带西南端转折处(图1),是由近南北向程海断裂带南段所控制的拉张剪切应力作用下的复合型盆地。宾川地区的构造地貌形态复杂,新构造活动显著,分布多期次不同走向和运动性质的活动断层(图2)。前人观点^[1-9]认为,宾川盆地是由程海断裂南端近南北向的主断层及次一级左行排列的北东向左旋走滑断层控制下的走滑拉张盆地,着重强调斜列的北东向左旋断层控制了盆地区域内的次级拉分作用,使盆地自北向南形成了3个不同的沉积中心。另有观点^[10]把程海断裂划归为大理断层系,认为宾川盆地是程海断裂中段北东—南西向伸展变形的结果,并把程海断裂带的剪切变形特点归为大理地块由南到北作不均匀顺时针旋转的结果。

前人^[1-10]不同程度地归纳了宾川地区活动断层及其控制盆地的发育特征,但缺乏对活动断层全面系统的调查研究,该区主要活动断层的运动性质、几何形态及其成因机制仍存争议。一方面,程海断裂发育历史悠久,宾川地区存在多期不同应力场作用下产生的老断层,有的走向与新的活动断层相近,在断层解译时可能会相互混淆;有的在第四纪以来由于区域应力场的改变,运动性质发生了变化,成为新的活动断层。因此,不同期次构造运动叠加造成的地质现象可能对断层运动性质产生误判。如对宾川盆地西缘的北东向断层,有观点认为它是右旋走滑^[10],依据是断层两侧的三叠纪褶皱发生了较大位移的右旋走滑,但那可能只是古近纪或更早时期的断层活动方向,而第四纪期间区域内北东向断裂应以左旋走滑为主^[9]。另一方面,由于第四纪沉积物的覆盖和人类活动的改造,对于穿过盆地的活动断层走向的延伸很多都只是推测,尤其是对于斜列的左旋断层组。虽然该区确实存在北东—北北东向断层控制地形发育的现象,但在北东向断层延伸至边界主控断层以外区域时,它们对地貌的控制已很不明显,并且在与边界主控断层交会部位也没有表现出相应的构造活动现象。因此,它们是否属于平行斜阶的走滑断层系显然存在不确定性。在区域构造方面,程海断裂带现今的近东西向伸展及其在宾川地区产生北东向左旋走滑断层系的原因也存在着多种争议^[6-7,98,11-17],这其实也是对滇西北裂陷区现今地壳运动模式的争论。因此,探究宾川地区活动断层及其活动构造体系,有助于深入

理解滇西北裂陷带的发育演化过程,更加准确地理解滇西北裂陷带是如何响应青藏高原隆起的。同时,程海断裂带作为一条第四纪以来显著活动的断裂带,其两端在历史上^[18-19]皆发生过 $M \geq 7.0$ 的大震活动,而该断裂带中南段的宾川地区近200年来都未发生过6.0级以上地震,研究该区的断层活动性及其活动构造体系,有助于科学评价该区未来的地震危险性。

1 研究区概况

1.1 区域构造概况

滇西北裂陷带处于青藏高原东南缘,东南邻红河断裂带,西北接北西向的德钦—中甸断裂,是区域上极为显著的近南北向活动构造带和强震频发区(图1)。该区内构造行迹以近南北向为主,第四纪期间发育了一系列近东西向伸展的裂陷盆地。前人^[1-2,4-6,10]将滇西北裂陷带的形成归结为4种不同模式:①北西向大型走滑断裂带的尾端拉张变形效应;②右阶斜列的北西向或左阶斜列的北东向大型走滑断裂带斜列阶区的走滑拉分变形结果;③川滇活动断块顺时针旋转过程中端部拉张变形的产物;④近南北向右旋剪切背景下,区域内的微断块顺时针旋转作用与伴生的北东向左旋走滑断裂带的尾端拉张变形相互叠加的结果。总体而言,虽然对于滇西北裂陷带的形成模式存在争议,但可以明确其由多因素控制,有不同运动模式的叠加,理解多个因素互相影响的过程及不同应力场的期次顺序,是解析宾川地区活动构造体系及其成因的关键。

宾川盆地由滇西北裂陷带东部的程海断裂主控发育。程海断裂带总体呈近南北向的反S形展布,北起永胜西北,南至弥渡盆地东南,全程长约200km,整个断裂带影响最宽处约50km,主控着金官、永胜、程海、期纳、宾川、弥渡等盆地的发育。新生代期间,在印度和欧亚板块强烈持续碰撞的动力学背景下,程海断裂带大体经历了3个活动阶段^[9]:①始新世中—晚期,与板块碰撞初期相对应,区域上主要表现为中—低角度、自西向东的逆冲或逆掩的断层活动,同时可能伴有水平右旋运动,区域构造应力场主压应力方向为近东西向;②渐新世—中新世早期,程海断裂发生大规模的右旋走滑运动,使得该区进一步发生压缩变形;③上新世以来,该区域进入剪切伸展变形阶段,程海断裂带也由此进

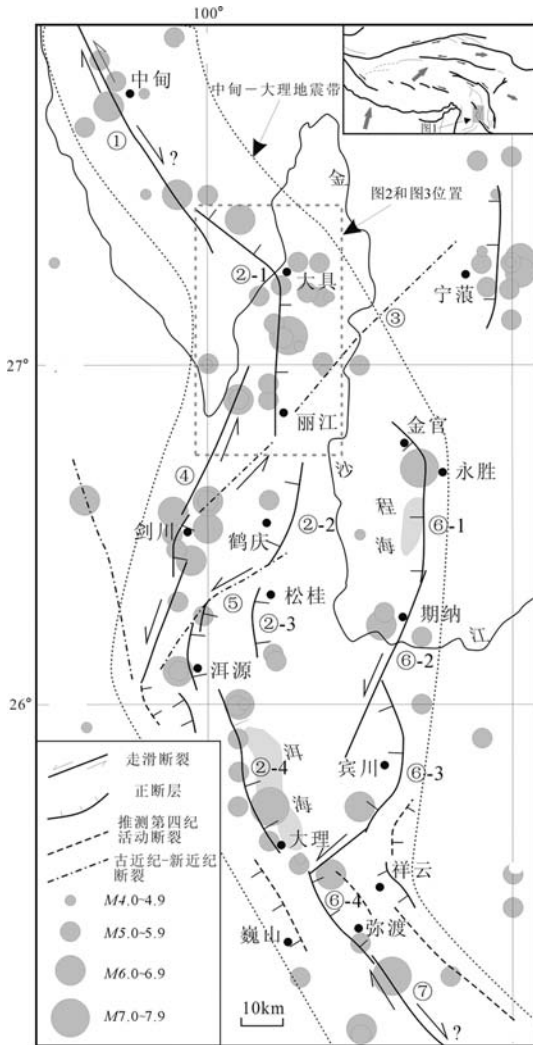


图1 滇西北裂陷带区域构造简图^①
 Fig. 1 Regional tectonic map of Northwestern Yunnan Rift Zone

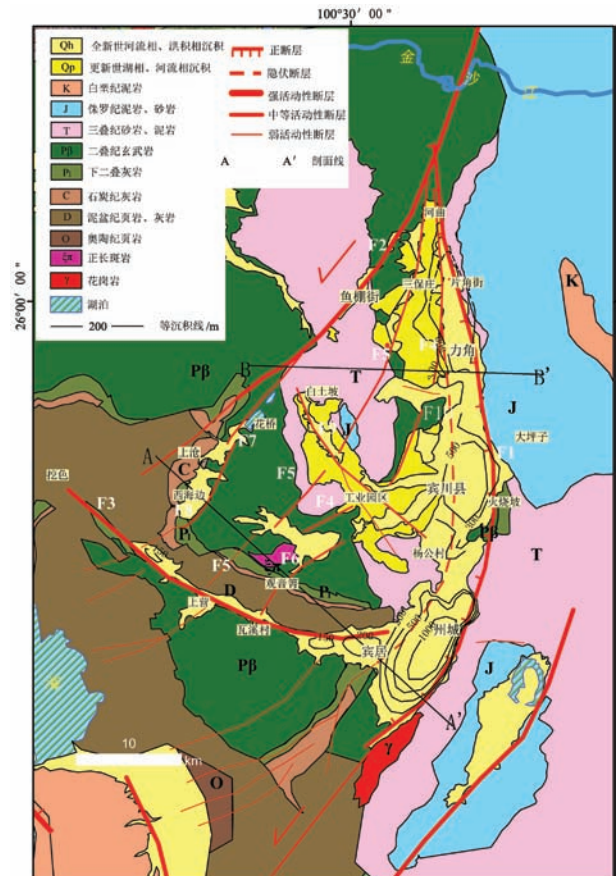


图2 宾川地区地质和第四纪等沉积线图^①
 Fig. 2 Geological and Quaternary sedimentary isobath map of Binchuan area

入了一个新的张扭性活动阶段。对宾川活动构造体系的研究,显然有助于进一步了解程海断裂的活动阶段与活动方式;对于科学认识和探索滇西北地区在新构造期的变形方式及成因机制具有重要意义。

1.2 宾川地区的地质地貌特征

近南北向的程海断裂是一条第四纪活动显著的断裂带,造成宾川盆地以北的金沙江左旋错动逾3km^[8],向南延伸至宾川盆地北端后分为东、西2支,东支为总体近南北向兼具正断作用和左旋走滑作用的宾川断裂(F1),西支为北东向的左旋走滑断层(F2),即上沧—鱼棚断裂。二者与南端北西西走向

且向南微凸的宾居断裂(F3)所围限的近三角形地带,即为宾川地区。狭义的宾川盆地是指由东缘宾川断裂(F1)控制的,充填了第四系沉积物的狭长近南北向断陷盆地。宾川地区具有复杂的地质和地貌格局。地貌上(图3),盆地东侧F1以东是高大的东山山脉,平均海拔在2300m以上,最高峰2866m,而F1西侧的山前盆地平均海拔骤降到1500m左右。同时,西侧的宾川断陷盆地自南向北由于北西向的断层分割又可分为3个次级沉降中心,最大沉积中心在宾居,最厚沉积达1000m。3个沉降中心及其沉积等厚线长轴方向都与宾川盆地东侧断层F1的走向平行,反映了该边界断层对盆地断陷起着明显的控制作用。F1东侧的东山山脉主体岩性为三叠纪—侏罗纪砂岩及泥岩。盆地内发育的近东西向次级隆起和北西—北北西向山丘将盆地分隔为多个次级盆地。该区内不同方向的次级断裂也

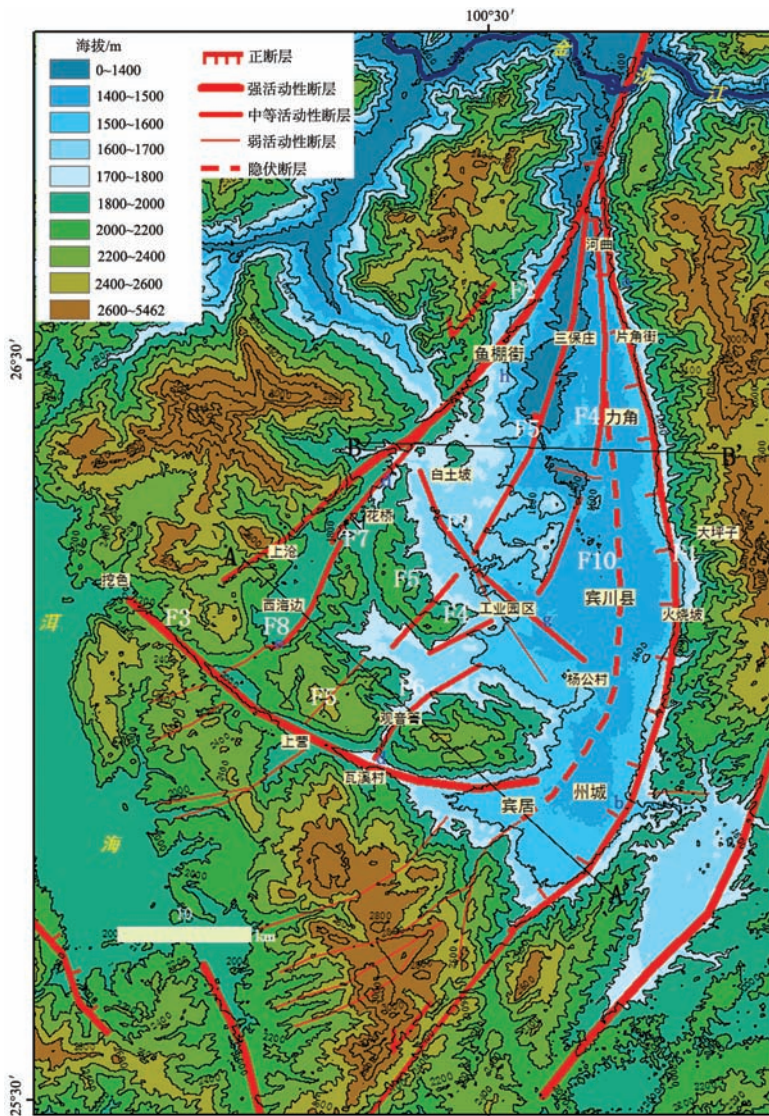


图3 宾川地区地形图

Fig. 3 Topographic map of Binchuan area

控制了多个第四纪的次级沉降中心,并与现存老断层共同造就了该区复杂的地质地貌格局。地质方面,如图2所示,在覆盖第四纪沉积物的沉降区以外,中北部为二叠系—侏罗系构成的向斜,并可见三叠系发生右旋错动,这可能是由始新世中晚期程海断裂带的活动造成的^[9],该期右旋活动还伴有自西向东的逆掩,从而形成了宾川盆地东侧中部二叠纪岩层构成的飞来峰。另外,该区西至西南侧还大量出露二叠纪玄武岩及少量燕山期正长斑岩,至西南侧边缘,沿F3断裂北侧以出露泥盆纪灰岩为主。

2 主要活动断层的活动性与活动特征

2.1 主要活动断层

笔者通过遥感解译^[20-25]及地表调查,将宾川地区活动断层初步划分为以下3组(图4、图5):①北东—北北东向活动断层组:该组断层数量最多,其中F1为控制宾川盆地发育的东边界断裂,它与程海断裂至宾川地区分支的F2共同构成了宾川地区活动断层体系中的主干断裂,而区内次级的北东—北北东向断层多为F1、F2的次生断层;②北西—北西西向活动断裂:以F3和F9为代表的北西向断层,控制了宾川盆地内北西向隆起的分布,并分割了该盆地中的北东—北北东向的断层组,但有时又会被规模较大的北东向断层所限制;③其他活动断裂,由于地质历史上的多期次构造活动,以及区内不同断层活动间的相互影响,区内还存在一些次一级的断裂,这些断裂大多规模小、活动性不显著,本文对其不做详细的讨论,而重点对前2组主要活动断层进行分析。

(1) 北东—北北东向断裂

宾川断裂(F1):该断层构成宾川盆地东部边界,整体为近南北向微凸向东侧的弧形正断层。在遥感卫星图(图4)上可见其显著的线性构造,盆山边界清晰,表明其第四纪活动性显著。该断层总长约73km,是程海断裂中南段的主干断层之一。自北向南,该断层的走向和运动性质都有所变化。该断裂北段走向北北西,北起河东村,南至大坪子,长约33km,正断层性质明显,地貌上控制了东山高大山脉及多级山前大型冲、洪积扇的发育(图版I-a)。F1北段与F4北段共同控制了盆地北部的力角沉积中心,最大沉积厚度达500m^[8]。F1中段走向近南北,从大坪子至火烧坡长约10km,沿该断层东侧地层为二叠纪灰岩,灰岩中发育倾向西的断坎和断层崖(图版I-b)。F1南段走向转为北北西向,从火烧坡至新庄长近30km,断层东侧山地平均海拔明显下降,地势坡度变缓。从遥感卫星图

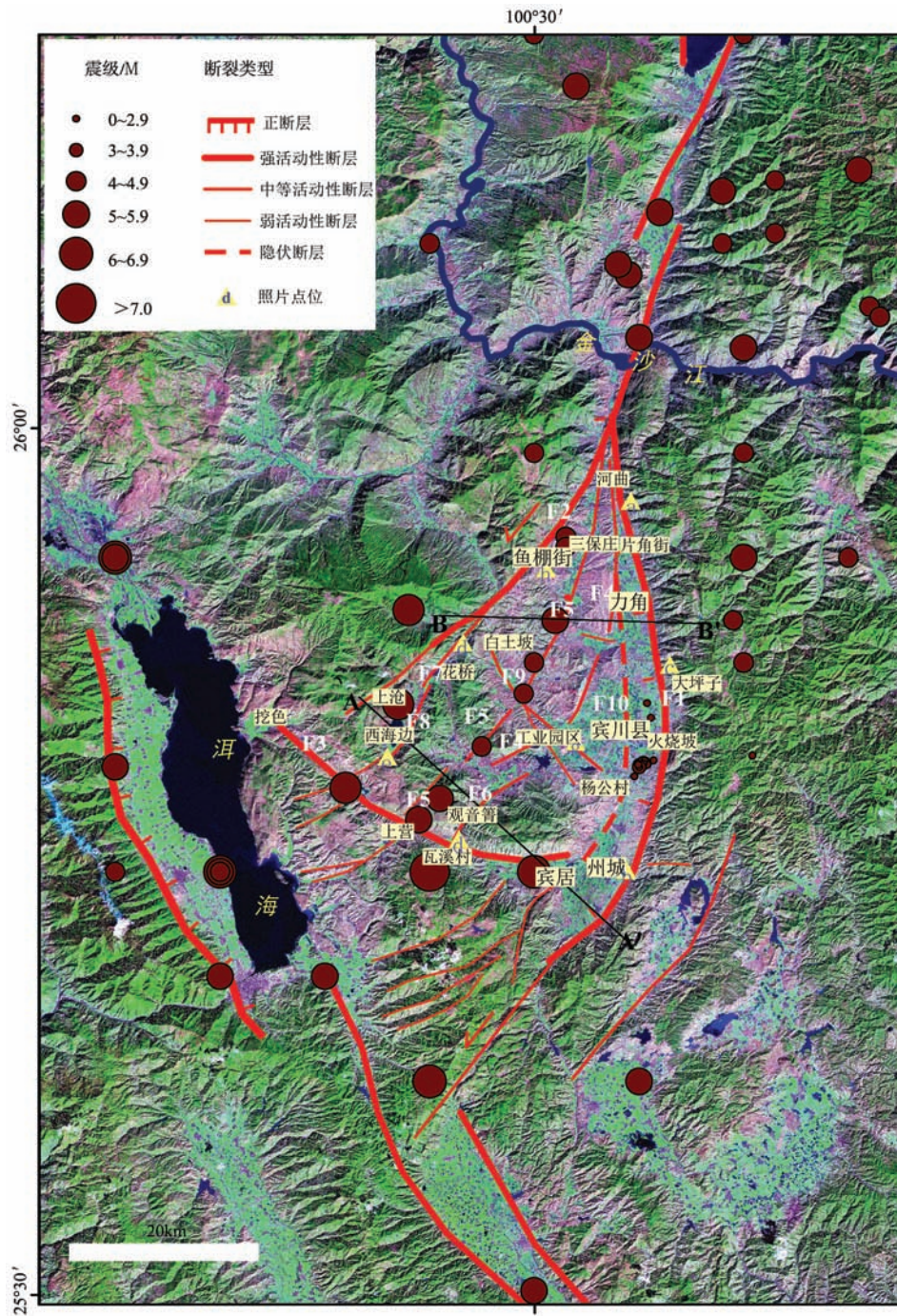


图4 宾川地区断层遥感解译

Fig. 4 Remote sensing interpretation of regional active faults in Binchuan area

(图4)上可看出,断层左旋错动水系和地质体的现象,表明该段断层转为北北东向后出现了左旋走滑作用,但仍以正断层作用为主,在南部州城地段出露大量更新世松毛坡组湖湘沉积物形成的土林中,可见多组正断层(图版 I -c),其中单条断层的最大垂直断距

达1.5m。并且宾川南部的州城是该区最大的沉积中心,最厚沉积达1000m(图2)。F1南段再向西南方向后与F11相连,一直延伸至弥渡盆地北部,并表明其典型的左旋走滑断层特征。因此,在区域上F10与F2共同构成该区平行的北东向左旋走滑断层组的一部分。

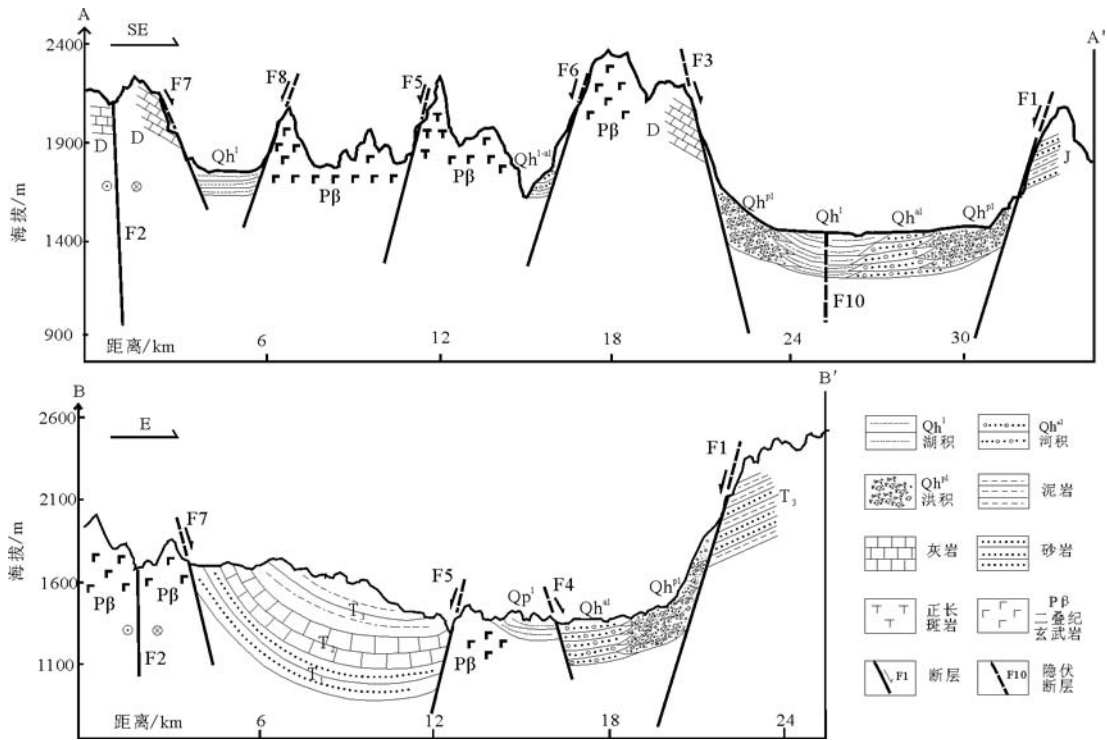


图5 宾川地区A—A'、B—B'地质剖面

Fig. 5 Geological cross section along A—A' line and B—B' line in Binchuan area

Qh—全新统; Qp—更新统; J—侏罗系;

T₁—下三叠系; T₂—中三叠系; T₃—上三叠系; P—二叠系; D—泥盆系

上沧—鱼棚断裂(F2):该断裂为程海断裂带南部一条活动显著的左旋走滑断裂,北段可见其错动金沙江达3.3km,该断层走向北东,限定了宾川盆地西北部边缘。该断裂全长约50km,断层切割地质体的行迹连续笔直,在鱼棚街附近可见左旋错动地质体的地貌表现(图6)。沿该断层还发育一系列线状小型湖泊,部分湖泊周围分布全新统湖相沉积。从遥感图可知,该断层西南部末端发育2条分支断层:①花桥断裂(F7)走向北东,以左旋走滑兼正断作用为主,控制了石马江水库、花桥水库等顺断层发育的线状盆地(图版 I -d)和白龙潭、三家村、下沧村等第四纪次级断陷盆地;②西海边断裂(F8)走向北东,南段向南东微凸,在西海边段为弧形的山前正断层,使之形成典型的由正断层控制发育的半月形断陷盆地(图版 I -e)。

片角—大营断裂(F4):这是区内一条活动性中等的次级走滑兼正断断裂,自盆地北段F1与F2交互处向南延伸,走向北北东—北东,整条断裂向东南微凸,在北段表现为向东倾的北北东向正断

层。F4北段可视为宾川盆地的西侧次级边界,并与F1近平行挟持南北狭长成纺锤状的力角沉积中心。北部的正断作用还使F4西侧的早更新世蛇山组隆起,其与晚第四纪沉积沿断层线截然而分。向南延伸,该断层走向逐渐向西偏转,可见沿断层发育的低山隆起。在张家营西侧出露的早更新世蛇山组中可见一系列倾向北东的正断层(图7),可作为判断该断层活动性质的标志层。至宾川中部,F4被F9隔断;在F9南侧,F4仍有断续显示,走向转为北东,切穿了大坪地一带的隆起,倾向南东。在宾川县城地区,F4与F9东南段、F1中段、F6北段共同作用,形成了宾川地区第四系沉积覆盖面积最大的宾川菱形沉降中心。

河曲—上营断裂(F5):走向北北东—北东,自北承启于F2。北段表现出明显倾向西的正断层成分,与东侧的F4一起夹持了中间所夹的蛇山组地块隆起。在三宝庄西侧山坡早更新统蛇山组的地层中发育了多组叠瓦状排列的小正断层,断面倾向北西,标志层最大错动距离0.7m。F5北段还控

图版 I Plate I



a.F1北部, 高山和巨大的洪积扇; b.F1南部, 州城东第四纪沉积物中的破裂; c.F1中部的灰岩断面; d.F7控制的断层湖;
e.西海边断陷盆地; f.观音箐灰岩断面上2个方向的擦痕; g.宾川工业园区第四纪沉积物中的叠瓦状正断层;
h.宾川盆地北部, 程海断裂在此分化为以正断为主的F1和以左旋走滑为主的F2

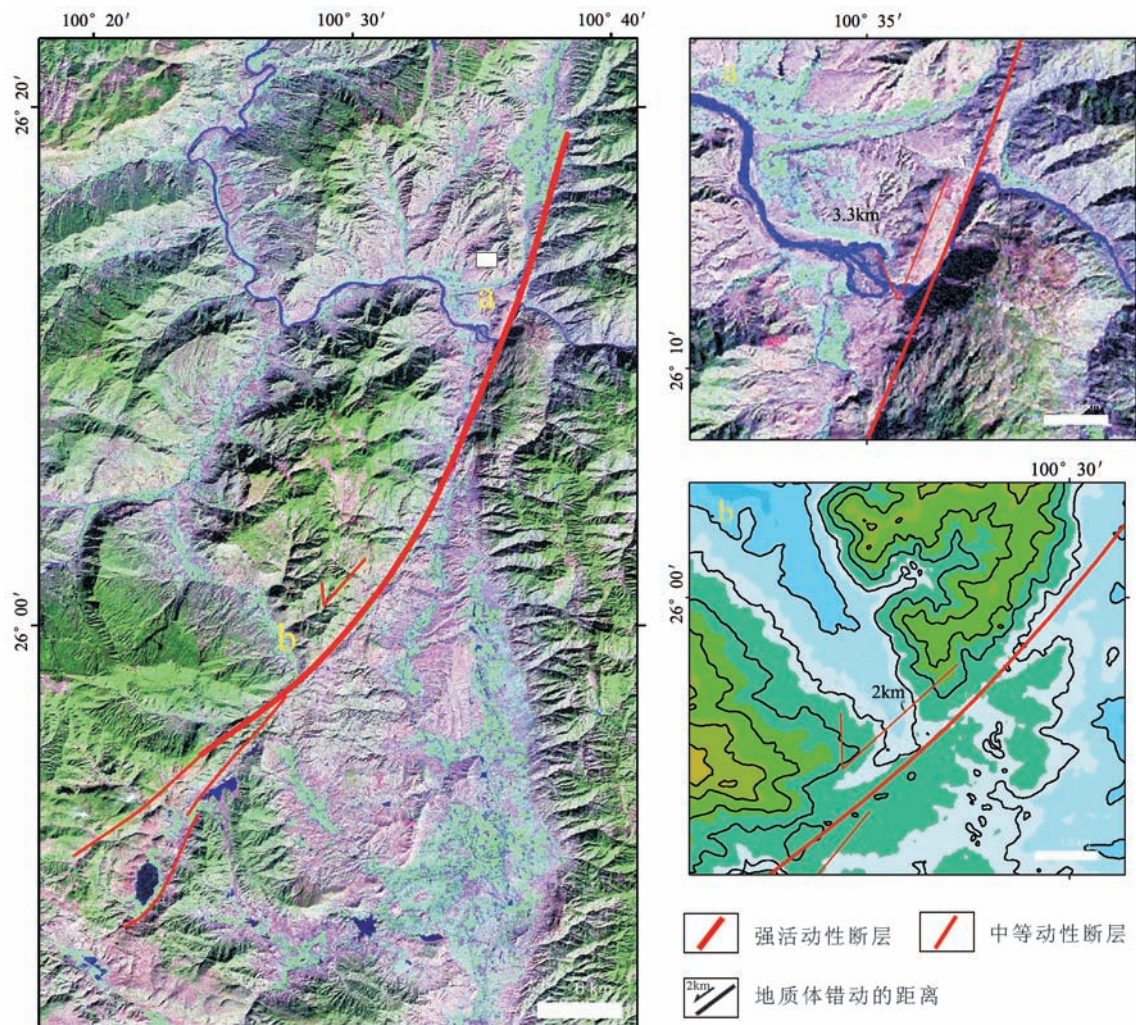


图6 F2左旋错动地质体图示

Fig. 6 Diagram illustrating left-lateral faulted geological body

a—F2整体图示;b—金沙江被左旋错动3.3km;c—鱼棚街附近的断头沟

制了河曲一带次级的第四纪沉积中心,沿中部南北向隆起的西麓发育。至盆地中南部,F5被F9切断,F5断层向南延伸后分散为多条次级断层,断层的活动迹象也逐步减弱,但仍依稀可见地质体被切割的行迹。

(2)北西向断裂

宾居断裂(F3):为北西西走向且向南微凸的弧形断裂。在遥感图上,该断层西北端起自挖色镇东部,顺山地沟谷延伸向西,切断了区内散开至此的东北向断裂。F3北侧地层主要为泥盆系灰岩,地表调查可见该断层活动形成的灰岩断面、断层崖、断层三角面等地质地貌特征。在灰岩断面中,可见断层角砾岩、断层泥等。在位于观音箐的灰岩采石场

发现带擦痕的断面(图版 I -f),断面倾向南西,断面上发育2组不同方向的擦痕。一组擦痕倾向与断面大致相同,倾角在35~50°之间,指示出F3倾向南西的正断作用;另一组擦痕倾向为北西西,倾伏角一般都小于20°。结合地质图判断,这组擦痕可能指示该断层在北东—南西向的伸展正断作用下还存在右旋走滑的活动性质。同时,在该组灰岩地层中发育的断层面在断面处发育一薄层壳状方解石结晶,这为在野外工作中寻找断层面提供了指引。结合地质图可知,宾居断裂应该是先存北西向老断裂的新活动,该断层东南端发育有三角形的断陷沉降中心。

白土坡—杨公村断裂(F9):是区内比较醒目的

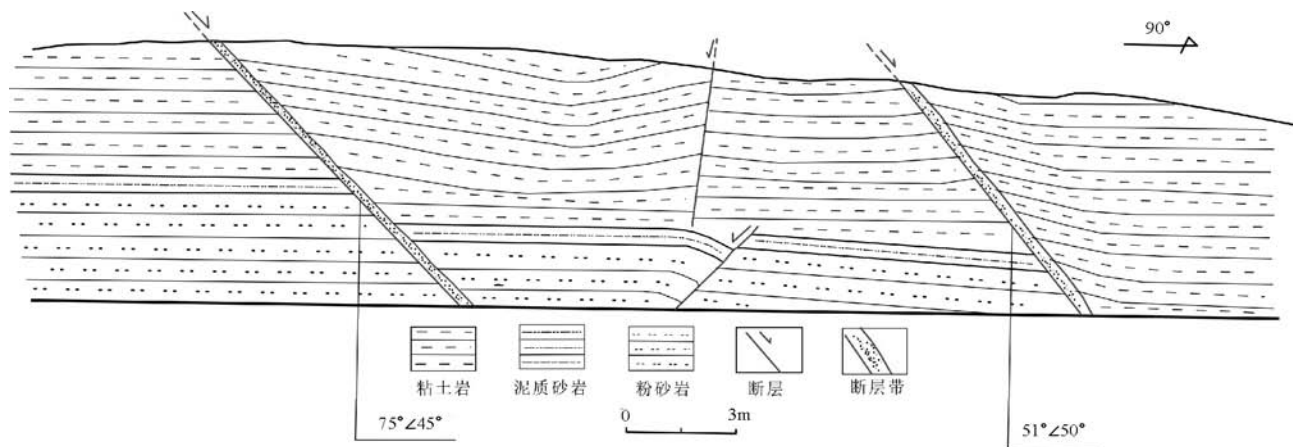


图7 张家营西侧早更新世地层中的断层剖面

Fig. 7 Fault section in the Early Pleistocene strata on the western side of Zhangjiaying

一条北西向正断层,北西端起自白土坡西南端至杨公村附近,长约19km,总体向南西微凸。沿该断层发育次级盆地,且第四纪等厚线长轴走向与断层走向平行,因此造成了宾川盆地中部向北西凸出的特殊第四系覆盖区形状,覆盖区地表分布时代为全新世的河流相堆积。在F9东南端的宾川工业园区挖开的剖面中,发现沿该断裂发育多条叠瓦状排列的正断层,断层面倾向西南(图版I-g,工业园区剖面)。断层错动的地层为紫红色、粉色泥质沉积物,应该为蛇山组湖相沉积物,这明该断层在第四纪期间具有显著的活动性。区域上,F9南北两侧断层的活动性也都发生了一定的改变,因此F9不仅反映了区域北东—南西向的伸展,更是宾川地区构造应力场发生转变的具体表现。在F9北部,区内北东向次级断裂走向近南北,以正断作用为主,活动性较强,如F4与F5均控制了山前沉积盆地。在F9以南,北北东向断裂开始转向北东,左旋走滑作用更为显著,正断层活动性逐步减弱,并且出现分支,上述断层活动性质的随走向发生变化表明,区内在近东西向伸展的背景下又叠加了北东向伸展。

2.2 断层活动性分析

综合宾川地区主要活动断裂的活动特征与历史地震活动性可知,该区第四纪以来活动性相对显著的断裂为3条边界断裂,其中又以宾川断裂(F1)和上沧—鱼棚断裂(F2)活动性最显著(图版I-h)。前者是程海断裂带南段的主干断层,资料表明^[18-19],2001年永胜6级地震的控震断裂带即F1向北相连

的宾川—金沙江断裂。F1的活动性由于南、北2段的运动性质及走向不同,活动性也稍有差异。北段走向北北西—近南北向,断层以正断作用为主,在地貌上显示出高大的断层三角面与多级洪积扇,但其控制的力角沉积中心为宾川盆地3个沉降中心中面积和沉积厚度最小的,并呈狭长纺锤状。至中部的宾川沉积中心虽然面积最大,但其是在F4及F9共同伸展下形成的,呈正菱形,最大沉积厚度也与力角沉积中心相同,为500m。转至南段,断层走向变为北北东—北东向,乃至与F2平行,正断作用减弱而左旋走滑作用逐渐突出,从DEM图清晰可见此段被左旋错动的水系。此段控制的州城沉积中心呈斜菱形,近似于拉分盆地的形状,沉积等厚线密集,最厚沉积1000m,即为区内最厚沉积。上沧—鱼棚断裂(F2)向北与金沙江—宾川左旋走滑断裂相连,在遥感图上走滑断层形成的笔直负地形十分显著,且沿F2分布多个狭长的小型断陷湖,而紧邻断层两侧的山地海拔相差不大(100m之内)。鸡足山东部山麓接沟西北侧,被左旋错动0.9km,但考虑到该断裂在始新世曾发生过大规模右旋走滑,并未直接将此数据带入F2的活动速率计算中,其左旋走滑量计算利用了宾川北部金沙江被错动的距离。构成宾川盆地南缘的挖色—宾居断裂(F3)是区内北西—北西西向断层中活动最强烈的,区内北东向断裂在向西南散开的过程中至此均被其隔断。F3的显著走滑正断性质反映了该区第四纪期间具有明显的北东—

表1 宾川地区主要活动断层及其特征
Table 1 Major secondary active faults in Binchuan area and their parameters

断裂带名称	编号	走向	倾向	长度/km	断层性质	第四纪以来走滑与垂直位移幅度				活动性分级 ^o
						最大量/km	平均活动速率/mm·a ⁻¹	走滑	垂直 [*]	
宾川断裂北段	F1—1	北北西	西	31~33	正断为主	/	1.7	/	0.95	B(中强)
宾川断裂南段	F1—2	北北东	西	44~45	正断兼具左旋走滑	/	1.5	/	0.75	B(中强)
上沧—鱼棚断裂	F2	北西	近直立	39~41	左旋走滑	3.3	—	1.6 ^{o)}	/	A(强)
挖色—宾居断裂	F3	北北西	西南	35~37	正断	/	1.1	/	0.55	B(中等)
西海边断裂	F8	北东	西北	11~14	正断	/	1.0	/	0.50	B(中等)
白土坡—杨公箐断裂	F9	北西	西南	23~24	正断	/	1.0	/	0.50	B(中等)
河曲—上营断裂	F5	北北东—北东	西	51~52	正断兼具左旋走滑	/	0.5	/	0.25	B(中等)
片角—大营断裂	F4	北北东—北东	东	44~47	正断	/	0.5	/	0.25	B(中等)
花桥断裂	F7	北东	东南	10~11	正断兼左旋走滑	/	0.2	/	0.1	B(中等)

注:表中的断层编号与图2对应;*指跨正断层两侧的最大盆山高差+盆底沉积物厚度和据此估算出的最小垂直运动速率值,以2.5Ma算作第四纪

南西向的伸展变形,并且对控制宾川盆地发育有重要作用。

区内活动性中等的断层主要包括以F4、F6、F8为代表的次级北北东—北东向弧形断裂,以及以F9为代表的部分北西—北北西向断裂。其中片角—大营断裂(F4)在北端走向北北西,控制了其西侧的蛇山组隆起也呈北北西向微弧状,并沿断层可见线性三角面地貌。向西南被F9隔断后,弧形转向更明显且走向由北北西向变为北西向,但其活动性并未减弱。在大营附近的观音箐,F4穿过泥盆纪灰岩,在此处出露的灰岩断面上可见2个方向的擦痕,反映了F4在此段正断兼具走滑的性质。当F4与F3在瓦溪村一带交会时,形成了宾川地区另一较大的第四纪沉降中心。河曲—上营断裂(F5)位于F4西侧,走向与F4近平行,F5北段表现为倾向西的正断层,造成局部地势高差突变(剖面)约200m,并由此与F4共同夹持其间的蛇山组形成隆起。向南至沙湾以南,F5未能再形成明显的正断地貌,但其断层行迹仍然比较显著,延续性较清晰。历史地震资料显示,沿F5发育多次M5.0以下地震活动,表明该断层现今仍在活动。西海边断裂(F8)和花桥断裂(F7)为F2的分支断层,沿F7发育的明显的断层三角面和花桥水库处沿断层平直的盆山边界均反映了其第四纪以来的活动性。F8中段为一弧形正断层,控

制了西海边月牙形盆地的发育,由跨正断层两侧的最大盆山高差估算出其2.5Ma以来的最大垂直活动速率为1.2mm/a。另一条北西向断裂州城西断裂(F6)因穿越沉积区,在地表并无显著的断层活动证据,但在遥感图上可见其线性行迹与区内构造体系相拟合。同时,州城地区作为宾川最大的沉积中心,形状呈类似拉分盆地的斜菱形,其东侧的F1南段是一条正断兼具左旋走滑的断层,因此,其西侧也应存在一条平行的左旋走滑断层共同拉分。笔者认为,该断裂可能是F4在力角附近向正南方向延伸的一条分支断裂。该断裂穿过宾川城区向南至州城,走向逐渐转为北北东向。由于第四系沉积物在宾川城区较厚,暂无明显的线性标志,但至州城西部可见断层成为限制隆起的边界,向南西方向继续延伸可见该断层较笔直的线性行迹。

3 宾川帚状活动构造体系

3.1 几何学与运动学特征

前已述及宾川地区主要活动断裂的特征,综合宾川地区主要活动断裂的空间展布特征不难看出,其整体表现出非常典型的帚状形态,断层的运动性质也表现出明显的张扭性活动特点。因此,根据宏观几何形态,笔者将该区的活动构造格局归结为宾川帚状活动构造体系。如图2所示,F1和F2自宾川

北部向南分散开来,F1为总体近南北向的正断兼左旋走滑断层,F2为北东向左旋走滑断层,F3为北西西向右旋兼具正断作用的断层,三者限定了宾川帚状构造体系的基本框架。该区内的北北东—北东向次级断裂,以F4、F5为代表,起于北部F1、F2会聚处,并向西南分散开来,其行迹呈向南东微凸的弧形,在南部被F3隔断后仍可向区域外延伸,且都为走向北东并近于平行分布,空间上呈尾端向北西微翘的帚状。区域上,它们属于宾川张扭性帚状活动构造体系的内部次级构造。区内北西—北西西向断裂以F3、F9为代表,呈向西南微凸的弧形,它们在北东—南西向伸展作用下隔断了区内北东向断层的连续性,但均在边界主控断裂F1、F2所限制的区域。同时,随着空间上逐渐远离北端会聚区,北西—北西西向断层的活动性显示出不断增强的趋势,且北东—南西伸展作用更为明显。总体而言,这组北西向断层构成了宾川帚状构造中的横向构造。

对宾川地区帚状构造的几何格局的设定,关键在于区域内以F4、F5为代表的北东—北北东向断层的几何特征的划归。前人^[1-2,4-6,8-9]的主流观点认为,宾川盆地内的北东向断层是程海断裂带南段左行排列的左旋走滑断层,自宾川断裂F1以东发育并与F1交会后穿入盆地内部,虽然从遥感地质图上能依稀找到可以互相连接的线性构造,但实际存在3个问题:①若北东向断层为交切F1再延伸至盆地内的断层,那么在其与F1交会的部位应该使F1产生错断或地貌上的突变。实际上,F1是一条延续性很好的断层,虽然南、北2段活动性质有局部改变,但并没有显示出因为其他断层的交切而使之突变的迹象,且F1为该区规模最大、活动性非常显著的一条断层,周围的断层均被其限定而不是反之;②在大觉庄处,即F1中北段以东,可见一较显著的北东向线性构造,若向盆地内延伸可以与F6在走向上相连接。但从地质图上观察可知,该断层为一条由南向北的逆掩断层,断层下盘向上逆冲从而剥蚀了下侏罗系,使其只在上盘出露,该断层在遭遇F1时即被限定截断,不应该再延伸至盆地内;③宾川地区复杂的地貌和沉积格局并不能单纯地用F1和左阶斜列的左旋走滑断层控制来解释,因为宾川沉积中心的沉积地貌并未显示出受一斜穿沉积区的北东走向、倾向西的断层控制的形态特征。从整个宾川地

区地形地貌特征看,宾川盆地和宾川地区F1、F2所围限区内的一些次级沉降中心的沉积主控断层都是北北东—北东向的正断层。另一方面,区内北西—北北西向的断层隔断了区内北东向的断层系,使其走向和活动性发生改变,以F9为例,它的存在明显使F4和F5的几何运动学特征发生了改变。区域上,F9指示了宾川地区内存在北东—南西向伸展,由此控制了白土坡—杨公村一带的第四纪沉积中心。在F9以北,受东西两侧F1、F2的限制,区内构造应力场以东西向伸展为主,其中F4和F5走向北北东,正断作用明显。穿过F9向南后,二者走向都向西偏转为北东。与此同时,F1在南段的走向也转为北东向,且左旋走滑作用明显增强。而F3作为边界断裂的显著特征表现在它使得区内的F4、F5等北东向断层在穿过它后活动性明显减弱。结合2组断层的几何运动学特征分析,北西—北北西向断层的发育应该早于北东向断层系。由此可知,宾川帚状活动构造体系的几何运动学特征,即以北东—北北东向弧形断层系为主体格架,控制了盆地沉积和地形地貌的发育,北西—北北西向断层在区内限制了北东向断层系的连续性,两者共同构成一个互相影响的构造体系。

3.2 成因机制分析

对宾川帚状活动构造的成因机制分析,实则与滇西北裂陷区运动模式的理解紧密相关^[26-31]。综合而言,宾川帚状活动构造体系存在以下3个特点:①北北东—北东向断层的大量发育,构成区域地貌的主控断层,并呈现出弧形展布的特点;②北西—北北西向断层在区内隔断或限制了北北东—北东向断层系的连续性,并指示区域东西向伸展与北东—南西向伸展共存;③第四纪以来该区伸展走滑作用显著增强。在谈及这些特点所代表的意义时,还应结合其所处的活动构造部位。

首先,从前人^[1,4-8,10-11,16]总结可知,滇西北、滇中、滇西南等区域普遍存在近东西向的伸展。虽然滇中地区的东西向伸展可能与小江断裂带的左旋走滑转化作用有关,但目前关于该区普遍出现近东西向伸展变形的机制尚不清楚,可能与缅甸弧俯冲带的向西后撤或下地壳物质从青藏高原挤出后的向外扩散有关^[11,26,28]。其次,弧形断层的出现应该和块体旋转运动有关,宾川帚状活动构造体系并不像传统意义的帚状构造那样绕一个砥柱旋转,而应该是

在青藏高原东南部整体的顺时针旋转^[29-31]作用下,滇西北裂陷带中的微断块旋转而造成的。同时,川滇块体围绕东喜马拉雅构造结发生整体顺时针旋转的运动学背景,非常有利于弧形左旋剪切变形带的形成^[11]。北东—南西向拉张很可能是块体旋转和左旋拉张共同作用的结果。综上推断,笔者认为,宾川地区帚状活动构造体系的形成,与滇西北裂陷带的左旋拉扭运动模式相符合。

如图8-c所示,当中甸断裂带的运动性质表现为左行走滑时,其在区域上应该可与南侧的龙蟠—乔后断裂及同为左旋走滑的南汀河断裂带共同构成呈左阶斜列的一个整体向东凸的弧形左旋剪切变形带,而滇西北裂陷带位于其拉分阶区。这样可以比较合理地解释宾川帚状活动构造体系形成的原因。与前人^[1,4-6,9]提出的宾川地区右阶左旋断层主控模式(图8-a)相比,笔者提出宾川地区帚状活动构造主控模型(图8-b),在区域近东西向伸展的背景下,近南北向的断层正断层活动性将比较显著,如F1北段和F4、F5北段,它们是总体近南北向展布的盆地发育的主控因素。在近南北向的断层

发育延伸并控制盆地沉积的过程中,位于滇西北裂陷带东南部的宾川地区,又受其西北部微地块顺时针旋转影响,先存的近南北向断裂在正断作用继续发育的过程中,又表现出明显的左旋走滑作用,并因旋转导致走向变为北东的微弧形。在此过程中,区内北西向断层的隔断或限制作用导致区内表现为不同主应力场方向的次级块体,并使得北北东向断裂走向及活动性以北西向断裂为分界,体现出明显的差异性。同时,宾川盆地北部蛇山组的南北向隆起与控制其发育的F4、F5走向一致,从北到南也由南北向呈弧形向北东向转变,说明区内南北向的断层可能最早在中更新世时便开始因顺时针旋转的作用而转向,并且之后正断层控制的沉积作用和断层本身的瞬时旋转可能同时进行。另一方面,左旋走滑作用又与旋转作用一起,形成了区内独特的构造应力模式:在宾川地区北部,旋转作用不仅使F2左旋走滑作用加强,并对区域产生了向西拉张的分量,而北部区域本身又属于2条断层交会区,故该区以南北向断层为主控构造,在地貌上表现为地堑和地台。当F2继续

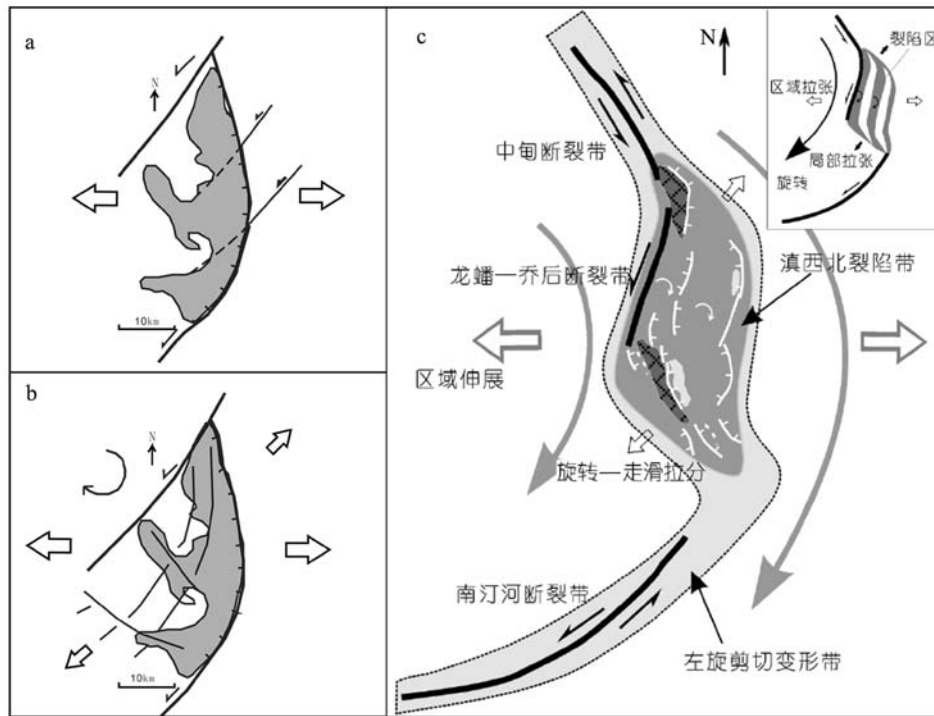


图8 宾川盆地成因简图及滇西北裂陷区运动模式

Fig. 8 Simplified genetic diagram of Binchuan basin tectonic movement model of the Northwestern Yunnan Rift Zone

a—右阶左旋断层主控模式^[4]; b—帚状活动构造模式; c—滇西北裂陷区运动模式^[11]

向西南, F1 和 F2 之间的距离逐步增大, F1 走向也转为北东, 宾川南部在地貌上体现为发育一系列平行的北东向断裂及受北东向断层控制的次级沉积中心。

4 活动构造体系与强震活动

4.1 程海断裂带的历史强震

滇西北地区新构造活动显著, 是强震活动强烈而频繁的地区^[32-34], 其中程海断裂带历史以来也发生过多次强震(图 9), 自公元 1515 年永胜 7.5 级大地震后, 共记载 $M \geq 5.0$ 地震 8 次(表 2)。永胜 7.5 级地震是程海断裂带历史记录以来发生过的最大震级的地震, 发震断裂是程海—宾川断裂带的北段。该断裂带位于滇西北上地幔隆起的边缘, 深部构造属滇西幔隆与滇中幔凹的过渡带, 也是布格重力正、负异常和航磁正、负异常的交接地带^[8,30]。该断裂带晚更新世以来的拉张活动非常显著, 北段最大垂直位移速率可达 6mm/a , 现今地壳的垂直形变速率可达 7mm/a ^[8]。1515 年大地震的震中位于金官盆地东缘, 新构造上属于金官盆地东北缘北西向断裂和程海盆地东缘南北向断裂的交会部位, 是两头下沉(金官和程海盆地)、中间隆起(官丫口隆起)的枢纽部位。前人调查^[8,19]认为, 永胜地震发生后, 沿程海—宾川断裂带的 4 条次级断裂产生了长约 42km 的地震形变带。形变带表现为地震断层、断层陡坎、地裂缝、断崖、山体位错、滑坡、山崩、地震楔等。2001 年 10 月 27 日永胜 6.0 级地震是程海断裂带近 200 年来最大的一次地震, 其发震断层位于程海断裂金沙江段^[18]。

从历史地震资料和前人研究总结来看, 程海断裂带的历史地震活动具有以下几个显著特点。

(1) 程海断裂带小震频发, 强震活动频度相对较低(约近 200 年来一次 6 级以上地震), 但从较长时间尺度看是不断发生的, 说明该断裂带在持续活动。

(2) 由于地质环境的差异和区域构造应力场的复杂性, 程海断裂带的活动性有较明显的分段性。以永胜—宾川断裂为例, 前人^[8,32]依据断裂活动方式和速率对其进行了初步划分: 北段以倾滑为主, 断裂运动速率达 6mm/a , 中段以走滑(左旋)为主, 其运动速率达 $3\sim 4\text{mm/a}$, 南段以拉张为主, 走滑为次, 走滑速率 $2\sim 3\text{mm/a}$; 北段历史上发生过 7.5 级地震, 而中、南段仅为 5.1~6.3 级地震。根据地震活动强度与活动断层活动强度的正相关性, 前人自北向南初步划分出永胜 8.0 级潜在震源区、金江 7.5 级潜在震源区和宾川 7.0 级潜在震源区^[33]。

(3) 地震活动除跟活动断裂的活动强度有关外, 也与活动断裂的运动方式和所处的构造部位有关^[26,33-38], 这也是划分程海断裂不同段落的依据之一。纵观程海断裂带的历史地震记录, 强震大多发生在构造应力集中的走滑断裂段。如 2001 年永胜 6.0 级地震, 发震前金沙江断层的垂直位错速率和垂直形变速率都极低, 反映了该段处于“粘紧”状态, 沟通不畅, 阻碍了程海断裂的左旋走滑活动^[19], 导致该区的应力集中。

(4) 程海断裂带是一条发育历史较长的块体分界断裂带, 现今存在的活动断裂部分是老断层的新活动, 部分是在区域应力场的变化下产生的新断

表 2 程海断裂带 $M \geq 5.0$ 地震简目^[10,22]

Table 2 The Principal Contents of $M_s \geq 5.0$ earthquakes along the Chenghaifault

序号	地震时间	震中位置			震级 /Ms	震中烈度 /°	震源深度 /km	相关断裂
		北纬/°	东经/°	参考地名				
1	1515.06.27	26.7	100.7	永胜红石崖	7.5	X		永胜断裂
2	1623.05.04	25.5	100.5	祥云县西北 6.3km 处	6.0	VIII		州城—红岩断裂
3	1652.07.13	25.4	100.5	弥渡县城直力乡	7.0	IX		弥渡盆地主边界断裂
4	1803.02.02	26.7	100.5	宾川、祥云间	$6_{1.4}$	VIII		苏家庄—山岗辅断裂
5	1959.03.30	26.0	100.7	宾川东北	$5_{1.2}$			宾川断裂力角段
6	1959.04.26	26.2	100.7	永胜、宾川间	$5_{3.4}$			永胜—宾川断裂
7	1992.12.18	26.3	100.6	永胜期纳	5.4	VI	15	永胜—金沙江断裂
8	1992.12.12	26.4	100.6	永胜清水	5.1	VI	20	永胜—宾川断裂
9	2001.10.27	26.2	100.6	永胜	6.0	VII	15	永胜—金沙江断裂

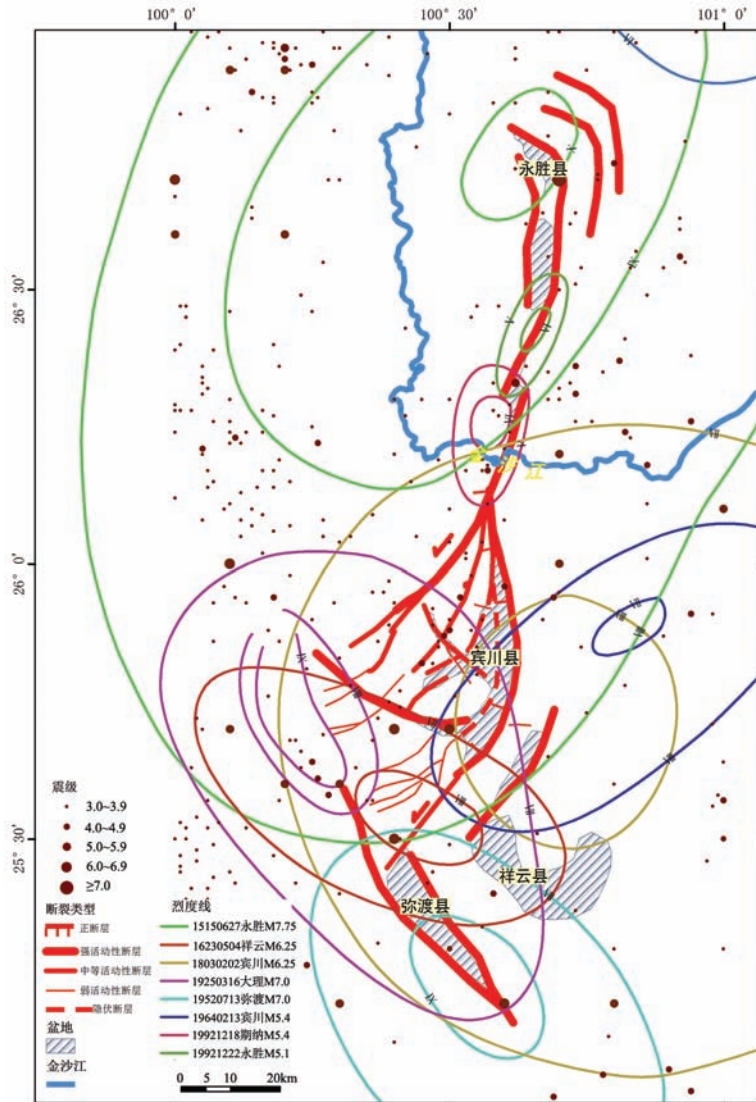


图9 程海断裂 $M_s \geq 6.0$ 地震分布(1500—2001)
Fig. 9 Epicentral distribution of $M_s \geq 6.0$ earthquakes
along the Chenghai fault (A.D. 1500—2001)

层。先存断裂的活动及其与强震活动的密切关系,已被普遍认同。但是,也有许多地震与先存断裂的活动无关,它们所产生的地表破裂带偏离,甚至明显切割先存断层的地表迹线,具有新生性的构造特征。不同的地震破裂机制可能产生不同的地震类型,对地震预测研究具有重要意义^[38-42]。为了解读活动断裂的“先存”与“新生”,除了科学依据测年数据,还要结合区域背景对区内的活动断裂进行系统研究,从活动构造体系角度解读其主次断裂、运动方式、活动时间、活动性强弱等,可以帮助判断该区未来潜在的地震危险性^[43-44]。

4.2 宾川地区主要活动断裂的未来强震危险性问题

国家重点基础研究项目“大陆强震机理与预测”曾明确提出大陆强震发生机理的活动地块成因假设,认为活动地块的运动形状、地块之间的相互作用、边界断裂的深浅耦合关系是造成板内强震的重要原因^[45]。同时,人们已经意识到强震的发生不是完全随机的,而是有一定的规律。Sieh最早提出了特征地震的概念,即某一特定震级的强震能在断层的某一段落反复发生,且其位移有原地重复的特点。需要注意的是,实际上并不是所有的强震都由一条单独的断层控制,活动断层常以一个体系出现,不仅有一条或若干条主断层,而且还有一系列的分支断层或交叉断层,主断层的破裂习性是包容在整个体系当中的。本文根据程海断裂带地震活动的特点,在分析宾川地区主要活动断裂的未来强震危险性时,主要从活动构造体系角度,通过分析其主干断裂的活动性强弱、运动模式和所处的构造区位,并结合历史地震资料作出判断。

整体看,宾川地区活动性最强的断裂是东侧边界的宾川断裂F1,西侧边界的上沧—鱼棚断裂F2、F3的活动性稍次于后。F1以正断作用为主,在区内的覆盖影响范围最大,力角、宾川、州城等多个县镇中心都直接位于F1的控制范围内,其活动性相对最强,但历史上却一直属于空震区,若发生城市直下型强震则会带来严重的危害。由于宾川帚状活动构造体系在青藏高原东南缘物质挤出作用下使微地块顺时针旋转,F1与体系内其他断层类似,都在走向偏转至北东的过程中加强了左旋走滑运动,使得F1南部倾滑,盆地裂隙更深,其构造运动模式也更加复杂,对其未来强震危险性的评价不能以单一的模式来论证。F1南部末端的苏家庄—山岗辅段与F1北部控制了2001年永胜6.0级地震的金沙江断裂对比可知,它们在新构造活动、地形地貌、地壳形变、地震活动等方面都较为相似,

该段又是 $M \geq 6.0$ 地震的空段,从历史地震分布来看,该段尚未完成破裂过程。

随着2010年永胜6.0级地震的发生,金沙江段因积累的应变能量得以释放而贯通。而苏家庄—山岗辅段可能会成为程海断裂左旋走滑活动的构造障碍段,有利于应力的集中、积累。因此,该段极有可能成为未来 $M \geq 6.0$ 地震的危险地段。F2是区内另一条活动性较强的断裂,且以左旋走滑运动为主,在区域左旋走滑运动普遍加强的背景下,F2在晚第四纪期间有较明显的活动,从历史地震资料也可看出,F2所影响的区域近期地震活动相对频繁,尤其在南部末端的分叉终止部位,可加强对该区的监测。F3的活动性虽然稍弱于前两者,但作为宾川帚状构造体系的南部边界,F3与区内多条北东向断裂相交切,因此与其他断层的交会部位也是应力较易集中的部位,即是容易发生地震活动的区域,建议进一步加强或重视预防地震的相关工作。

5 结论

(1)宾川地区由东部近南北向的正断层宾川断裂(F1),西侧北东向的左旋走滑断层(F2)和南部的断裂(F3)共同构成了活动断层的主体部分,并控制了宾川走滑拉张—裂陷复合型盆地的发育。在三者所围限的区域内,以发育北北东—北东向微弧形断裂为主,这些断裂多于北部汇聚端起向西南散开,并在南端统一向北西翘起,它们与F1、F2一同构成了宾川帚状构造体系。该区域内另有一组北西—北西向断裂隔断或限制了次级北东向断裂,并以右旋走滑兼正断活动为主;反映了宾川地区存在北东—南西向的伸展,并且是调节区内北东向走滑断层运动方式的重要部分。

(2)宾川地区帚状活动构造体系反映了第四纪以来区域活动构造的3个特点:①区域东西向伸展与北东—南西向伸展共存;②北东向断层的大量发育及其呈现出的弧形展布特点;③第四纪期间该区的左旋拉张作用显著增强。

(3)宾川帚状活动构造体系的形成是在区域近东西向伸展和微地块顺时针旋转的共同作用下所形成的,反映了滇西北裂陷带在青藏高原东南部川滇地块整体顺时针旋转背景下的左旋张扭运动方式。

(4)根据历史地震及活动构造体系的特征分析,宾川断裂F1断面直接位于城镇下方,活动性最强,是该区最突出的潜在强震危险区段,且该区人口密度大,建议应进一步加强地震地质研究和防震减灾工作。

参考文献

- [1]唐渊,刘俊来.川滇西部上新世以来构造地貌:断裂控制的盆地发育及对于远程陆内构造过程的约束[J].岩石学报,2010,26(6):1925-1938.
- [2]魏顺民,向宏发,计凤桔.红河断裂带第四纪右旋走滑与尾端拉张转换关系研究[J].地震地质,1996,18(4):301-309.
- [3]李鼎容,黄兴根,王安德,等.滇西北第四系的划分[J].地质论评,1987,33:105-114.
- [4]向宏发,韩竹军,魏顺民,等.红河断裂带大型右旋走滑运动与伴生构造地貌变形[J].地震地质,2004,26(4):597-610.
- [5]魏顺民,李样根,向宏发,等.云南红河走滑断裂尾端拉张区的运动学模式[C]//现代地壳运动研究(5).北京:地震出版社,1991:1-12.
- [6]吴大宁,邓起东.滇西北裂陷区的基本特征及其形成机制[C]//现代地壳运动研究(1).北京:地震出版社,1985:118-132.
- [7]向宏发,魏顺民,徐锡伟,等.川滇南部地区活动地块划分与现今运动特征初析[J].地震地质,2000,22(3):253-264.
- [8]国家地震局地质研究所,云南省地震局.滇西北地区活动断裂[M].北京:地震出版社,1990.
- [9]李光荣,金德山.程海断裂带晚近期活动性研究[J].云南地质,1990,9(1):1-23.
- [10]Fan C, Wang G, Wang S F. Structural Interpretation of Extensional Deformation along the Dali Fault System, Southeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. International Geology Review, 2006, 48(4): 287-310.
- [11]吴中海,张永双,胡道功,等.滇西北哈巴—玉龙雪山东麓断裂的晚第四纪正断层作用及其动力学机制探讨[J].中国科学(D辑),2008,38:1361-1375.
- [12]王晋南,皇甫岗.程海断裂尾端侧向迁移与地震的相关性[J].地震研究,1992,2:180-185.
- [13]俞贤贵,王彬,毛燕,等.程海断裂带断层泥中石英碎砾表面SEM特征及断层活动状态的分析[J].中国地震,2004,20:347-352.
- [14]Allen C R, Gillespie A R, Han Y, et al. Red River and associated faults, Yunnan Province, China: quaternary geology, slip rates, and seismic hazard[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1984, 95: 686-700.
- [15]Molnar P, Lyon—Caen H. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan plateau and its margins[J]. Geophys. J. Intl., 1989, 99: 123-153.
- [16]徐锡伟,闻学泽,郑荣章,等.川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J].中国科学(D辑),2003,33:151-162.
- [17]吴中海,赵希涛,范桃园,等.泛亚铁路滇西大理至瑞丽沿线主要活动断裂与地震地质特征[J].地质通报,2012,31(2/3):191-217.

- [18]周光全,王晋南,王绍晋,等.永胜6.0级地震的地质构造背景及发震构造[J].地震研究,2002,25:356-361.
- [19]俞维贤,张建国,周光全.2001年永胜6级地震的地表破裂与程海断裂[J].地震研究,2005,28:125-128.
- [20]郑文俊,郭华,袁道阳,等.遥感影像信息在活动断裂研究中的应用[J].高原地震,2002,14:15-21.
- [21]黄小巾,吴中海,李家存.滇西北裂陷带的构造地貌特征与第四纪构造活动性[J].地质通报,2014,33(4):578-593.
- [22]李玉森.活动断层的常用研究方法[C]//地壳构造与地壳应力文集.北京:地震出版社,2006:175-181.
- [23]邹谨敏,邵顺妹.活动断裂的遥感影像研究[J].环境遥感,1995,3:182-187.
- [24]古宾,松田时彦.活断层研究[M].北京:地震出版社,1983.
- [25]杨春景,李有利.活动构造地貌学[M].北京:北京大学出版社,2011.
- [26]高维明,杨一冲,刘杰,等.活动断裂体系地震活动性的确定及其重要意义[C]//活动断裂研究(4),1995:175-183.
- [27]李仕虎,黄宝春,朱日祥.青藏高原东南缘构造旋转的古地磁学证据[J].地球物理学报,2012,(1):82-100.
- [28]Allen C R, Qian H, Wen X, et al. Field study of a highly active fault zone: The Xian-shuihe fault of southwestern China[J]. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103: 178-1199
- [29]程佳,徐锡伟,甘卫军,等.青藏高原东南缘地震活动与地壳运动所反映的块体特征及其动力来源[J].地球物理学报,2012,4:1198-1212.
- [30]马宏杰,张世涛,冯明刚,等.滇西弥渡盆地中晚更新世断陷特征及环境演化[J].第四纪研究,2013,33:471-478.
- [31]胥颐,杨晓涛,刘建华.云南地区地壳速度结构的层析成像研究[J].地球物理学报,2013,56:1904-1914.
- [32]李祥根.中国新构造运动概论[M].北京:地震出版社,2003.
- [33]周庆,魏顺民,向宏发.滇西北地区潜在震源区的划分原则和方法[J].地震地质,2004,(26):761-771
- [34]王晋南,王华林.云南活动性断裂带的结构变异与孕震体构造的空间关系[J].地震研究,1998,21:268-276.
- [35]苏有锦,秦嘉政.川滇地区强地震活动与区域新构造运动的关系[J].中国地震,2001,3:24-34.
- [36]李海兵,司家亮,潘家伟,等.活动断裂的变形特征及其大地震复发周期的估算[J].地质通报,2008,27:1968-1991.
- [37]山崎晴雄.地震与活动断层[M].北京:地质出版社,1985.
- [38]程万正.安宁河—则木河—小江带的强震构造环境和运动速率[J].四川地震,2003,2:7-11.
- [39]张俊昌,姚孝执,吴伯黔.云南主要构造体系与强震分布规律的初步分析[J].地震研究,1980,1:47-57.
- [40]张永庆,谢富仁.活动断裂地震危险性的研究现状和展望[J].震灾防御技术,2007,1:68,68-78.
- [41]吴中海,周春景,冯卉,等.青海玉树地区活动断裂与地震[J].地质通报,2014,33(4):419-469.
- [42]吴中海,张岳桥,胡道功.新构造、活动构造与地震地质[J].地质通报,2014,33(4):391-401.
- [43]邓起东.城市活动断裂探测和地震危险性评价问题[J].地震地质,2002,4:134-138.
- [44]邓起东,闻学泽.活动构造研究—历史—进展与建议[J].地震地质,2008,1:6-35.
- [45]张国民,张培震.大陆强震机理与预测研究综述[J].中国基础科学,2004,(3):9-16.
- ①云南省地质局第一区域地质测量队.大理幅(G-47-XXIII)地质图.1973.