

金文正. 云南省洱源县断裂特征及其对地热的控制作用[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 57-71.

DOI: 10.11932/karst20240105

云南省洱源县断裂特征及其对地热的控制作用

金文正^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 非常规天然气能源地质评价与
开发工程北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 地热资源在未来的能源结构中具有重要地位, 为分析云南省洱源县地热资源分布的构造控制因素, 文章通过野外地质调查对县域内多条重点断裂进行了野外露头观测和分析, 对不同断裂类型两盘受力情况进行计算和分析, 并通过三维立体图形对县域内断裂与地热分布进行了展示, 结果表明: 洱源县域内发育多条大型断裂带, 走向以NW—SE向为主, 具有多期构造活动, 具“压扭性”或“张扭性”特征, 并被后期张性断层切割改造; 正断层下盘及逆断层上盘具有更大的正应力值和剪应力值, 多发育牵引背斜, 更容易发育裂缝; 断裂构造对温泉的控制作用明显, 其中大型走滑断裂可沟通深部热源, 温泉热水可沿后期张性断裂发生地下径流, 然后可在断裂附近的裂缝发育带、断裂交汇处以及断层尖灭处聚集区, 在海拔及第四系等多因素综合影响下, 热水出露地表形成温泉。

关键词: 断裂; 裂缝; 应力; 地热; 洱源

创新点: 在野外地质调查和数学理论计算基础上, 分析了洱源县现今断裂构造及其裂缝发育及分布规律, 探讨了不同类型断裂对地热空间分布的控制作用, 认为大型走滑断裂可沟通深部热源, 热水在裂缝发育带、断裂交汇处和断层尖灭处聚集。

中图分类号: P314 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)01-0057-15

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

当前关于“碳达峰”和“碳中和”的研究已经成为国际社会最为关注的热点之一, 地热资源作为一种绿色清洁能源, 属于新能源和可再生资源, 我国多个地区业已开展了地热资源的普查和开发利用工作, 并取得了很好的经济效益和社会效益, 比如藏南地区、滇西地区和东北地区等, 地热资源的开发具有重要的经济价值。我国的青藏—喜马拉雅地区是目前已知地热活动最为集中的地区, 大地热流值普遍达到高热异常($90\sim 150\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$, 最高可达 $300\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$)^[1-2], 地热的分布与区域性大型断裂带关系密切, 比如区域性走

滑断裂是扎仓热田重要的控热和导热断裂, 同时也是共和盆地东部重要的控热边界^[3-5], 此外鲜水河断裂周边也分布有众多温泉^[6]。

位于青藏高原东南部的云南省由于其独特的构造位置, 区内地热资源丰富, 如红河深大断裂, 其形成时代早(始成于震旦纪), 深度大, 垂直断距数千米, 活动性强^[7], 长期作为岩浆活动的通道, 附近地表温泉分布密集。综合来看, 滇西地区处于构造体系复合部位, 主干断裂活动较为强烈, 给地下热水的形成和流动提供了有利的条件^[8-10], 相对其它地区而言, 具有数量较多的断裂带和温热带, 其中洱源盆地是重点地区之一, 其内部及周缘分布有大量温(热)泉,

基金项目: 云南省科技计划项目“云南省中深层地热能开发利用关键技术研究”(202302AF080001); 国家自然科学基金项目“龙门山冲断带构造分段变形机制研究”(41002072)

作者简介: 金文正(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事能源地质和盆地分析方向研究。E-mail: jwz@cugb.edu.cn。

收稿日期: 2023-01-01

相对集中分布在洱源牛街—三营区、洱源—炼城区、下山口—西湖区等地区^[11]。

已有众多研究表明,断裂与温泉分布关系密切,包括以下几个方面:①断裂平面展布与多个温泉平面展布的关系,如云南省保山市区串珠状温泉均沿该支断层沿线分布^[12];②断层性质与温泉形成机制之间的关系,比如早期的韧性挤压、走滑变形体系可以成为温泉的热储或热源,而晚期高角度脆性正断层为水热活动的主要径流通道^[13-15];③断层要素与温泉分布的关系,比如某些地区的温泉不仅大体上沿活动性断裂呈串珠状分布,并基本上分布于断裂的上盘或者下盘,亦或分布于主干断裂派生的羽状断裂上^[16-20],温泉也有位于走滑断裂的末端,如位于滇西地区的遮放瑶池温泉^[21]。除了断裂之外,温泉的分布也有其他一些影响因素,例如地表水对温泉水存在明显的影响^[22];出露于坚硬基岩地区的温泉,温度往往偏高,而出露于松散沉积物分布地区的温泉,一般温度偏低;在温泉较多的活动性断裂带,或温泉比较集中的活动性断裂的一些段落,地震的强度具有一定的关联性^[16-18],等等。

所以在温泉形成与分布的多个影响因素中,断裂特征及其组合关系十分重要,但是目前研究多关注地表构造特征与温泉分布的关联性,缺少关于断裂控制温泉分布的机制方面的探讨,故本文聚焦大理州洱源县重点断裂带构造特征及附近裂缝发育机制两大基础问题,选择三营镇等多个温泉为代表,围绕“断裂—裂缝—温泉”研究主线,从区域地质和重点构造露头点解剖,分析和计算不同断裂的应力应变特征,预测不同性质断裂及多条断裂组合背景下裂缝分布特征,建立该地区的断裂构造与温泉的空间三维模型,探讨温泉成因的构造模式,以期为该地区地热及温泉资源的全面评价提供参考依据。

1 区域地质背景

1.1 板块构造背景

从大地构造角度来看,云南省位于多个构造板块相互衔接的重要部位,构造位置决定了云南省境内断裂构造十分发育(图 1)。根据走向不同,可以分为 NW-SE 走向断裂、SN 走向断裂、NE-SW 走向断裂等;根据断层性质不同,可以将断裂划分为走滑断裂、逆冲断裂和张性断裂;根据形成时期不同,可以

划分为中生代及之前的早期断裂,新生代及之后的新构造断裂,等等。根据断裂构造组合关系、地壳运动和变质作用等多方面信息,将云南省大地构造单元划分为多个一级构造单元,包括腾冲地块、保山地块、滇中地块、思茅地块等^[23-25]。

本次研究的洱源县位于滇西地区,属于横断山脉与云贵高原的交界地带,在构造上主要位于思茅地块和滇中地块等一级构造单元界线上,从二级构造单元尺度,洱源县可以划分为兰坪—思茅双向弧后—陆内盆地、点苍山结晶基底断块、丽江—盐源陆缘断褶带等(图 1)。

1.2 区域构造演化

云南省自元古代以来经历了多期构造演化,其中喜马拉雅运动是云南地区最为重要的构造运动,具有强烈的构造表现。在中新世之前,形成了大量的褶皱、变质作用和岩浆活动;但中新世之后,尤其自第四纪以来,由于印度板块与欧亚板块相碰撞,青藏高原不断抬升降起,区域构造应力场发生了重大改变,表现为各构造块体的水平滑移,老断裂复活,随着挤压过程的继续和推挤作用的增强,陆内汇聚作用产生的水平走滑运动更趋明显,显示出新构造运动的新生性,所以中新世之后也成为“新构造运动”。

大量地壳形变测量结果表明,受青藏高原向北构造运动的影响,云南省境内不同地区具有不同的地壳运动速度及方向,比如中部地区为南南东向,而云南的西南部则转变成近南北向。运动方向的这种渐转变化,反映了青藏高原受印度次大陆的强烈挤压,它的中—东部地壳块体被挤出,向东缘作发散状滑移^[27-28]。

本次研究的滇西地区(主要是洱源县)现今主要表现为右行走滑特征,这主要是由于该地区为响应青藏高原的长期性、多期性和不均匀性地隆升,红河断裂带、金沙江断裂等一级构造边界性大断裂经历了古近纪的大型左行走滑运动向新近纪右行走滑运动的转变。

1.3 沉积地层分布特征

云南省地层发育较为齐全,从元古界至第四系均有所出露。从沉积环境角度来看,这些不同沉积地层经历了多期沉积环境的更替,在晚古生代—三

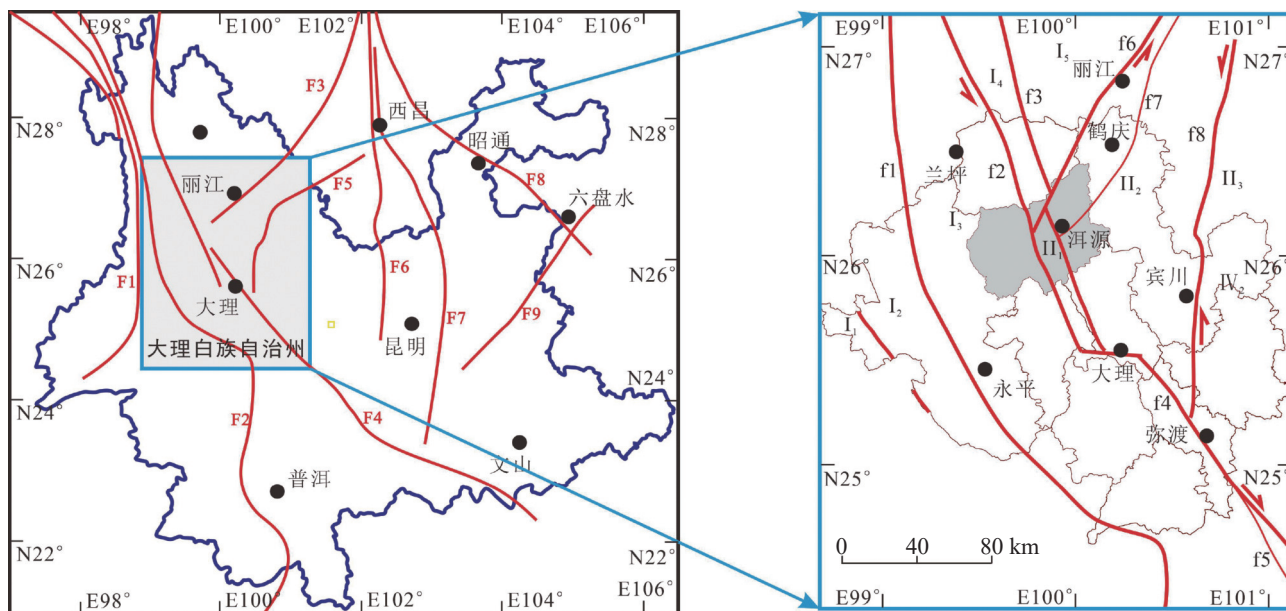


图1 云南省洱源县区域大断裂展布图(据参考文献[26]修改)

F1.怒江断裂 F2.澜沧江断裂 F3.丽江—小金河(或剑川)断裂 F4.红河断裂 F5.程海断裂 F6.绿汁江断裂 F7.小江断裂 F8.康定—奕良—水城断裂 F9.弥勒—师宗—水城断裂 f1.澜沧江断裂 f2.维西—乔后断裂 f3.金沙江断裂 f4.红河断裂 f5.哀牢山断裂 f6.丽江—剑川断裂 f7.鹤庆—洱源断裂 f8.程海断裂 I. 西藏—三江造山系 II.保山地块 I2.碧罗雪山陆缘弧带 I3.兰坪—思茅双向弧后—陆内盆地 I4.维西陆缘弧带 I5.中咱—中甸地块 II.杨子—华南陆块区 III.点苍山结晶基底断块 II2.丽江—盐源陆缘断褶带 II3.楚雄陆内盆地

Fig. 1 Distribution of regional faults in Eryuan County, Yunnan Province

F1. Nujiang fault F2. Lancangjiang fault F3. Lijiang-Xiaojinhe(or Jianchuan) fault F4. Honghe fault F5. Chenghai fault F6. Lvyejiang fault F7. Xiaojiang fault F8. Kangding-Yiliang-Shuicheng fault F9. Mile-Shizong-Shuicheng fault f1. Lancangjiang fault f2. Weixi-Qiaohou fault f3. Jinshajiang fault f4. Honghe fault f5. Ailaoshan fault f6. Lijiang-Jianchuan fault f7. Heqing-Eryuan fault f8. Chenghai fault I. Xizang-Sanjiang Orogenic system II. Baoshan massif I2. Marginal arc zone of Biluo snow mountain I3. Lanping-Simao bidirectional backarc-intracontinental basin I4. Marginal arc zone of Weixi I5. Zhongzan-Zhongdian massif II. Yangzi-Huananlu massif III. Diancangshan crystalline basement block II2. Lijiang-Yanyuan marginal fault fold belt II3. Chuxiong intracontinental basin

叠纪期间,火山活动强烈且沿断裂分布,三叠纪之后,云南地区的沉积环境基本上以陆相沉积为主,新生代地层分布较为局限,仅在个别新生代形成的小规模“构造型盆地”中有所沉积。地层在地表的分布受断裂带影响明显,比如澜沧江断裂、红河-金沙江断裂、程海断裂和绿汁江断裂成为地表地层主要界限,其中澜沧江断裂以西地区主要为古生代地层,多见岩浆岩侵入体,局部为中生代和少量新生代地层;澜沧江断裂和红河-金沙江断裂之间区域主要出露为中生代地层,重点为侏罗系和白垩系,局部为古生代地层等;程海断裂与红河-金沙江断裂所加持的近似三角形区域(云南境内的范围)则主要为晚古生代—三叠系地层;程海断裂与绿汁江断裂之间区域地层又以晚中生代—新生代地层为主。本次研究的洱源县地层展布受断裂影响,最老地层元古界出露于罗坪山,其东西两侧分别为罗坪山断裂和维西-乔后断裂,表现为元古界与东西两侧的大面积中新生代地层呈断层接触,新生代地层主要分布于洱源盆

地及其周缘局部地区,受后期断裂控制作用明显,部分断层切割古近系。

2 重点断裂野外特征

根据洱源县域内重点断裂的平面展布特征,结合地形地貌特征和现有地表温泉的分布,对重点断裂带进行野外地质调查,记录了这些断裂在地表的构造表现特征(图2,图3),通过绘制极射赤平投影计算构造应力方向。

2.1 维西-乔后断裂

总体上,维西-乔后断裂西盘为中生代红色碎屑,东盘为强烈变质的古元古代变质岩,断裂东侧见狭长的线性左行走滑韧性剪切带(图4a),后期叠加脆性变形的碎裂岩和构造角砾岩^[29],地表显示为西倾的正断层,倾角 58° 左右(图2),早期具有韧性推覆和左行走滑特征,晚期为右行走滑断层。野外地质调查表明,该断裂东西两侧的次级断裂与主断裂一起

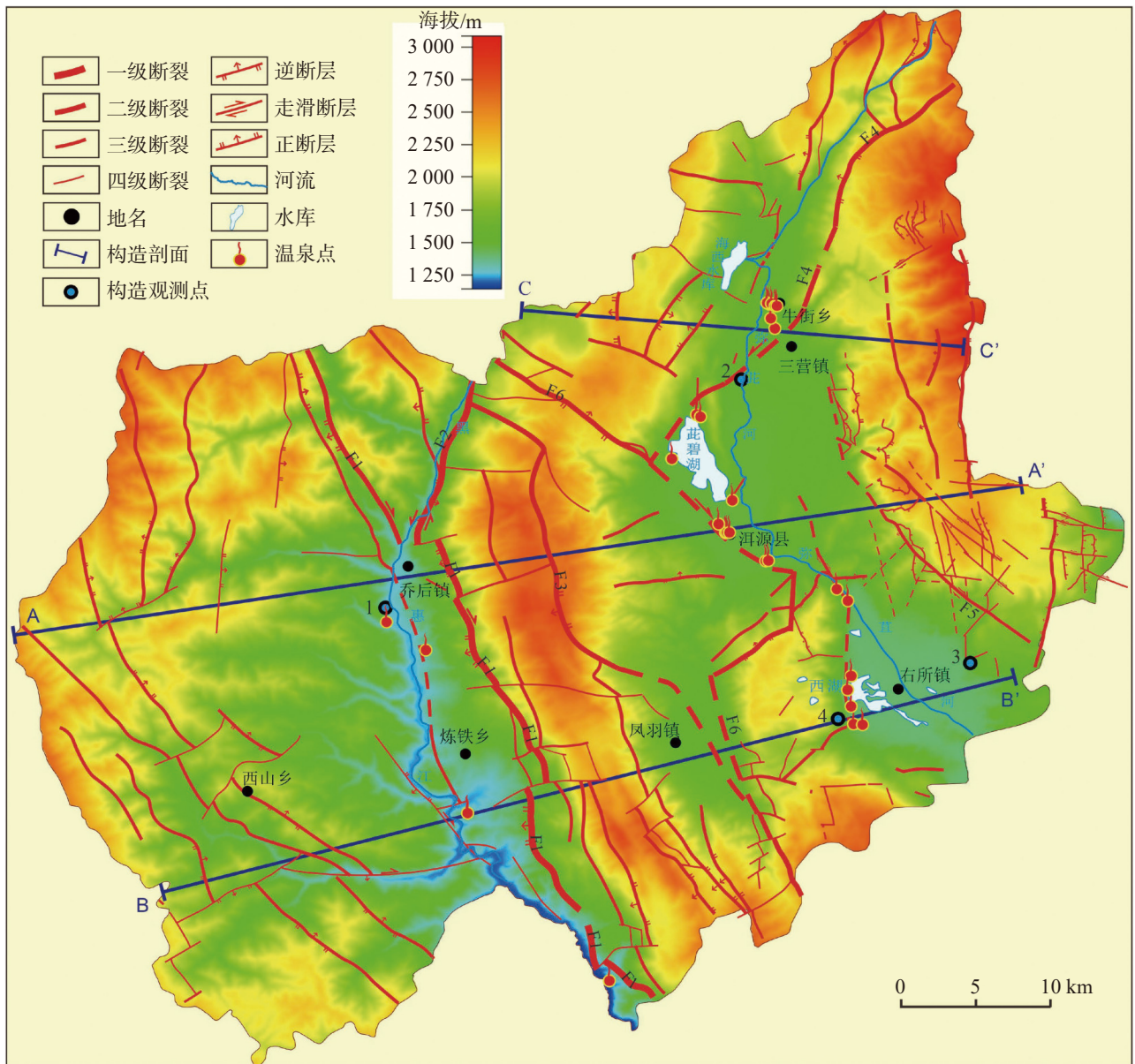


图 2 洱源县断裂构造平面展布图

F1.维西—乔后断裂 F2.龙蟠—乔后断裂 F3.罗坪山断裂 F4.鹤庆—洱源断裂 F5.南大坪断裂 F6.北排—正生村断裂

Fig. 2 Plane layout of faults in Eryuan county

F1. Weixi-Qiaohou fault F2. Longpan-Qiaohou fault F3. Luopingshan fault F4. Heqing-Eryuan fault F5. Nandaping fault F6. Beipai-Zhengshengcun fault

形成典型“花状构造”，并具走滑断裂的“丝带效应”，即沿断裂延伸方向，断面倾向可能会发生变化(图 2、图 3-AA'，图 3- BB')。该主干断裂的后期改造主要表现在近地表或者地表区域，受新生代以来的新构造运动影响较为明显，这些后期形成的断裂多为正断层，使得主干断裂在平面上发生明显的错断现象。

2.2 龙蟠—乔后断裂

该断层在洱源县内距离较短，约 13 km，断裂总体走向 NNE(图 2)，东倾逆断层，倾角 38°，西盘为变质三叠系碎屑岩、碳酸盐岩建造，东盘为强烈变形变

质古元古代变质岩，断裂带上见狭长的印支期线性走滑韧性剪切带，后期叠加有碎裂岩，破碎带宽 30 m，该断裂长期多次活动，晚期具左行走滑特征^[29]。

2.3 罗坪山断裂

罗坪山断裂分为南北两段，北段不在洱源境内，南段基本上沿罗坪山东侧延伸(图 2)，表现为较宽的挤压角砾破碎带(图 3-BB')，对东侧古生代—中生代沉积盆地起着一定的控制作用，沿断裂带两侧不同时期的地层和侵入岩都发生了强烈挤压和片理化，断裂活动具有多期性和长期性特征，以及明显的挤

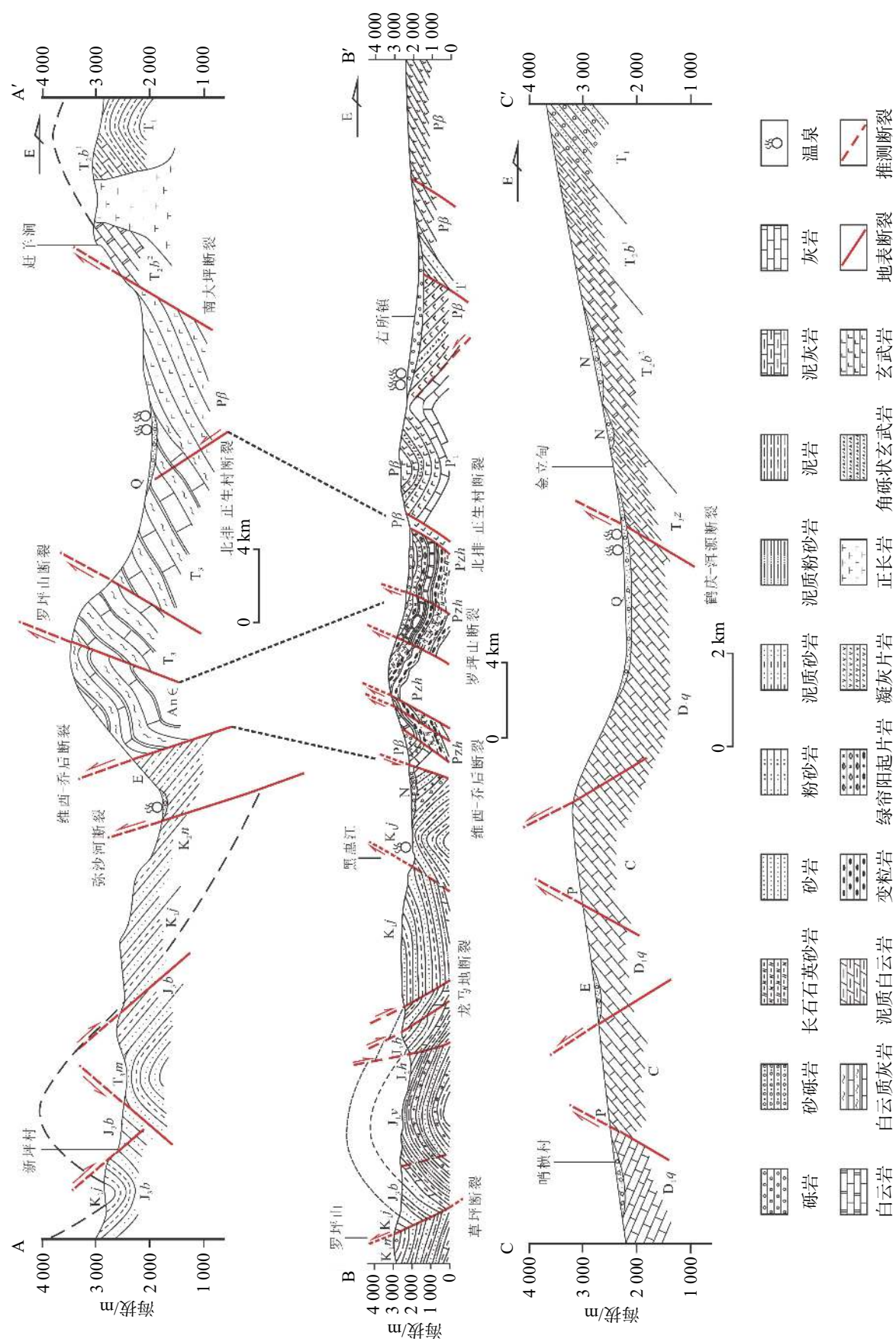


图3 洱源县东西向野外地质联合剖面

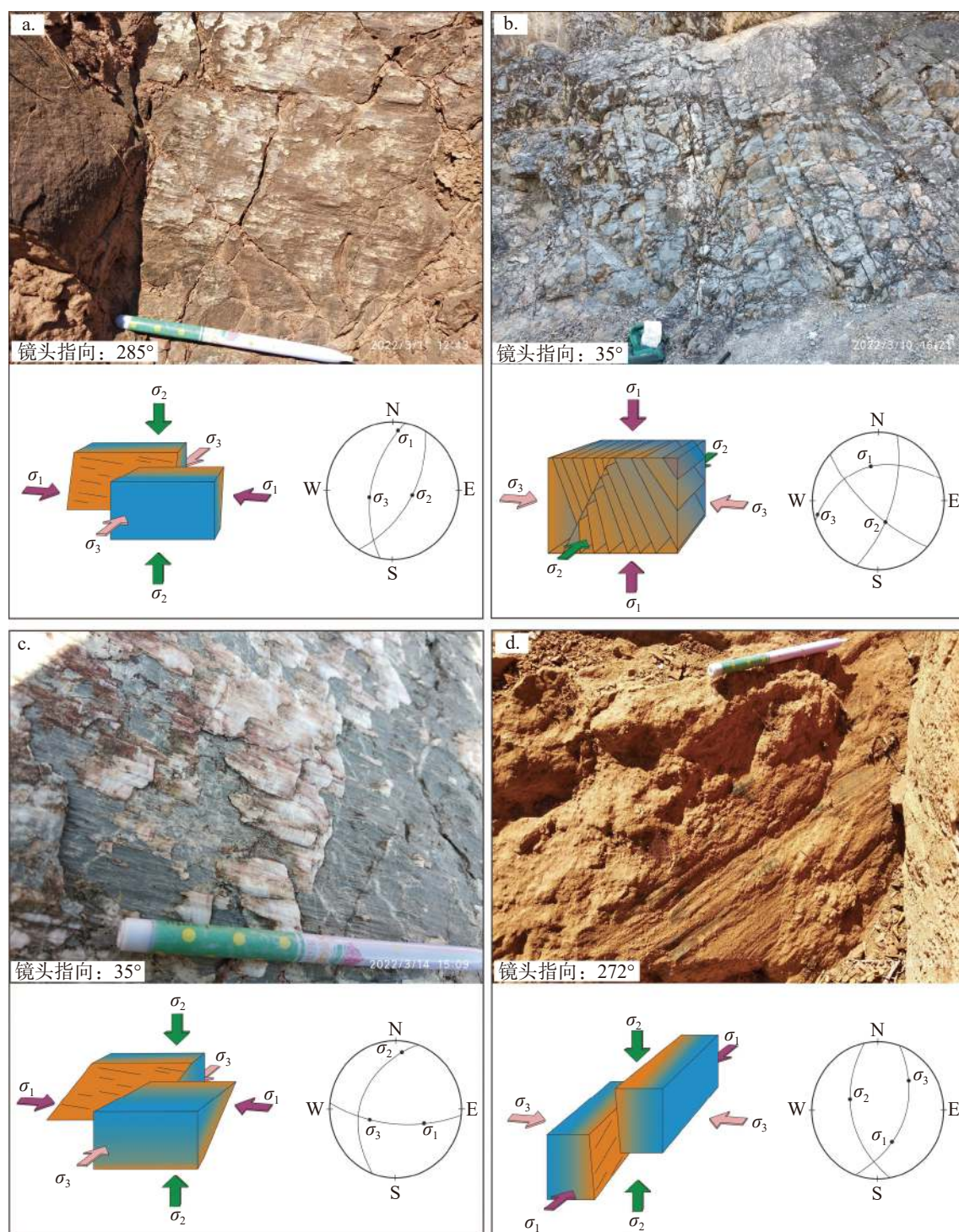


图 4 洱源县重点断裂地质露头特征(构造观测点位置见图 2 所示)

Fig. 4 Characteristics of geological outcrops of key faults in Eryuan county (see Figure 2 for the location of structural observation points)

压特征,在野外可见多处擦痕及构造角砾。

2.4 鹤庆-洱源断裂

鹤庆-洱源断裂带位于滇中次级地块西北隅的大理和丽江境内^[30]。断裂为西倾逆断层,延伸规模

较大,在三营及牛街一带常见温泉分布(图 2,图 3-CC'),在断裂南端出现较多钙质胶结和沉淀,但相对于三营镇西侧而言,钙质沉淀的时期较早。该断裂带由多条左旋走滑性质的分支断裂构成,其左旋走滑符合滇中次级块体顺时针转动模型^[31],左旋走滑

的性质也体现在水系的错断,形成地表上沿断裂分布一系列左旋扭动的冲沟和山脊^[32]。野外地质发现断层破碎带发育(图4b),并有断层擦痕,断层角砾岩等,古近纪角砾岩沿着该断裂分布,各地层均发育典型的脆性变形,表明这些构造的形成应该是在近地表等区域,现有证据表明最新活动时代约为距今2万年,并且该断裂带中段晚更新世以来的活动是对青藏高原强烈隆升的响应^[33]。

2.5 南大坪断裂

南大坪断裂是位于洱源县东部地区的一条重点断裂,为西倾逆断层(图3-AA',图3-BB'),其间较多被NE及EW向断层错断(图2)。在平面上,该断裂西侧为二叠系玄武岩,东侧为中上三叠统,在该断裂南侧地区的野外露头可见擦痕和阶步,所反映出的应力方向为左行走滑并伴有正断层性质(图4c),由于该断裂非南大坪断裂主断裂,代表了南大坪断裂早期(中新世之前)的构造运动特征,断面上钙质胶结,脆性变形特征清晰,认为该断裂形成时间为新生代早期,即新构造运动之前形成,在新构造运动期间发育小型正断层。

2.6 北排-正生村断裂

该断裂NNW向延伸,大部分被第四系覆盖,沿

断裂形成断陷盆地和温泉(图2,图3-AA',图3-BB')。断裂西盘具脆韧性变形和脆性变形,东盘则只具脆性变形,断裂面东倾,倾角40°,为逆断层,兼具右行走滑,此外该断裂可以划分为南、北两段,洱源县南侧为分界,南段地表覆盖严重,但是根据地层及岩性接触关系,可推测该断裂为西倾逆断层,且倾角较大,与北段东倾的逆断层构成走滑断裂的丝带效应现象。说明此断裂西盘构造变形时间较早,且形成的深度较大,表现为韧性-脆性变形,随后西盘发生垂向隆升并遭受剥蚀,而断裂东盘构造隆升相对较低,并且在新生代以来发生了显著的新构造运动,形成脆性变形,将本断裂解释为走滑断裂带,并且野外可见多处擦痕(图4d),两侧伴有多条次级正断层,切割深度不大,与主断裂共同构成了“负花状构造”。

3 断裂两盘应力状态计算和分析

理论上已经证明了一个物体如果受到双轴构造应力作用,这两个应力相互垂直且不为零时,其横截面上的正应力值(σ_α)和剪应力值(τ_α)分别可以表示为:

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1}{2}(1 + \cos 2\alpha)$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\alpha$$

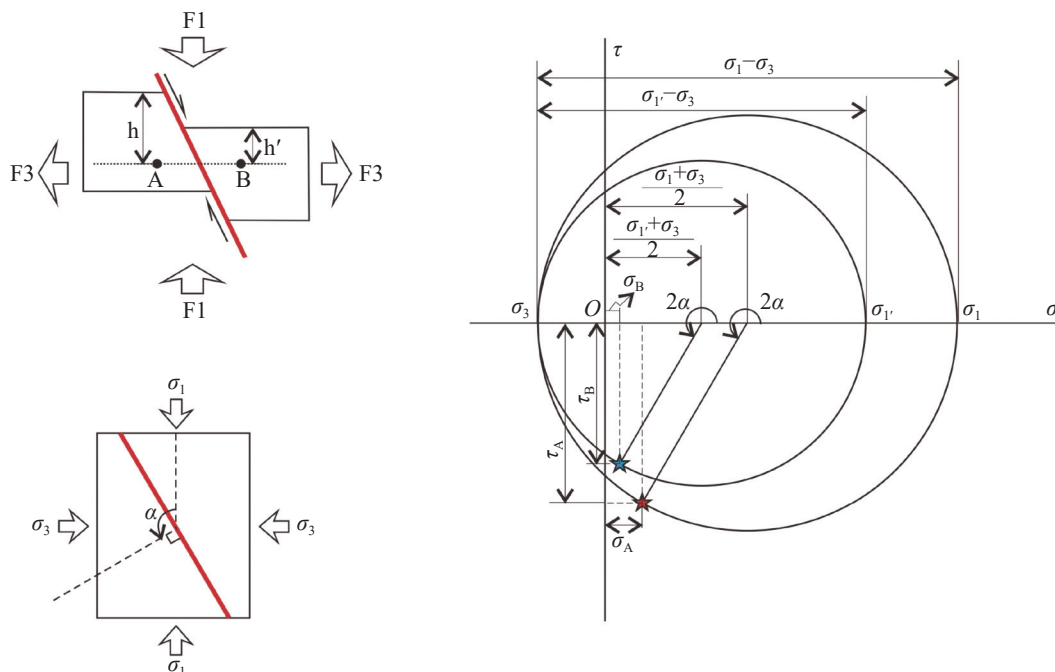


图5 岩层发生破裂的双轴应力状态下的二维应力莫尔圆

Fig. 5 Two-dimensional stress Mohr circle under biaxial stress state when rock stratum breaks

式中: σ_1 为最大主应力; α 表示从最大主应力方向沿逆时针与受力物体截面法线之间的夹角, 且 $\alpha \in [0, 180]$ 。

这两个分量应力之间的相互关系可以利用一个圆的方程式表示^[34-35], 即:

$$\left(\sigma_\alpha - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)^2 + \tau_\alpha^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 \quad (1)$$

式中: σ_3 为最小主应力。

对于断层两侧地层的受力情况可以分别利用上述公式进行分析, 即图 5 左上图中 A 点和 B 点的应力方程分别为,

$$\left(\sigma_{\alpha A} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)^2 + \tau_{\alpha A}^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 \quad (2)$$

$$\left(\sigma_{\alpha B} - \frac{\sigma_1' + \sigma_3}{2}\right)^2 + \tau_{\alpha B}^2 = \left(\frac{\sigma_1' - \sigma_3}{2}\right)^2 \quad (3)$$

式中: $\sigma_{\alpha A}$ 为 A 点的正应力值, $\sigma_{\alpha B}$ 为 B 点的正应力值, $\tau_{\alpha A}$ 为 A 点的剪应力值, $\tau_{\alpha B}$ 为 B 点的剪应力值, σ_1 为 A 点的最大正应力值, σ_1' 为 B 点的最大正应力值, σ_3 为 A 点和 B 点的最小主应力值。

所以, 由于 A 点上覆地层厚度(h)大于 B 点上覆地层厚度(h'), 除了在点($\sigma_3, 0$)之外, A 点均具有更大的正应力和剪应力(图 5)。

需要指出的是, 上述公式的使用及受力情况对比存在下述基本约束条件:

(1) 假设断裂两盘地层岩性的物理性质(即密度)一致, 不存在地层的差异压实与差异反弹现象;

(2) 断裂在中浅部深度形成和发育, 且断面总体上表现为平直, 地层发生明显的脆性破裂;

(3) 忽略断层在形成演化过程中所发生的同沉积现象, 即断层两侧地层厚度均一;

(4) 断层两侧地层的受力差异特征仅在断层附近有效, 距离断层越远则差异性越小;

(5) 定义挤压应力为正值, 伸展应力为负值, 本文绘制的为正断层, 对于逆断层, 改变应力值的正负即可。

对于正断层而言, 下盘地层具有相对较大的正应力和剪应力, 而对于逆断层, 则上盘具有相对较大的正应力和剪应力。

4 断裂两盘地层受力状态对比

在断层形成过程中, 发生于断层两侧地区的拖

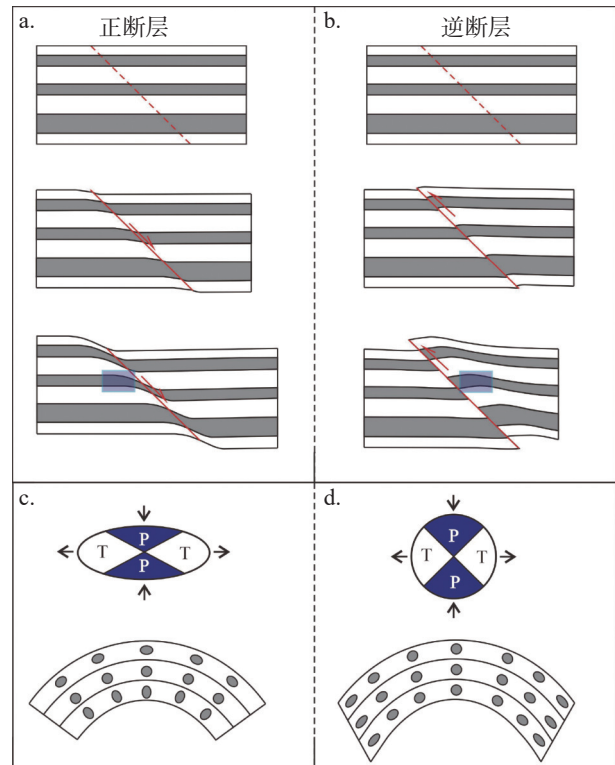


图 6 断层两盘岩层发生拖曳构造(即牵引褶皱)的应变分布
Fig. 6 Strain distribution of dragged structure (i.e. dragged fold) occurring in rock layers on both sides of the faults

曳构造中, 牵引褶皱是十分重要和常见的一种构造类型, 对于正断层而言, 牵引背斜发育在断层下盘, 牵引向斜发育在断层上盘(图 6a), 而对于逆断层而言, 二者分布相反(图 6b)。背斜和向斜的成因机制导致其核部及转折端受力机制不同, 不管该牵引背斜发生的是弯流褶皱作用(图 6c), 还是弯滑褶皱作用(图 6d), 牵引背斜顶部总体上表现为伸展应力状态, 所以在后期断裂演化中, 在正断层下盘和逆断层上盘更加容易发育构造裂缝等次级构造。

5 讨论

5.1 大型走滑断裂或成为沟通深部热源的主要通道

由于形成机制原因, 走滑断裂具有较大的切割深度(图 7), 由于研究区内暂无人工地震数据, 故本文参考位于同一走滑构造体系的红河断裂东南段(即莺歌海海域)深部构造特征, 人工地震剖面展示出该处红河断裂具有典型的走滑构造特征, 即花状构造及较深的切割深度^[36], 研究区位于红河断裂带的西北端, 所以走滑特征明显的维西-乔后断裂、红河断裂西北端等在深部可能存在地壳低速层^[37-38], 所

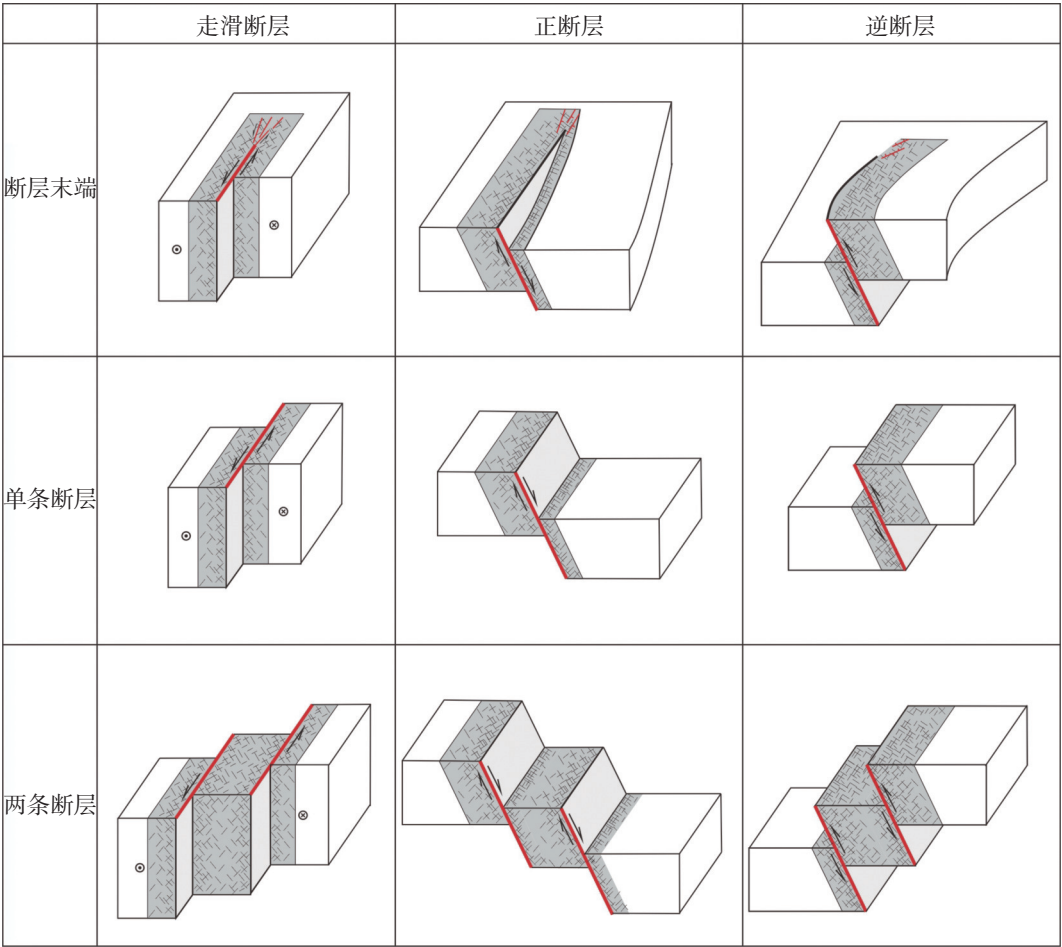


图 7 不同断裂类型及断裂组合背景下的裂缝分布预测

Fig. 7 Distribution of fractures with different fault types and fault combination backgrounds

以该断裂更有可能沟通深部热源,即深部岩体或者幔源物质(图 8),使其通过断裂带发生侵入作用,比如位于研究区东南的哀牢山断裂带,可以作为深部岩浆上涌的重要通道^[39],局部可出露地表。野外地质表现为沿走滑断裂展布的多个岩浆侵入岩体或岩脉,并且具有相对较高的地温梯度^[40-41]。洱源县域内的多条大型北西走向走滑断裂带在长期构造演化中始终具有走滑特征,如维西-乔后断裂、罗坪山断裂等。

5.2 后期所形成的张性断裂或成为温泉或热水发生地下径流的主要通道

研究区内发育大量后期的张性断层,总体上呈 NEE 走向,将早期的多条断裂切割(图 8),由于这些张性断层在切割深度上不大,并且张性断层面具有较小的正应力值,即断层多表现为“开启性”,部分断层横剖面可表现为“V”字型构造特征,地质流体(即温泉水)更加容易在其内部沿走向流动,形成地下径流,之后在重力作用下,于这些正断层的平面尖灭处

且具有较低海拔的部位发生聚集。

此外,这些张性断层多为喜马拉雅晚期构造运动中形成,尤其新构造运动更是形成了多处张性断层,这些断层发育分布在新生代以来的小型沉积盆地、沉积凹陷内部或周边地区,由于盆地内部第四系覆盖严重,目前可在周边地表出露(图 2),故这些张性断层多发育在碎屑岩地层中,由于碎屑岩具有相对较低的岩石力学参数,更加容易形成各类构造裂缝(图 7),所以这些分布于后期张性断裂周边的各类裂缝也增强了温泉热水在断裂体系空间的流动。

5.3 裂缝发育带、断裂交汇处及断层尖灭处都可成为温泉主要出露点

研究区经历了多期构造变形及后期演化,而最新一次构造运动,即新构造运动对现今地表裂缝分布及大量张性断层的展布具有重要控制作用,其中正断层下盘的裂缝发育带、逆断层的上盘裂缝发育带(图 7),都可以成为有效的热水聚集区。

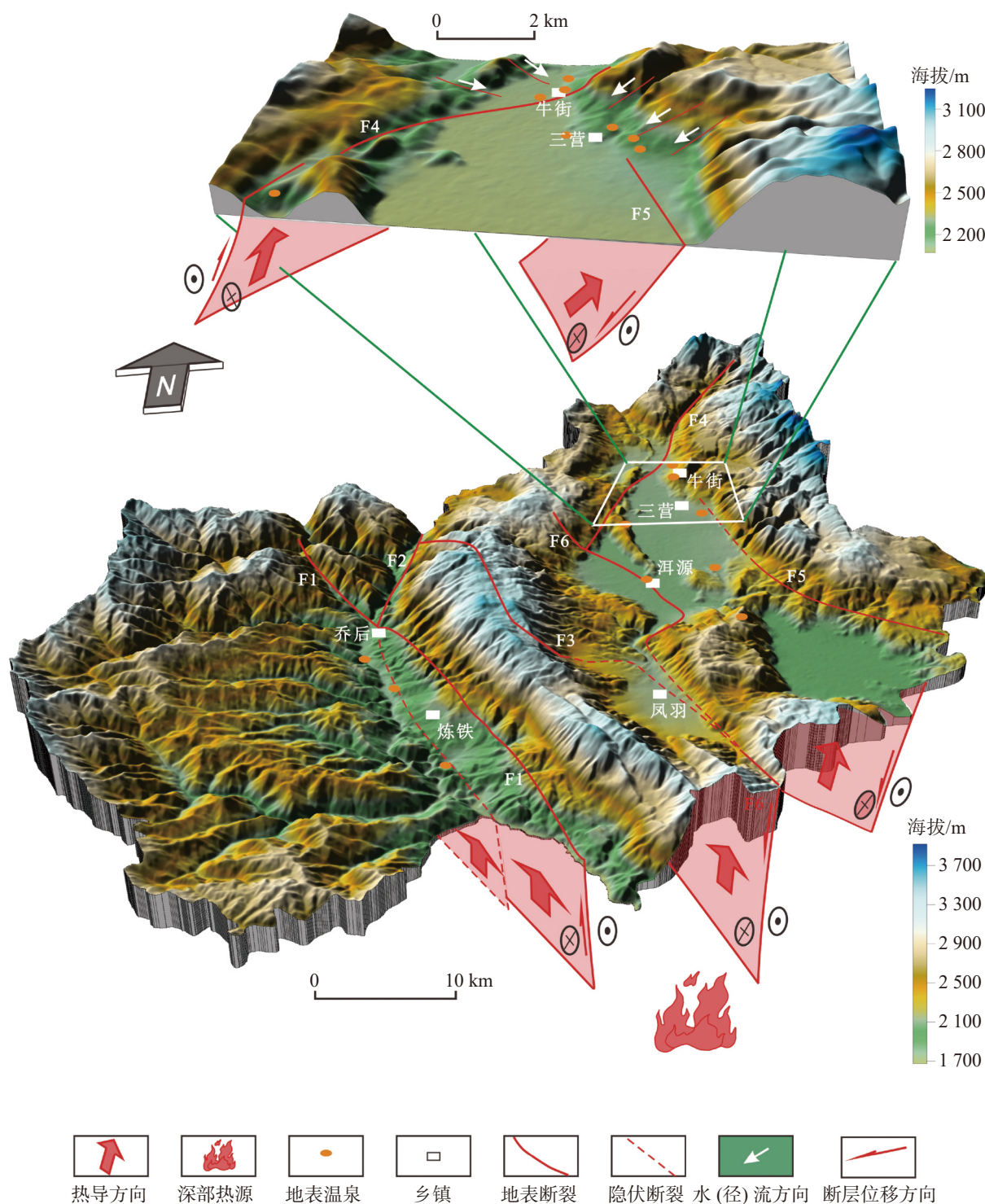


图 8 洱源县现有温泉与不同走向的主要断裂展布关系图

Fig. 8 Distribution of existing hot springs in Eryuan county and main faults with different directions

鉴于此点,对洱源县现今地表温泉出露的构造位置进行梳理,发现多个温泉均分布于上述的裂缝发育有利区,对于洱源县北部的牛街镇而言,温泉分布于鹤庆-洱源(逆)断裂带的上盘,并且同时位于后期张性断层的交汇处,即北东走向断裂与北西走向断裂的交汇处(图 2),并且温泉出露点具有相对较低

的海拔。再者,位于洱源县城附近的温泉同样位于逆断层的上盘,即北排-正生村断裂的上盘,同时也处于该断裂发生弧形转弯处,以及北东向次级断层与该断层的平面交汇处(图 8)。三营镇密集分布的温泉同样位于南大坪断裂与北东向多组正断层的交汇处,且位于南大坪断裂的下盘,同样具有相对较低

的海拔。位于右所镇西侧的多个温泉出露点在平面上呈串珠状展布,与南北向的走滑断裂(即巡检村断裂)走向一致,并且位于该走滑断裂的中部和南端,这两处均为走滑断裂与北东方向断裂交汇部位(图2)。

除研究区之外,其它地区的一些温泉出露点也具有上述的构造分布特点,如重庆市的石耶司温泉发育在牵引背斜核部的裂隙中^[42],并且多组不同方向的断裂交汇处也可以成为有效的热水聚集区,比如位于重庆市万盛区的樱花温泉位于长寿-遵义基底断裂与七曜山基底断裂的交汇处。此外,由于断层在平面上由于应力释放所表现出来的断层尖灭并被裂缝发育区所替代,最终在地形、地貌、海拔和第四系沉积物等外在因素影响下,断裂平面尖灭处也可以成为有效热水聚集区,比如重庆地区的多个温泉即位于断裂的倾末端^[37];嘎洒盆地的温泉位于逆冲断层的上盘^[43],西藏地区续迈地热田不仅受到多条断裂的控制,并且MT电阻率断面图也可以反映出在正断层下盘和逆断层上盘为低阻体发育带,可以解释为富含地质流体的岩石裂隙发育区^[44]。

6 结 论

(1)研究区内发育多条大型断裂带,走向以NW-SE向为主,包括维西-乔后断裂、龙蟠-乔后断裂、罗坪山断裂、鹤庆-洱源断裂等,这些断裂不仅具有多期构造活动特征,并且均具有“压扭性”或者“张扭性”特征,被后期所形成的张性断层切割改造,这些断裂周边可见多处温泉出露。

(2)正断层下盘及逆断层上盘具有更大的正应力值和剪应力值,在断裂形成和演化过程中,这两处地层多形成牵引背斜,在上覆地层重力等应力作用下,正断层下盘及逆断层上盘在断裂附近更容易发育裂缝,为温泉热水的疏导或聚集提供地质空间。

(3)断裂构造对温泉的形成具有重要的控制作用,其中大型走滑断裂可成为沟通深部热源的主要通道;后期形成的张性断裂可成为温泉热水发生地下径流的主要通道;断裂附近的裂缝发育带、多组方向断裂的交汇处,以及断层尖灭处都可成为温泉热水的聚集区,在地形、地貌、海拔及第四系沉积物等多因素综合影响下,热水出露地表形成温泉。

致谢: 在此特别感谢中国地质大学(北京)张金川教授、以及香港中文大学(深圳)谭慧副研究员在

本次研究过程中所提供的帮助及学术讨论,也要感谢地热能科学技术(大理)研究院有关领导在野外工作及地质研究中提供的便利条件,另外也感谢本论文审稿人及编辑部老师提出的修改意见及辛苦付出。

参考文献

- [1] 姜光政,高棚,饶松,张林友,唐晓音,黄方,赵平,庞忠和,何丽娟,胡圣标,汪集旸. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2892-2910.
JIANG Guangzheng, GAO Peng, RAO Song, ZHANG Linyou, TANG Xiaoyin, HUANG Fang, ZHAO Ping, PANG Zhonghe, HE Lijuan, HU Shengbiao, WANG Jiyang. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition)[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2892-2910.
- [2] Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. Heat flow in the continental area of China: A new data set[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179(2): 407-419.
- [3] 白玉鹏. 云南省弥勒红河谷温泉水文地球化学特征及成因研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
BAI Yupeng. Hydrogeochemical characteristics and formation of hot spring in Honghe valley, Yunnan Province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [4] 唐显春,王贵玲,马岩,张代磊,刘忠,赵旭,程天君. 青海共和盆地地热资源热源机制与聚热模式[J]. *地质学报*, 2020, 94(7): 2052-2065.
TANG Xianchun, WANG Guiling, MA Yan, ZHANG Dailei, LIU Zhong, ZHAO Xu, CHENG Tianjun. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 2052-2065.
- [5] 李腾. 云南省保山断陷盆地主要控热构造与地热分布[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
LI Teng. Main thermal control structures and geothermal distribution in Baoshan fault basin, Yunnan Province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [6] 黄珣. 鲜水河断裂带中段温泉水化学特征及温泉成因研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
HUANG Xun. Study on the chemical characteristics and the genesis of hot springs in the middle section of Xianshuihe fault zone[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [7] 张誉彬,徐世光,巴俊杰,杨成会,薛良方. 云南苦楚邑—茅草坪地热田成因及热流体化学分析[J]. *甘肃科学学报*, 2016, 28(4): 57-60, 71.
ZHANG Yuli, XU Shiguang, BA Junjie, YANG Chenghui, XUE Liangfang. Ku Chuyi, Yunnan—reasons and thermal fluid chemical analysis of couch grass tsubochi geothermal field[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2016, 28(4): 57-60, 71.
- [8] 张家文,吴勇,刘琴,马鑫文. 云南尼格地区热泉成因研究[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(34): 14492-14499.
ZHANG Jiawen, WU Yong, LIU Qin, MA Xinwen. Genesis of

- hot springs in Nige area Yunnan Provience[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(34): 14492-14499.
- [9] 翟泽宇, 王岩. 云南大理地区温泉成因分析[J]. *科学技术创新*, 2022, 29: 132-135.
- ZHAI Zeyu, WANG Yan. Analysis on the origin of hot springs in Dali, Yunnan[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2022, 29: 132-135.
- [10] 黄琴辉, 张华, 康晓波, 王波, 刘海峰, 柴金龙, 黄钊, 王燕. 滇西陇川断陷盆地地热水化学特征及循环过程[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(6): 793-801.
- HUANG Qinhui, ZHANG Hua, KANG Xiaobo, WANG Bo, LIU Haifeng, CHAI Jinlong, HUANG Zhao, WANG Yan. Chemical characteristics and circulation process of geothermal water beneath Longchuan basin, western Yunnan[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6): 793-801.
- [11] 房艳国, 李茂华, 付调金, 邵玉冰, 董建辉. 云南大理州洱源盆地温泉分布特征及成因分析[J]. *资源环境与工程*, 2015, 29(5): 701-705.
- FANG Yanguo, LI Maohua, FU Tiaojin, SHAO Yubing, DONG Jianhui. Study on distribution characteristics and cause analysis of the Eryuan basin geothermal area[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2015, 29(5): 701-705.
- [12] 李雄, 白李林, 朱凌峰. 云南保山盆地地热形成机制探讨[J]. *云南地质*, 2015, 34(2): 176-180.
- LI Xiong, BAI Lilin, ZHU Lingfeng. A probe into the geotherm genesis mechanism in Baoshan basin, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2015, 34(2): 176-180.
- [13] 张哈彬, 邓旭升, 王波, 唐佐其, 陈武. 贵州石阡—花桥断裂构造特征及其对地热资源的控制作用[J]. *贵州地质*, 2018, 35(2): 131-137.
- ZHANG Hanbin, DENG Xusheng, WANG Bo, TANG Zuoqi, CHEN Wu. Structural characteristics and its control function to geothermal resources of Shiqian—Huaqiao fault in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 2018, 35(2): 131-137.
- [14] 马鑫, 付雷, 李铁锋, 闫晶, 刘延, 王明国, 邵炜. 喜马拉雅东构造结地区地热成因分析[J]. *现代地质*, 2021, 35(1): 209-219.
- MA Xin, FU Lei, LI Tiefeng, YAN Jing, LIU Yan, WANG Mingguo, SHAO Wei. Analysis of geothermal origin in eastern Himalayan syntaxis[J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 209-219.
- [15] 韩凯, 梁永平, 严良俊, 梁东辉, 申豪勇, 唐春雷. 综合物探调查晋祠断裂对晋祠泉流域岩溶水控制作用效果分析[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(5): 745-752.
- HAN Kai, LIANG Yongping, YAN Liangjun, LIANG Donghui, SHEN Haoyong, TANG Chunlei. Control of the Jinci fault on karst water in the Jinci spring basin revealed by integrated geophysical surveys[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(5): 745-752.
- [16] 王春林. 华南地区温泉地震和活动性断裂关系的研究[J]. *华南地震*, 1982, 2(4): 9-17.
- [17] 邵维晔, 王云, 李其林, 潘绍辉. 红河断裂带温泉水文地球化学及构造活动特征研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2022, 41(3): 612-624.
- SHAO Weiye, WANG Yun, LI Qilin, FAN Shaohui. A study on hydrogeochemistry and tectonic activity features of hot springs in the Red river fault zone[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2022, 41(3): 612-624.
- [18] 王博, 周永胜, 钟骏, 王月, 解孟雨, 王云, 胡小静, 张翔. 滇西北构造地热特征及对地震活动的影响[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(9): 3419-3433.
- WANG Bo, ZHOU Yongsheng, ZHONG Jun, WANG Yue, XIE Mengyu, WANG Yun, HU Xiaojing, ZHANG Xiang. Tectonic geothermal feature of northwest Yunnan and influence on seismic activity[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(9): 3419-3433.
- [19] 罗丹, 杨平恒, 王治祥, 冉瑜, 蒋晶, 明晓星. 渝东南断裂型碳酸盐岩地热水的形成特征[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(5): 670-681.
- LUO Dan, YANG Pingheng, WANG Zhixiang, RAN Yu, JIANG Jing, MING Xiaoxing. Formation characteristics of carbonate thermal water controlled by fault in southeastern Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 670-681.
- [20] 刘元晴, 周乐, 王新峰, 吕琳, 路小慧, 于开宁, 张伟峰. 北方岩溶区断裂带水文地质性质及结构模型[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(6): 976-986.
- LIU Yuanqing, ZHOU Le, WANG Xinfeng, LV Lin, LU Xiaohui, YU Kaining, ZHANG Weifeng. Hydrogeological structure model of the fault zone in the karst area of North China[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(6): 976-986.
- [21] 张七道. 滇西龙陵瑞丽大断裂东侧沉积岩区遮放瑶池(温泉)地热流体化学特征及成因[J]. *高校地质学报*, 2021, 27(4): 489-500.
- ZHANG Qidao. Geochemical characteristics and genesis of geothermal fluids in Zhefang jade pool (hot spring) sedimentary rock area on the eastern side of the Longling—Ruili fault, west Yunnan[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2021, 27(4): 489-500.
- [22] 钟君, 李思亮, 李铮, 朱雪涛, 易沉壁, 马婷婷, 徐胜, 刘丛强. 青藏高原东缘地热活动对河流水、碳输送影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(5): 932-941.
- [23] Schoenbohm L M, Whipple K X, Burchfiel B C, Chen L. Geomorphic constraints on surface uplift, exhumation, and plateau growth in the Red river region, Yunnan Province, China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(7-8): 895-909.
- [24] 陈思宇, 王嘉学. 云贵高原隆升研究进展[J]. *云南地理环境研究*, 2017, 29(3): 23-29.
- CHEN Siyu, WANG Jiaxue. Progress in research on tectonic uplift in Yunnan—Guizhou Plateau[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2017, 29(3): 23-29.
- [25] 陈正山. 贵州理疗热矿水(温泉)形成机理及其对人群健康的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- CHEN Zhengshan. The formation mechanism of physiotherapy thermomineral water (hot spring) in Guizhou and its effect on human health[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.

- [26] 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): 1925-1937.
TANG Yuan, LIU Junlai. Morphotectonics of western Sichuan-Yunnan since Pliocene: The development of basins along fault zones and constrains on far-field intracontinental process[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(6): 1925-1937.
- [27] 周硕愚, 帅平, 张跃刚, 邓千金, 吴云, 施顺英. 中国大陆及其东南沿海现时地壳运动[J]. 自然科学进展, 2000, 10(3): 273-277.
- [28] 徐杰, 计凤桔, 周本刚. 有关我国新构造运动起始时间的探讨[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 284-292.
XU Jie, JI Fengju, ZHOU Bengang. On the lower chronological boundary of the Neotectonic period in China[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 284-292.
- [29] 吴树华. [云南]兰坪幅(G-47-16)1/20万区域地质调查报告[DS]. 全国地质资料馆, 1974. DOI:10.35080/n01.c.50368.
- [30] 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 马文涛, 宋方敏, 于贵华. 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: 地球科学), 2003, 33(Suppl.1): 151-162.
- [31] 沈晓明, 李德文, 孙昌斌, 康艳蕊, 刘睿, 张亚娇. 鹤庆—洱源断裂带中段晚更新世以来的走滑活动[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(1): 29-37.
SHEN Xiaoming, LI Dewen, SUN Changbin, KANG Yanrui, LIU Rui, ZHANG Yajiao. Strike-slip activities since the late Pleistocene at the middle segment of the Heqing-Eryuan fault zone, northwest Yunnan[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(1): 29-37.
- [32] 房艳国, 罗文行, 叶浩, 周云. 鹤庆—洱源断裂晚第四纪活动特征及对滇中引水工程的影响[J]. 华南地震, 2019, 39(3): 6-13.
FANG Yanguo, LUO Wenxing, YE Hao, ZHOU Yun. Late Quaternary activity of Heqing-Eryuan fault and its impact on water diversion project in the central Yunnan[J]. South China Journal of Seismology, 2019, 39(3): 6-13.
- [33] Shen J, Wang S M, Wang Y, Qiang X K, Xiao H F, Xiao X Y. Uplift events of the Qinghai-Tibetan Plateau and environmental evolution of the southwest monsoon since 2.7 Ma, recorded in a long lake sediment core from Heqing, China[J]. Quaternary International, 2010, 218: 67-73.
- [34] 徐开礼, 朱志澄. 构造地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-273.
- [35] Fossen Haakon. Structural geology[M]. New York: Cambridge University Press, 2011: 1-463.
- [36] CHEVALIER Marie Luce, TAPPONNIER Paul, TRINH Phan Trong, BRIAIS Anne, 李海兵, 徐锐. 华南、巽他和掸邦地块之间边界断裂的上新世—第四纪大规模构造反转[J]. 地质学报, 2022, 96(8): 2833-2852.
CHEVALIER Marie Luce, TAPPONNIER Paul, TRINH Phan Trong, BRIAIS Anne, LI Haibing, XU Rui. Large-scale inversion of Plio-Quaternary slip along the boundary faults between the South China, Sunda, and Shan blocks[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(8): 2833-2852.
- [37] 李永华, 吴庆举, 田小波, 张瑞青. 用接收函数方法研究云南及其邻区地壳上地幔结构[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 67-80.
LI Yonghua, WU Qingju, TIAN Xiaobo, ZHANG Ruiqing. Crustal structure in the Yunnan region determined by modeling receiver functions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1): 67-80.
- [38] 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(6): 1904-1914.
XU Yi, YANG Xiaotao, LIU Jianhua. Tomographic study of crustal velocity structures on the Yunnan region Southwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(6): 1904-1914.
- [39] 张路, 白志明, 徐涛, 武振波, 黄敏夫, 俞贵平, 陈俊磊, 郑孟杰. 哀牢山地区新生代岩浆活动与掀斜式抬升: 来自短周期密集台阵观测的证据[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(8): 1069-1082.
ZHANG Lu, BAI Zhiming, XU Tao, WU Zhenbo, HUANG Minfu, YU Guiping, CHEN Junlei, ZHENG Mengjie. Cenozoic magmatic activity and oblique uplifting of the Ailao mountain: Evidence from a short-period dense seismic array[J]. SCIENTIA SINICA Terrae, 2020, 50(8): 1069-1082.
- [40] 龙登红, 周小龙, 杨坤光, 辜平阳, 高银虎, 王树明, 陈桂凡. 青藏高原东北缘深部地质构造与地热资源分布关系研究[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 721-731.
LONG Denghong, ZHOU Xiaolong, YANG Kunguang, GU Pingyang, GAO Yinhu, WANG Shuming, CHEN Guifan. Research on relationship between the deep structure and geothermal resource distribution in the northeastern Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 2021, 48(3): 721-731.
- [41] 周真恒, 向才英. 云南岩石圈地温分布[J]. 地震地质, 1997, 19(3): 227-234.
ZHOU Zhenheng, XIANG Caiying. Distribution of the lithospheric geotemperature in Yunnan[J]. Seismology and Geology, 1997, 19(3): 227-234.
- [42] 曾敏. 重庆温泉分布与成因研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
ZENG Min. Distribution and genesis of Chongqing hot spring[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [43] 李传伟, 王宇, 曾威, 王家兴, 庄海俊. 红河流域元古界大红山群变质岩系的热储结构及热流特征[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 384-394.
LI Chuanwei, WANG Yu, ZENG Wei, WANG Jiaxing, ZHUANG Haijun. Geothermal reservoir structure and heat flow characteristics of proterozoic metamorphic rock series of Dahongshan group in Honghe river basin[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(3): 384-394.
- [44] 李冬怀, 程纪星, 万汉平, 谢迎春, 郝伟林. 西藏续近地热田“热水河”深部热源通道及其成因[J]. 世界地质, 2022, 41(2): 334-341.

LI Donghuai, CHENG Jixing, WAN Hanping, XIE Yingchun,
HAO Weilin. Deep heat source channel of "hot river" in Xumai

geothermal field, Tibet and its genetic mechanism[J]. [World Geology](#), 2022, 41(2): 334-341.

Characteristics of faults and their controlling effect on geothermal energy in Eryuan county, Yunnan Province

JIN Wenzheng^{1,2}

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geological Evaluation and Development Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract As a kind of green and clean energy, geothermal resources are new and renewable and play an important role in the future energy frame. Due to the unique tectonic location and intense fault activities, there exist favorable geological conditions for the formation and flow of geothermal water in Yunnan Province, especially in its western area, so geothermal resources are very rich. In order to analyze the structural factors of the distribution of geothermal resources in Eryuan county, Yunnan Province, this study focuses on two basic topics of the structural characteristics and fracture development mechanism of the key fault zones in Eryuan county, and selects several hot springs as research objects in Sanying town, etc. Through field geological surveys, this study calculates the stress-strain properties of different faults and predicts the fracture distribution under the background of different faults and multiple fault combinations, based on which a three-dimensional spatial model of the fault structures and hot springs in the study area has been established, showing the spatial relationship between the faults and geothermal energy in the county.

The study results on the faults show that there are many large fault zones developed in Eryuan county, mainly including Weixi-Qiaohou fault, Longpan-Qiaohou fault, Luopingshan fault, Heqing-Eryuan fault, Nandaping fault, Beipai-Zhengshengcun fault, etc. The fault trend is mainly NW-SE, with characteristics of multi-stage tectonic activity. Many scratches, steps and structural breccia can be found in the field, with obvious "compression-torsional" or "tension-torsional" characteristics. Several faults are cut and transformed by late tensile faults, and have typical "flower structure" on the cross sections. On the plane, the tectonic deformation in the west of the Beipai-Zhengshengcun fault is mainly ductile-brittle deformation in early tectonic uplift period. The area to the east of this fault is mainly brittle deformation, and the Neo-tectonic movement is manifested by obvious tectonic performance.

The theoretical calculation results show that the footwall of normal faults and the hanging wall of thrust faults have large normal stress values and shear stress values. During the formation and evolution of the faults, the two strata mostly form tractive anticlines, and the top of these anticlines are generally in an extensional stress state. Under the effect of gravity and other stresses of the overlying strata, the footwall of normal faults and the hanging wall of thrust faults are more likely to develop fractures near the faults, providing geological space for the flow or accumulation of hot spring water.

The analyses of the distribution of surface hot springs in Eryuan county show that the hot springs are mostly distributed in the areas with favorable fractures. The hot springs in Niujie town in the north of Eryuan county are located in the hanging wall of Heqing-Eryuan (thrust) fault zone, and at the intersection of late extensional faults. The outcrops of these hot springs are at relatively low altitudes. The hot springs near Eryuan county are located at the hanging wall of thrust fault (i.e. Beipai-Zhengshengcun faults), the arc turning of the fault, and the plane intersection of the NE secondary fault and the main fault. The hot springs in Sanying town are located at the intersection of Nandaping fault and multiple sets of normal faults in the northeast direction, at the foot wall of Nandaping fault at a relatively low altitude. A number of hot spring outcrops on the west side of Yousuo town are in beaded distribution on the plane, consistent with the north-south strike-slip faults (i.e., the Xunjiancun fault), and are located at the middle and south ends of the strike-slip faults, both of which are the intersection of the strike-slip faults and the north-east faults.

To sum up, faults have an obvious control effect on the hot springs in Eryuan county. The big cutting depths of large strike-slip faults are conducive to the communication of the deep heat source. That is to say, as important channels for the upwelling of deep magma, these faults are geologically manifested that a number of magmatic intrusions or veins are distributed along strike-slip faults, with relatively high geothermal gradients. In the later stage, a large number of tensile faults are developed, generally in the northeast direction. Most of them are "open", and some of the transverse sections of the faults can be characterized by V-shaped structures. Hot spring water can generate underground runoff along the tensile faults. Since the footwall and hanging wall of the normal faults can be classified as fracture development zones, hot springs can be concentrated in these fracture zones, at the intersection of faults with different directions and at the pinch-outs of faults. Under the comprehensive influence of multiple factors such as altitude and Quaternary, hot water is exposed to the surface to form hot spring spots.

Key words fault, fracture, stress, geothermy, Eryuan county

(编辑 杨杨)

《中国岩溶》2023 年度优秀论文评选

为进一步增强《中国岩溶》在学术界的影响力，鼓励广大作者创作出更多高质量的科技论文，《中国岩溶》编辑部组织开展了 2023 年度的优秀论文评选活动，以表彰本刊的优秀作者。评选范围是《中国岩

溶》2022 年度正式发表的论文，主要参考研究热点、研究方向及被引用数据和下载量(官网、CNKI 数据库)等指标，选出 10 篇优秀论文，结果现予公布：

序号	论文标题	作者	年卷期页
1	我国北方岩溶泉域生态修复策略研究——以晋祠泉为例	王焰新	2022, 41(3): 331-344
2	我国岩溶地区碳汇研究进展与展望	蒋忠诚, 章程, 罗为群, 肖琼, 吴泽燕	2022, 41(3): 345-355
3	基于AHP和GIS技术的湖南怀化地区岩溶塌陷易发性评价	吴远斌, 刘之葵, 殷仁朝, 雷明堂, 戴建玲, 罗伟权, 潘宗源	2022, 41(1): 21-33
4	西南喀斯特区土壤侵蚀研究进展	李成芳, 王忠诚, 李振炜, 徐宪立	2022, 41(6): 962-974
5	古岩溶油气储层研究进展	张宇, 赵伦, 李长海, 张祥忠	2022, 41(5): 808-824
6	重庆中梁山岩溶地面塌陷特征及形成机理	周正, 李大华, 廖云平, 林军志, 张烨, 陈洪凯, 祁永爱, 王贺	2022, 41(1): 67-78
7	西南岩溶山区地下水资源评价方法对比研究——以寨底地下河流域为例	杨杨, 赵良杰, 潘晓东, 夏日元, 曹建文	2022, 41(1): 111-123
8	微生物诱导碳酸盐岩沉淀过程及作用机理	高旭波, 潘振东, 龚培俐, 江玉, 李成城, 李鸿煜	2022, 41(3): 441-452
9	喀斯特地区地球关键带科学与生态水文学发展综述	陈喜, 张志才	2022, 41(3): 356-364
10	喀斯特石漠化治理措施对土壤颗粒有机碳与团聚体有机碳的影响	蓝家程, 王俊贤, 王莎莎, 祁雪, 龙启霞	2022, 41(5): 773-783