

第一篇 区域地质构造 与地震活动

清江流域规划表明^[1] 流域内及边缘地区的地质构造、地震活动、活动断裂与地壳稳定性，对流域水利资源梯级开发具有重要的深远意义。

清江流域及其周缘地区，大地构造归属于扬子准地台的二级单元八面山台褶带^[2,3]，该台褶带展布于鄂西南、湘西北地域 北部与鄂西 – 鄂中褶皱断块区相邻，西部与四川台坳盆地毗连，而清江流域的河口地段则展布在江汉盆地边缘。

根据构造体系划分，清江流域主要展布在新华夏系第三隆起带的中南段，只有河口地段展布在新华夏系第二沉降带的江汉沉降区边缘^[4]。流域内基本上展布在川东-鄂西南新华夏系北北东向构造带及其北延。中、下游地区，受其北侧黄陵地块阻挡，折转为近东西向构造，但与北北东向构造带同属新华夏系第三隆起带。东西向构造主要包括长阳复背斜、五峰背斜、渔洋向斜及与其匹配的天阳坪、渔洋关、仙女山、松园坪等断裂。中、上游地区 北北东向构造带主要由半峡大背斜、白果坝大背斜、齐岳山大背斜、四川境内的方斗山大背斜，以及它们之间的宽缓向斜所组成，并同生了一系列北北东向断裂，如齐岳山断裂、建始断裂、恩施断裂、杨柳池断裂、龙王冲断裂等。区域内褶皱属典型的“隔挡式”褶皱组合形态，即背斜紧闭，向斜平缓开阔。这种褶皱格局由地壳上部的盖层沿上地壳下部的基底滑动而形成，即整个地壳变动事件发生在岩石圈表部，是一种表层滑脱，与深部构造关系甚弱，因而有利于地壳的整体稳定性。

本篇在系统论述清江流域的地质环境之后，引入 TM 卫星遥感图像 提取活动构造信息。本篇对清江流域及其边缘的新构造运动、地震活动进行全面、系统的论述，而过去只对流域中的某些地段进行分析研究，因此对全流域进行系统论述可说尚属首次。

第一章 区域地质背景*

本章讨论的清江流域及其边缘地区，其区域范围在北纬 $29^{\circ}30'$ ~ $31^{\circ}10'$ 和东经 $108^{\circ}30'$ ~ $111^{\circ}30'$ 之间，区域内以震旦系到三叠系的沉积岩建造为主，构造变形主要形成于燕山运动时期 但受黄陵地块抵制干扰 局部应力场变化较大^[5] 褶皱走向变化也较大。

第一节 区域地质建造概述

清江流域以沉积岩建造为主，分布有震旦系到下第三系地层，而在流域外东北边缘的黄陵地块可见到前震旦系变质岩、岩浆岩的出露。根据地质建造系统与构造环境变迁的组合关系，清江流域及其边缘大致可分为 3 个大的构造层：即前震旦纪结晶基底构造层，震旦纪-三叠纪构造层和中新生界上叠构造层。每个构造层的地层岩性组合及其空间分布，记录了地质时期区域地质环境的变迁过程，并成为活动断裂及评价地壳稳定性的基础资料。另一方面，岩石物性差异对地壳稳定性评价也有一定影响，因此将清江流域区域地质建造系统划分为变质岩建造、岩浆岩建造、碳酸盐岩建造、薄层泥页岩建造、砂岩和砾岩建造等几种类型(图 1-1-1)。

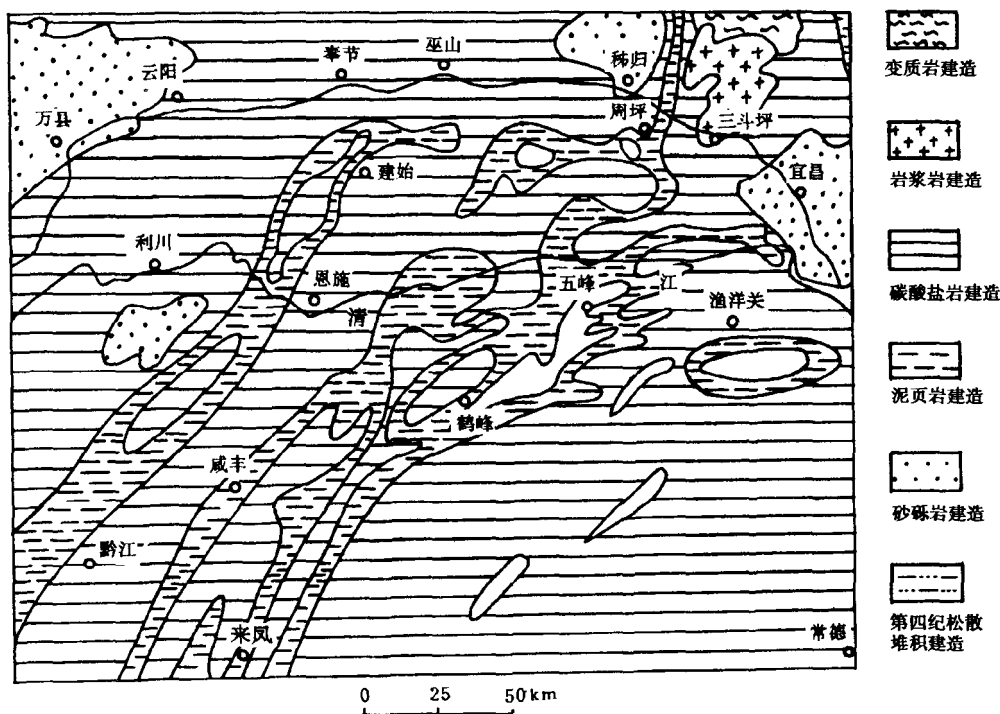


图 1-1-1 清江流域区域地质建造分布图

* 本章作者 徐瑞春 谢广林 吴树仁

1. 变质岩建造

为前震旦系结晶基底的崆岭群（2300Ma 左右）变质杂岩，出露于清江流域东北边缘之外，展布在黄陵地块，由斜长片麻岩、斜长角闪岩、含石墨片麻岩、片岩等组成，形成于晋宁期（900~800Ma），为地下深部地热作用所形成的变质岩。

2. 岩浆岩建造

出露于清江流域外的黄陵地块中南部，为晋宁期侵入岩，主要由基性、超基性和中酸性岩组成的杂岩体（915~700Ma）。

3. 碳酸盐岩建造

在清江流域内分布最广约占流域面积的 72%，可分为薄层灰岩、厚层灰岩及白云岩、白云质灰岩。前者主要为震旦系上统、二叠系和三叠系下、中统大冶群和嘉陵江组，后者主要为寒武系、奥陶系。清江中、上游除了局部地段出露寒武系、奥陶系之外，广泛出露着三叠系、二叠系；清江中、下游地区主要出露震旦系、寒武系和奥陶系。清江干流三个大的水利枢纽坝址所在的地层层位分别为：隔河岩坝址建于寒武系中统灰岩之上，高坝洲坝址建于寒武系中统灰岩之上，水布垭坝址建于二叠系下统灰岩之上。

4. 薄层泥页岩建造

主要为志留系、泥盆系上统、石炭系和二叠系部分地层，其中夹有多层软弱泥岩，为易于发生山体滑坡、崩落及地面扰动的岩性组合。这套岩层在清江流域的分布仅次于灰岩，且常与灰岩呈夹层或互层分布，主要出露在清江中、下游地区。清江中、上游地区在恩施盆地以西至屯堡一带分布较广，其他地段均呈狭长条带状展布。

5. 砂砾岩建造

主要出露在侏罗纪和白垩纪—早第三纪形成的盆地之中，如利川南侧的侏罗纪盆地、建始白垩纪盆地、恩施白垩纪盆地等，均展布在清江上游地区；河口地区则可见到下第三系砂砾岩出露，并与江汉盆地连成一片。

第二节 区域构造格架

清江流域沉积盖层的褶皱变形属于新华夏构造体系的组成部分，但受到其东北边缘黄陵地块的抵制，区域构造形迹的走向发生很大的扭动变形^[5]，即有北北东向、北东向（含联合弧形）和东西向褶皱带（图 1-1-2）和相应的断裂系。

1. 北北东至北东向构造带

北北东至北东向构造为清江流域最重要的构造带，也是为清江流域构造格架的主体，属于新华夏系第三隆起带的中南段，主要由北北东向褶皱和断裂组成，部分由北东至北东东向弧形复式褶皱带及相伴生的压性、压扭性断层带组成。由于北北东向褶皱带与东西

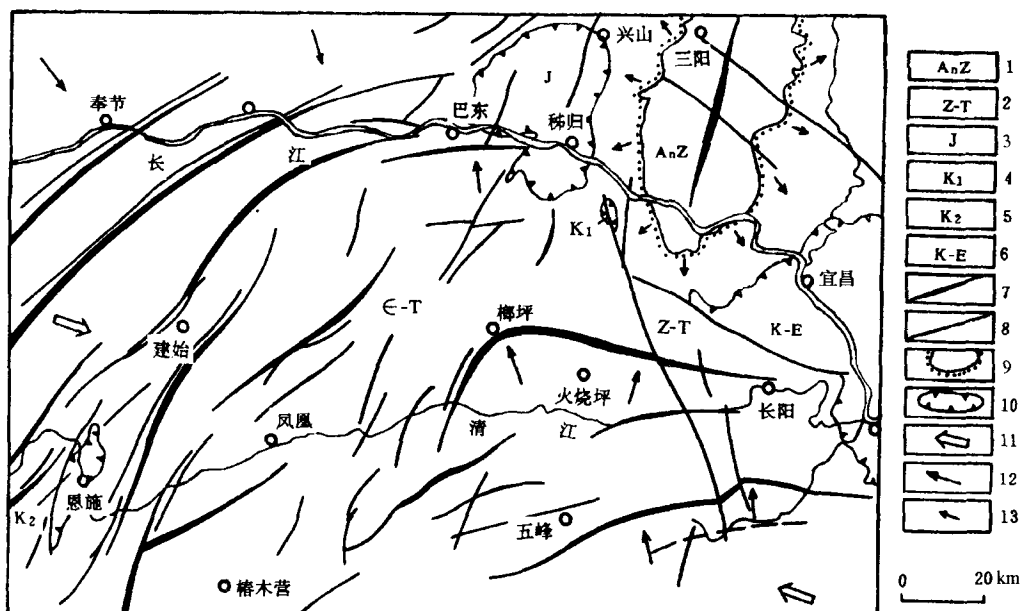


图 1-1-2 清江流域燕山运动的构造应力作用示意图

- 1 前震旦系结晶岩;2. 震旦系-三叠系;3. 侏罗系;4. 下白垩统;5. 上白垩统;6. 白垩系-下第三系;
7. 背斜轴;8 断裂;9. 结晶边界;10. 盆地边界;11 区域应力作用方向;12. 局部应力作用方向;
13. 抵制反作用力和隆起派生侧应力作用方向

向褶皱带呈弧形过渡，故也称为新华夏联合弧或八面山弧形构造带^[4]。构造带的总体展布特征表现为：①从北向南北东向构造带呈“喇叭”状逐渐散开；②褶皱组合特征为比较典型的侏罗山式，背斜相对较紧闭、局部倒转并伴生有区域性的大断裂；向斜相对较平缓开阔，伴生断裂规模较小。根据背斜和区域性断裂的组合关系，北北东向构造自西向东可分为3个相互平行的二级构造带，即齐岳山褶断带、中央复式褶断带和新华-半峡-鹤峰褶断带。

2. 东西向构造带

近东西向构造带主要分布在清江下游的长阳-五峰一带，由东西向长阳复背斜、五峰复背斜和渔洋关断层等组成。它们本属于新华夏系的组成部分，但由于黄陵背斜的抵制与局部应力场的变化而扭转呈近东西向。

3. 北北西向断裂带

北北西向断裂带分布在流域东部，包括仙女山断层带、松园坪断层。这些断层带大致形成于燕山运动早期，但在燕山运动晚期均表现为伸展型张性断陷，而它们在后期的活动对清江大型水电工程建设有一定影响。

第三节 地壳结构和深部构造

根据有关地球物理研究资料和研究成果^[6,7]，现将清江流域及其边缘地区的地壳层

圈结构、重力场异常和深部断裂特征综述于下：

一、地壳层圈结构特征

1. 层圈结构基本特征

人工地震测深、重力反演和航磁测量资料表明，区域地壳具有多层结构，成层性好。依据地壳波速差异可将其分为 3 大层 即上地壳、中地壳和下地壳。

上地壳底面埋深 12.0~16.8km，包括结晶基底和上覆沉积盖层两个亚层。盖层底面埋深为 0~8.2km 图 1-1-3) 层内波速纵向变化为 5.2~5.6km/s^[7]。结晶基底厚 7.2~14km 层内波速为 6.0~6.3km/s 平均波速为 6.13km/s；最厚处位于黄陵隆起，波速为 6.0km/s，略低于两侧波速。清江流域的大多数地震的震源深度位于基底层 6~10km 范围内，局部浅源地震位于基底顶面或盖层中。

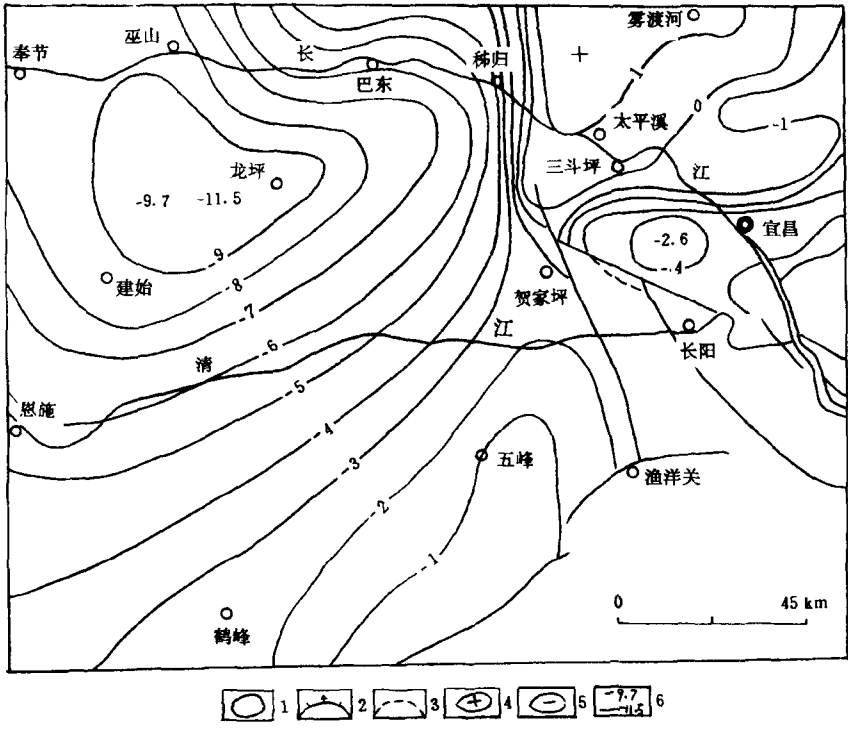


图 1-1-3 清江流域基底顶面等高线图

- 1. 基底埋深等高线 (km); 2. 地表断层; 3. 推测基底断层;
- 4. 基底隆起; 5. 基底凹陷; 6. 凹陷内最小埋深标高值 (km)。

中地壳底面埋深 24~28.8km 东浅西深 平均波速为 6.25km/s 推测为闪长质岩层。中地壳厚度变化比上、下地壳厚度变化小得多。

下地壳的莫霍面埋深为 33.8~46.8km，东浅西深。下地壳平均波速为 6.70km/s 推测其为玄武质岩层。

2. 前震旦纪结晶基底

据航磁资料和人工地震测深剖面资料分析, 结晶基底顶界面起伏变化较大, 最大差值为 13.5km 并在区域内存在着 2 个凹陷和 2 个隆起即: ①巴东-建始凹陷 其中心在建始-龙坪一带 走向近东西向 最大深度为 -11.5km 是区域上的最大凹陷; ②枝江凹陷 走向北西西 最大深度为 -7.9km; 黄陵隆起, 黄陵背斜走向北北东, 出露地表 1km 左右, 西南侧与建始-巴东凹陷相邻, 东南侧与枝江凹陷相邻, 坡度均较陡; ④走马坪-五峰隆起 走向北北东 最小埋深为 -1km。

总之, 前震旦系结晶基底在地壳演化中经历过强烈的变形, 并对盖层构造的形成和发展具有重要的控制作用。

3. 莫霍面形态特征

根据重力反演得到本区地壳莫霍面埋深为 34~40km, 其形态与布格异常相似 (图 1-1-4) 重力梯度呈慢坡带 不存在切壳断层。莫霍面由东向西下倾 东部为江汉平原慢隆区, 西侧的巴东附近有一慢凹。莫霍面的总体形态与地面形态呈镜像关系, 表明区域地壳基本处于均衡状态。

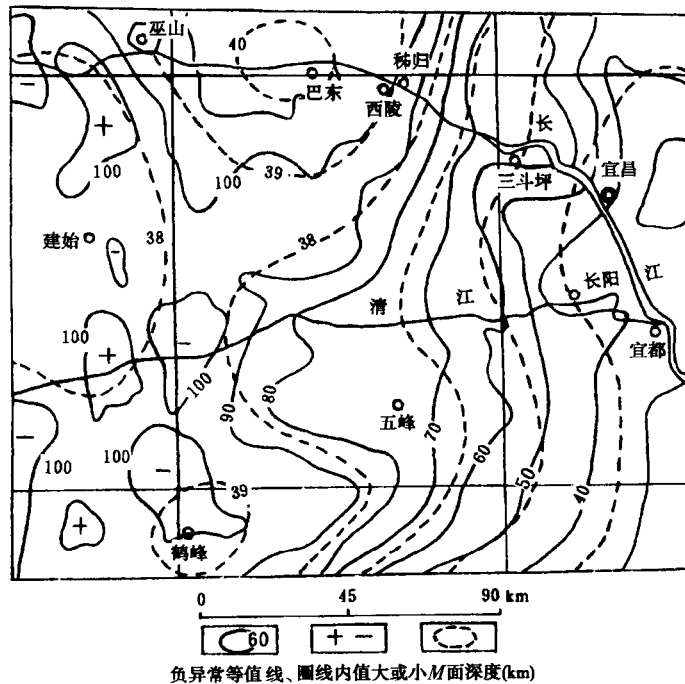


图 1-1-4 区域布格重力异常和 M 面深度分布图

二、区域重力场特征

1. 布格重力异常场

重力资料表明, 区域范围内的布格重力异常值在 $-40 \times 10^{-5} \sim -120 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 范围内变化 由东向西 负异常值逐渐增大 (图 1-1-4)。清江流域中下游布格重力异常梯度

坡比较陡,东界异常值为 $-40 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 西界为 $-90 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。梯度坡等值线北宽南窄。北部宽达 196km 平均梯度为 $0.3 \times 10^{-5} \text{ m/(s}^2 \times \text{km)}$ 南部最窄处仅 48km 平均梯度为 $0.9 \times 10^{-5} \text{ m/(s}^2 \times \text{km)}$ 。布格重力异常梯度坡的形态与人工地震得到的莫霍面形态基本一致 也就是说 它主要反映了莫霍面的陡斜坡。

2. 均衡重力异常场

根据区域重力测量资料和地形高程资料所计算的均衡重力异常结果表明,区域均衡重力异常值在 $-20 \times 10^{-5} \sim +32 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间,流域内绝大多数地区的异常值处于 $-10 \times 10^{-5} \sim +24 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间(图 1-1-5)。全区均衡异常平均值为 $2 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 表明本区地壳整体上已基本处于均衡状态。事实上区域均衡程度并不均一,正、负均衡异常分布具有条块特征。负异常区包括宜昌以东的负异常带,沿长江分布的北西西向负异常带以及建始-恩施北北东向负异常带。它们的异常值均在 $0 \sim -24 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间,且三个负异常带连成一个整体,中间为黄陵背斜正异常地块。正异常区位于长江以南、长阳-石门以西、建始-恩施以东的区域,几乎包括整个清江流域,其异常值在 $0 \sim +24 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 之间。

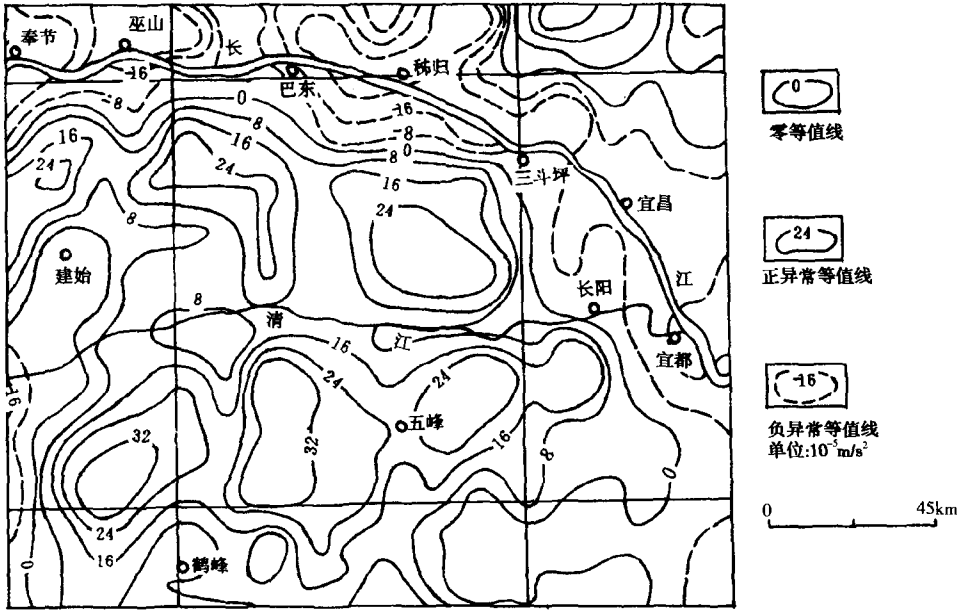


图 1-1-5 清江流域及外围重力均衡异常图

均衡重力异常分布与新构造运动有一定的关系,正异常区为新构造运动的隆起区,负异常区为新构造运动的沉降区或隆起区中的相对断陷、拗陷地区。活动断层的分布常与均衡正、负异常交接带和弱负异常区有关, $M_s \geq 5$ 级地震多数发生于正、负异常交接带附近。显然,区域均衡重力异常分布与活动断层和地震活动有较密切的关系。

三、断裂切割深度

清江流域及其边缘地区，只有北北东向的齐岳山断裂切割到下地壳，并成为新华夏系南段第三隆起带与第三沉降带的分界线。北北西向的仙女山断裂和北西西向的天阳坪断裂错断结晶基底层底面，断距 1~3km。北北东向的恩施、咸丰、建始、大青山、龙王冲等断裂，都切错至结晶基底层之中。此外还有一些断裂只切错了沉积盖层。这些断裂绝大多数形成于燕山运动时期，并在区域构造变动中，对沉积盖层、以至结晶基底层变形产生较大的影响；在新生代的构造变动中，它们的活动也对沉积盖层和地貌的形成具有一定的改造作用。

四、区域地壳结构三维图解

为了直观地表示上述区域构造格架、地壳结构和断裂切割深度，这里采用简明三维图解展示区域地壳结构的基本特性（图 1-1-6），重点显示剖面上的层状物性界面和主要断裂

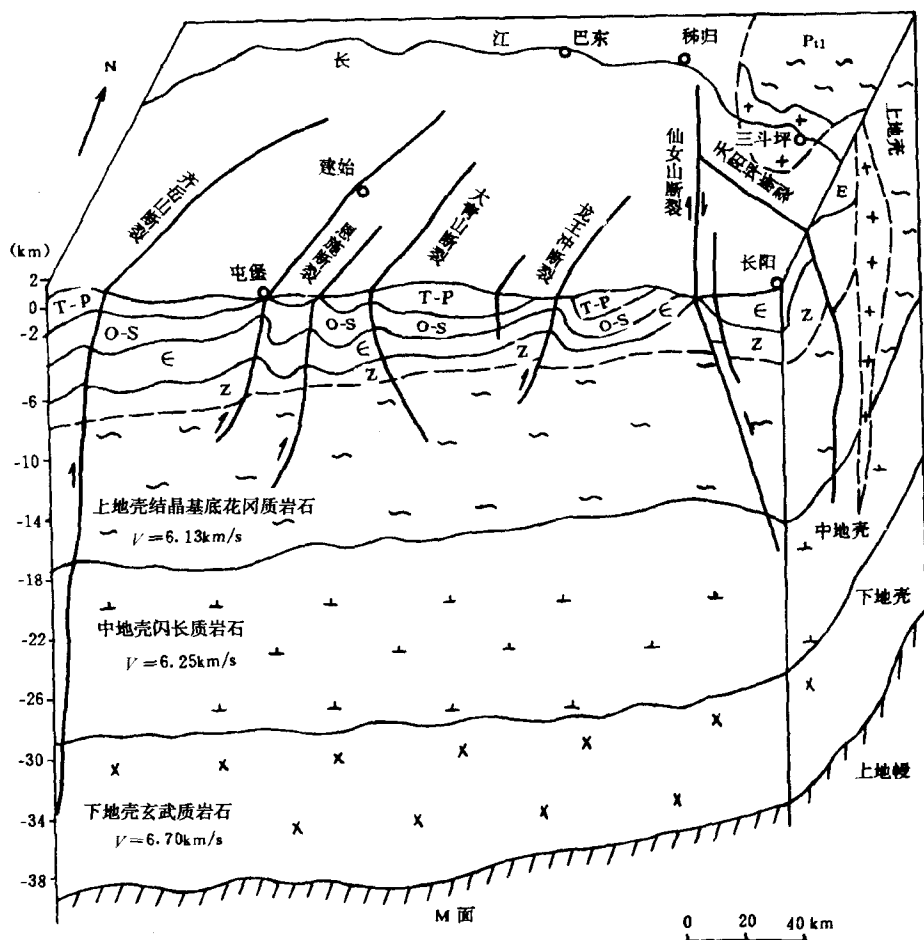


图 1-1-6 清江流域地壳结构三维图解

带的切割深度（剖面比例尺比平面大 5 倍）。主体剖面线大致平行清江呈东西向展布（即大致从长阳到屯堡一线），平面向北延伸。在若干重要物性界面中，基底顶面分布深度资料较详细，故图解中的基底顶面形态及断裂切割深度均以实际资料为准；中地壳上、下界面和莫霍面的分布形态则含有推测的成分。平面上为了减轻图面负担，只是简要地表示了若干区域性断裂，而它们的切割深度也以实测资料为准，并相应地表示在剖面上。

第四节 区域构造运动的演化进程

清江流域及其边缘地区 经历了多期次的构造运动 其中有 5 期对区域地质建造和构造格架的影响最为重要。

一、吕梁 — 晋宁运动：基底形成阶段

元古代发生的吕梁 — 晋宁运动是本区内地壳早期（23~8Ma）经历的一系列强烈构造运动，使扬子地区广泛发生剧烈的构造变质热事件（23~12Ma），造成元古代地层的区域变质和强烈褶皱隆起，并伴有断层和多期岩浆侵入活动，形成一套片岩、片麻岩、混合岩组成的结晶基底，如出露在清江流域东北缘的黄陵地块。自此以后，区域地壳进入长期的相对稳定发展阶段。

二、加里东 — 海西运动：盖层形成阶段

从震旦纪到中三叠纪，扬子地台处于相对稳定的整体沉降，以海相沉积为主，广泛沉积碳酸盐岩，岩相、厚度较稳定，其中震旦系到志留系是一个大的海相沉积旋回。志留纪末期加里东运动使扬子地区隆升为陆地，构成泥盆系与志留系地层之间的假整合，普遍缺失上志留统—下泥盆统。中泥盆统到中三叠统又是一个海相沉积旋回，而发生在石炭纪至二叠纪期间的海西运动，则形成几个地区性或局部性的地层假整合。

三、印支运动：地壳隆拗阶段

印支运动（晚三叠世）使区域建造和构造格架发生明显变化。中三叠世末的扬子地区整体海退，中、上三叠世出现区域性沉积间断，晚三叠世广泛出现陆相沉积，古地理面貌发生重大变化，晚三叠世以后的沉积建造只存在于局部凹陷区。与此同时，黄陵地块基底隆起，并在西侧形成了侏罗纪拗陷盆地，即秭归盆地。该阶段初步形成了基底构造隆拗格架，并使扬子地台，逐步进入活化的构造变动阶段。其大地构造的动力学背景主要表现为：中国东部的南华亚板块与华北亚板块开始逐步拼接碰撞^[8]，秦岭造山带基本定型。

四、燕山运动：盖层构造格架形成阶段

燕山运动的动力学背景主要表现为：亚洲大陆相对太平洋板块向南扭动的同时，兼有

近东西向的碰撞挤压，因此形成中国东部北北东向的新华夏系构造带。燕山运动早期，清江流域及其边缘在北西西－南东东向的区域应力场控制下，清江下游地区发育了一些北西西向、近东西向的张性、张扭性破裂，形成一些角砾岩。它们包含在后期的压性片状构造岩之中，如天阳坪断裂和渔洋关断裂的片状构造岩中，有的即可见到砾径数厘米的棱角状砾石，它们由钙质胶结而成。但是，下游地区这种作用方式的持续时间比较短暂，因为在其北侧的黄陵背斜下元古界结晶岩系，根基扎得比较深，结晶基底面埋深达 14km 左右，对其周缘沉积盖层的褶皱变形产生强大抵制与干扰作用。另一方面，黄陵背斜西缘的侏罗纪秭归盆地，在燕山运动初期为一应力薄弱区域，不同方向的应力作用在此汇集，从而影响了其周缘地区的构造变形。据马宗晋的研究^[3]，北西西－南东东向的区域主压应力，在结晶基底黄陵背斜的抵制下和秭归盆地的弱应力区的影响下，区域应力作用方向发生分解和产生新的合成，并在黄陵背斜南侧形成了近南北向压应力作用的局部应力场，它从燕山运动中期开始，一直持续到燕山运动末期，从而导致形成了近东西向的长阳复背斜及其弧形构造，而燕山运动初期发育的北北西向天阳坪断裂、近东西向渔洋关断裂的角砾岩带，也被挤压形成片状构造岩。这种局部应力场的变化，自清江河口向西至榔坪一带，再往西又恢复到区域应力场的总体格局（图 1-1-2），形成了一系列北北东走向的箱状褶皱形态及其伴生断裂。

五、喜马拉雅运动：变形调整阶段

喜马拉雅运动时，印度板块向北部的欧亚板块强烈俯冲挤压，形成地球上最为壮观的喜马拉雅造山带。在清江流域（南北构造带以东），这种俯冲碰撞在清江流域转化为北偏东斜向挤压，并与东部太平洋板块运动相叠加。喜马拉雅运动具有多期次的构造变形，而且在清江流域及其边缘主要表现为隆升及稳定的节奏性变化，因此形成了多级夷平面。另外，构造运动还使白垩系－下第三系红层发生轻微变形，断裂继承性活动明显，但活动方式和性质发生较大变化与调整。构造应力场主要表现为北偏东向的挤压，使天阳坪断层挤压逆冲，并使古生代地层逆冲在白垩系红层之上。而清江上游的建始、恩施、咸丰等北北东向断裂则普遍发生左旋剪切滑动，并向红层扩展，形成脆韧性剪切网络。

第二章 活动构造的 遥感信息分析*

TM卫星图像具有视野广阔、信息丰富的特点。图像中所显示的颜色、形状、位置、阴影和纹理等，都是研究活动构造的重要标志。TM卫星图像不仅客观反映活动构造的有关信息，而且可以从宏观上进行区域性整体分析。因此利用1:10万TM卫星图像可以分析清江流域及周缘地区的断裂、盆地、环形构造的展布位置、几何形态及新构造时期的活动表现，并讨论活动构造所处的地质环境、组合特征、形成演化过程与地壳稳定性。

第一节 卫星遥感信息的区域分析

在1:10万的TM假彩色合成图像中，清江流域的影像色彩、图斑、纹理以及它们所显示的地貌类型与形态，水系型式与谷地形态，褶皱、断裂及其他线性影像的表现，地层——特别是第四系的发育状况等，在不同地段均呈现出不同的信息特征，并可将清江流域划分为5个信息特征地段：

1. 河口地段

位于云坡老—城池口—鄢家沱以东至长江岸边的距离6km左右。该地段在TM假彩色合成图像上呈浅色彩，河岸边色彩略深一些，图像上星斑点密集展布。地形起伏很小，广泛为中更新统-全新统冲积物所覆盖，局部可见到红岩出露。该地段线性影像极其隐晦，天阳坪断裂带以弱浅色线展布其中，且南、北分支断裂在此地段内延伸2~3km即消失，只有中间的主干断裂呈南东方向延伸至长江右岸，而后隐伏于江中，再继续出现在长江左岸。另有一条隐晦的北北东向线性影像，时断时续地展布于长清—罗家坪一带，它是否属于断裂，尚待今后的进一步研究。

2. 下游地段

位于西寺坪沿市口以东至城池口一带，东西直线距离20~22km。该地段在TM假彩色合成图像上以浅色彩为主体，略为深一些的色彩呈片块状，条带状穿插其间，图斑纹理清晰，阴影明显。浅色调为第四系覆盖区或志留系砂页岩裸露区；红岩组成的低丘也呈浅色调，而红岩及其他岩层所形成的侵蚀构造高丘与低山则呈深色调。该地段主要为低山、丘陵所盘踞，水系较密，河谷地貌发育良好。该地段主要展布着一系列近东西向、北西西向的线性影像，但有的线性清晰，有的线性隐晦，有的为两种色彩、图斑的分界面，有的则形成了色调带。这些线性影像并不全都属于断裂，在该地段内有的属于山脊线，有的为

* 本章作者 谢广林 孔凡健

两种地层、岩性的分界面，但多数仍是断裂的线性信息。在该地段内，图像上最瞩目的有两条断裂，即天阳坪断裂带和梁山断裂。位于清江左岸的天阳坪断裂带东段由三条平行分支断裂组成，图像上表现为两条浅色调夹一条深色调带，两条色调带之间呈现较明显的地貌反差。位于清江右岸的梁山断裂在图像上为两种色调、图斑的分界面。南侧为海拔近1000m的岩溶台原，北侧为长垣状丘陵。沿断裂断层三角面发育良好、排列整齐。显然，这两者是下游地段最重要的断裂带。

3. 中游地段

位于龙王冲以东至沿市口一带，东西直线距离70多km。该地段在TM假彩色合成图像上主要呈深色彩，其间夹着一些浅色调带，但图形复杂，图斑纹理多种多样，包括羽状纹理、纺锤形、椭圆形图像、豆粒状图斑等形式。该地段除东北角展布着低山、东南角展布着岩溶台原之外，普遍为海拔1000~2000m的中山地形所盘踞，山高谷深，阴影明显，坡地陡峻。浅色调带者除一部分属于志留系砂页岩裸露区外（志留系砂页岩并非全都呈浅色调带），大部分仍为第四系所覆盖，它们主要展布在河谷中和岩溶区。河谷中以含碎石坡积物为主，局部可见到冲积物；岩溶区的洼地、盆地和干谷中则普遍堆积着粘土状残坡积物。该地段展布着近东西向、北西西向、北北西向、北北东向、北东向和北东东向等多组线性影像，但除局部地区线性较密集外，一般线性均较稀疏。这些不同走向的线性影像彼此各占一方：近东西向线性主要展布在清江干流两侧22~28km的范围内，北西西向线性占据该地段的东北部，以天阳坪断裂带的影像较清晰；北北西向线性展布在仙女山—渔洋关一带，以仙女山断裂带和松园坪断裂的规模较大，影像最瞩目，切错和限制近东西向、北西西向线性影像；北东向线性散漫地展布在仙女山断裂带以西，零星出现；北东东向线性展布在该地段南侧分水岭附近，线性密集，影像瞩目，有的呈S形展布。总之，该地段以下列三条线性影像最为瞩目：①北北西向仙女山断裂带的线性构造；②北东至北东东向的鹤峰—土坪线性构造，现通过野外工作已确认为一条S形断裂；③近东西向的井水—秀峰桥—杨树坪线性影像（像片1），位于火烧坪北面，是否属于断裂尚待今后的考证。

4. 中上游地段

位于莲花坝以东至龙王冲一带，东西直线间距离60多km。在1:10万TM假彩色合成图像上，该地段中部呈浅色彩，南、北两侧色彩较深，豆粒状图斑几乎展满全区，成为该地段最突出的图像景观，只有南、北分水岭附近出现了一些菱块状和羽状的纹理。该地段普遍为海拔1200~1600m的岩溶高原、山原所盘踞。高原与山原上，浑圆状的岩溶浅丘波状起伏，溶蚀洼地、溶斗、盲谷、干谷发育，但清江的支流大多形成深切河谷，谷地的中、上层坡陡崖发育，阴影明显。在河谷和岩溶负地中广泛为第四纪残坡积物所覆盖，它们在图像上色调最浅。该地段南、北两侧的分水岭附近，展布着一些北东东走向和近东西走向的岩溶中山。该地段的线性影像只有少数较清晰，一般都比较隐晦，而且大多呈时断时续，时隐时现。这些线性影像依其走向可分为北北东向、北东向和北东东向三组，它们在清江左岸分布比较稀疏，在清江右岸却比较密集。值得注意的是在宣恩县东北部，一系列北东东向线性密集成群，彼此并列展布，两线间距0.5~1.5km，使该地的图像呈现刀砍状，并与一些北北东向、北西向线性相互交切。这些线性影像是否属于断裂、裂隙或是其他地

质现象,尚待今后野外地质工作的考证。另外,在南侧分水岭以南,有一系列呈舒缓波状的北东向线性构造,延伸长达 50km 左右,影像极其瞩目,断层三角面和断层崖排列整齐,呈现出较明显的活动性。

5. 上游地段

位于莲花坝以西至齐岳山山脉,东西直线距离近 100km。该地段在 1:10 万 TM 假彩色合成图像上,表现为浅色彩与深色彩相间展布,豆粒状图斑与羽状图形相间出现,呈现出不同的图像景观与地貌景观。豆粒状图斑者为海拔 1200~1600m 的岩溶高原与岩溶山原的图像景观,高原与山原面上波状起伏,岩溶丘陵、岩溶盆地、洼地、干谷、盲谷发育,利川境内岩溶盆地较多,它们的图像多呈斑状浅色调,盆地规模较大,白果坝盆地展布面积达 40km² 以上。清江发源于齐岳山,向东奔流至长堰槽西南侧,后转入地下形成暗河,再从庙门坡附近流出地表,整个暗河段长近 9km,暗河段之上保存着影像清晰的古干谷形态,显示了暗河段应在古干谷之后发育的。羽状图形者一般为海拔 1800~2000m 的岩溶中山或砂砾岩中山的图像景观,它们呈北北东走向,明显受褶皱形态与构造线走向所控制。但是,白垩—早第三纪成生的建始、恩施、来凤三个盆地,不仅图形、纹理各异,色彩也差异很大,这可能与它们在新构造时期的活动各异有关。图像信息表明,该地段以北北东向、北东向的线性构造为主体,影像清晰,即使在岩溶高原之中,也有明朗的线性显示,它们多呈浅色线,一部分为深色线,一部分为两种色彩的分界面,还有一部分为两种图形、图斑的分界面。这些线性构造规模较大,长数十至 100 多 km,大部分属于断裂,有的还具有较明显的活动形迹。该地段南部,包括来凤等地,还展布着一系列北西向的线性影像,它们与北北东向断裂交切,但规模较小,长一般为 10~20km,其中有一部分可确认为断裂,更多的尚待于今后的验证。

综合以上的讨论可以看出,在 TM 卫星图像上,清江流域的五个信息特征地段比较分明,各地段的图像景观、地貌景观、地质构造景观都有各自的特色,但是除了上游地段与中上游地段的分野边界比较明朗之外,其他均呈模糊状态。

第二节 活动断裂的影像标志

活动断裂在 TM 卫星图像中具有丰富的影像信息,但不同区域因断裂的活动状态不同,因此信息特征也有所差异。清江流域活动断裂的影像信息主要表现为:

1. 活动断裂的线性信息

活动断裂在卫星图像中一般都具有清晰的线性影像,而且线性愈明显、愈醒目,断裂的活动性也愈强,因为活动断裂可造成其电磁波辐射与两侧地质体具有很大的差异^[9,10],所以在电磁效应的遥感图像中可以获得清晰的线性影像。仙女山断裂、恩施东断裂等瞩目的线性影像反映了它们在新构造时期具有明显的活动;杨柳池断裂、刘家包断裂的线性信息比较隐晦,影像时断时续,反映了它们在新构造时期的活动比较弱。但是,根据线性的明朗程度判断断裂的活动性,必须考虑其他因素的影响,例如在第四系覆盖下,隐伏断裂的电磁效应常被削弱,线性影像比较隐晦;倘若断裂富含裂隙水,则线性影像比较清晰。

2. 线性的几何图形

断裂的线性几何图形 如平直线、弧形、舒缓波状曲线、锯齿状曲线等，一般可以反映断裂成生时的力学性质^[4]，但不一定能说明新构造时期断裂活动的力学性质，因为活动断裂往往追踪其成生时的轨迹而进一步发展，只有当断裂的活动比较强烈时，才可能改造断裂原来的线性轨迹与图形。这种现象在清江流域及其边缘地区极其罕见，只有仙女山断裂略有所表现，其他断裂的活动性大多数比较弱，它们的线性图形更难以说明其在新构造时期活动的力学性质。

3. 不同色调、不同图形的分界面

不同的地质体、不同的地貌类型 在 TM 假彩色合成图像中，常呈现出不同的色彩和不同的图形，这两者的分界面有时可成为活动断裂的影像信息，因为两种地质体、两种地貌类型的分界线，往往受活动断裂所控制。齐岳山断裂的线性影像虽不十分鲜明，但是该断裂与深、浅色调的分界面、岩溶高原与岩溶山原的分界线等吻合成一体，并显示其具有一定的活动性。

4. 沿断裂的构造地貌影像标志

清江流域基本上都位于新构造运动隆起区之内，因此断裂活动所塑造的构造地貌形态在 TM 卫星图像中一般都有良好的显示。主要如下：

(1)断层崖：卫星图像上，断层崖的阴影明显，色调阴暗，具有一定的延伸长度。TM 卫星图像的信息表明，清江流域及其边缘地区断层崖比较少见，只有仙女山断裂的北段、中段，恩施东断裂，齐岳山断裂南段的东侧分支断裂有所发育，在流域南侧分水岭附近的一些北东东向 S 形断裂也有所显示。1:10 万的 TM 卫星图上，仙女山断裂的断层崖时断时续，只在局部地段比较清晰，但阴影带较宽，显示了断层崖比较高峻挺拔。

(2)断层三角面：沿断裂发育的断层三角面，在清江流域及其边缘地区屡见不鲜，TM 卫星图像上影像清晰，并沿断裂呈线性排列。齐岳山断裂的断层三角面连续延展数十公里，但影像信息显示出三角面的相对高度不大；恩施东断裂的断层三角面比较高峻，阴影明显，并与断层崖相间展布。一般来说，断层三角面高度愈大、坡度愈陡，阴影愈显著，说明断裂在三角面发育阶段的活动强度愈大。断层三角面还具有高低不同的层状现象，显示了断裂的节奏性活动特征^[11]。

(3)断陷盆地：清江流域及其边缘地区的活动断裂，往往控制着一些断陷盆地的发育，它们在 1:10 万的 TM 卫星图像中历历在目，有的沿断裂零星发育，有的沿断裂呈串珠状展布，如松园坪断裂南段和齐岳山断裂带等，即可见到盆地呈串珠状展布的影像信息。这些盆地或者由于断裂活动而成生，或者沿着断裂破碎带流水进行侵蚀、溶蚀而形成。根据这些盆地所展布的地貌位置，推测它们大多开始发育于早更新世，成形于中更新世，但区域内各断裂的活动信息表明，清江流域的第四纪断陷盆地，主要是沿着断裂破碎带发育而成，断裂的活动仅仅加速了盆地的发育与形成。

(4)断裂谷：断裂破碎带和断裂的活动往往成为流水汇集的场所和流道，以致形成了谷地，称之为断裂谷。清江流域及其边缘地区，断裂谷比较多见，它们在 1:10 万的 TM 假

彩色合成图中，线性醒目，影像清晰，并在谷坡上可见到断层崖和断层三角面的发育。

5. 两盘垂直差异错动的影像标志

鉴于清江流域基本上都处在新构造运动隆起区之内，因此断裂两盘的垂直差异错动，实质上表现为断裂两盘隆升幅度不同而呈现的差异活动。这种错动方式，在 1:10 万的 TM 假彩色合成图像上仍然可分辨出两盘不同的影像信息特征。一般来说，隆升幅度较大一盘 地形陡峻挺拔 山峰比较尖锐 阴影明显 图像色彩较深 谷地狭窄深切 河流跨过活动断裂时常形成悬谷或瓶状谷 隆升幅度较小一盘 地形比较平缓 山峰、丘陵多呈浑圆状，谷地宽阔，树枝状水系发育较好。清江流域及其边缘地区，活动断裂两盘隆升差异错动的影像标志鲜明，易于鉴别。

6. 两盘平移错动的影像标志

断裂两盘的平移错动可以引起地层、褶皱的牵引变形或位错，也可引起山体、山脊线、盆地的扭动变形或位错，这些现象在清江流域及其周缘地区至今尚未发现。虽然断裂两侧三叠纪褶皱与岩层的变形、位错较为多见，但这是燕山运动时的产物，并非断裂新活动所引起的。新构造时期，清江流域断裂两盘平移错动的形迹并不显著，而且主要表现在河流的同步转折与谷地的同步摆动变形。1:10 万的 TM 卫星图像信息表明，黑炭河断裂南段西侧的支流，在靠近断裂边缘时大多呈向南突出的弧形转折，而且北谷坡缓、南谷坡陡，河谷同步向南摆动，显示了断裂西盘具有向南平移错动之趋势。

判定断裂活动的影像标志甚多^[11 12]，但从清江流域及其边缘地区断裂活动影像标志来看，主要表现在上述诸方面，而且这些信息已可初步分析区域内的断裂活动特征。

第三节 主要活动断裂（带）的影像信息分析

1:10 万 TM 卫星图像清晰地展示了清江流域及其周缘地区活动构造的发育状况，显示出区域内活动断裂具有明显的成组性和成带性，按其展布方向大致分为五组。

一、北北东向断裂组

北北东向断裂组在清江上、中游地区最为发育 分布范围广 规模大 在卫星图像上线性清晰，密度大，并呈条带状展布，从西至东大体平行排列的主要有下列三条断裂带。

1. 齐岳山断裂带

为区域内规模较大的断裂带之一，卫星图像上线形清晰、醒目，北延至巫山，南抵娄山 总长度达 150km 以上，呈北北东至北东走向，略具弧形弯转。该带以齐岳山断裂为主 西北侧有数条次级断裂与主干断裂平行 带宽 4~8km。齐岳山断裂大体可分为三段，各段的线形特征、构造地貌及断裂两侧的地貌差异较大，因此各段的活动性也明显不同。

北段 北起长江南岸的大溪坝 经九树槽、磨子山至梅子关 长约 65km。该段线性形迹清晰 走向北东 呈直线形延伸 连续性好 其中九树槽—落钟丘地段呈浅色调带，与两

侧对照反差强烈。断裂东南侧，羽状山脊沿断裂平行排列，断裂活动使山咀被切错，形成了排列整齐的断层三角面。断层西北侧，羽状山脊发生明显的变形、变位，并被数条次级断裂和流水所切割，形成了键盘式块状山体。该段两侧地形反差较大，西北侧海拔为 1400~1800m，东南侧为 1200m 左右。断裂大致沿 1000~1200m 等高线延伸，并呈一相对低陷的负地形带，局部地段控制着河流流向，新民河的支流大多发源于此负地形带。

中段 梅子关至金竹坪，长约 12km，断裂的线性形迹断续出现，两侧地貌特征差异不大。

南段 自金竹坪向南南西方向延伸，经梅子水、南坪、后坝至新场，长约 80km。该段线性形迹清晰，呈浅色线条，控制着山脉的走向，断层崖与三角面发育良好。梅子水至后坝之间，断裂两侧的色调差异大，为不同地貌类型的分界线。断裂西侧为海拔 1800m 左右的岩溶山原，东侧为海拔 1100m 左右的岩溶高原。沿断裂呈一负地形带，但水坝附近由西向东流的溪流穿过断裂时则形成悬谷。后坝以南，断裂控制着岩溶山原的隆起，但与其东侧平行分支断裂之间，则形成一个宽 300~500m、长约 20km 的相对负地形带。东侧平行分支断裂线性影像瞩目，断层崖较发育。

2. 建始 - 恩施 - 咸丰断裂带

该带规模比较大，图幅内长约 180km，宽达 20km，总体走向北北东。主要由建始断裂（包括响水沟 - 段家湾断裂与天生桥 - 白鹤塘断裂）、恩施西断裂、龙凤坝 - 桅杆堡断裂、黄金洞断裂、恩施东断裂、十里牌 - 大青山断裂）和咸丰断裂等组成。这些断裂在卫星图像上具有相似的影像信息特征，线性形迹清晰，新构造时期也都具有一定活动性，所以将其归并为同一断裂带。该带各断裂的线形有的比较平直，有的呈舒缓波状。沿各断裂普遍可见到断层崖和断层三角面的发育，尤以恩施东断裂为佳，断层崖与断层三角面排列整齐，连续延伸 100 余 km。该带可分为东、西两支，各支均由数条断裂呈斜列式组成。两分支外侧相对断隆形成海拔 1200m 以上的中山和岩溶山原，两分支之间相对断陷形成海拔 1000m 以下的岩溶台原，特别在建始 - 椒园一带，断陷带的岩溶台原南北延伸约 90km，东西展布宽度 3~12km。

3. 白果园 - 黑炭河断裂带

该带发育在清江中游，从西至东主要有白果园断裂、刘家包断裂、杨柳池断裂、龙王冲断裂和黑炭河断裂，它们大致平行展布。这些断裂在卫星影像图上大多呈浅色线，或者为两种色调、灰阶的分界面，或者展布在浅色调带之中，线性影像比较隐晦，而且常常时隐时现。断裂线形多呈舒缓波状，个别断裂的线形比较平直。沿断裂构造地貌形态不甚发育，断裂两侧地貌差异不大。这些断裂的规模较小，延伸不长，但由于它们多穿切清江河道，对评价水电工程场址的稳定性有着一定的意义。

二、北东至北东东向断裂组

该断裂组在清江上游及中游地区广泛发育，但规模大小不一，短者小于 10km，长者近 100km。在 TM 卫星图像上，该组断裂的影像信息差异很大，线形也有所不同。有的断裂

线性影像时隐时现、时断时续。有的断裂呈浅色线，有的断裂呈深色线，有的断裂为两种色调灰阶的分界面，有的断裂为两种图斑、花斑的分界面。显然这些不同的影像信息表明，不同断裂的电磁波效应差异很大，它们的活动性也呈现出很大的差异。该组断裂规模较小者一般都呈直线形，规模较大者呈缓波状，更大者则呈平缓的 S 形展布。

该组断裂的展布具有一定的区域规律：①主要展布在北北东向齐岳山断裂带与建始—恩施—咸丰断裂带之间，建始—恩施—咸丰断裂带与白果园—黑炭河断裂带之间，以及白果园—黑炭河断裂带东南侧。在两个北北东向断裂带之间，该组断裂的展布具有一定的疏密韵律变化，往往若干断裂密集成带，经过一定间距后又有若干断裂密集成带。该组断裂一般被北北东向断裂所限制，而未切错北北东向断裂，但在鹤峰—五峰一带却限制了北北东向断裂的延伸。宣恩东部，该方向组的线性影像密集成群，它们是否都属于断裂，尚待野外地质考察的验证。

该组断裂以鹤峰—土坪断裂的规模最大，过去有关地质资料和图件对此未予报导，现通过野外地质考察，已确认为断裂。该断裂线性影像瞩目，活动性明显，断层崖和断层三角面发育良好，并形成了一个深切的断裂谷，谷地规模与断裂等量齐观，长达 80km 以上，而且与断裂线形一样，呈平缓的 S 形延伸（像片 2）。在鹤峰县城西南的茅坝一带，该断裂控制着一个长近 10km、宽 500~1000m 的第四纪侵蚀构造盆地的发育。断裂谷两侧为中山地形，东南侧普遍高于西侧支，谷底面海拔高程达 800~1200m，与区域内地文期面对比，说明该断裂谷应形成于王家坪亚期剥夷面之前，第四纪时该断裂谷已被澧水水系的三、四级支流所分割，马棚岭东南侧还成为清江水系与澧水水系的分水岭。

三、近东西向断裂组

该组断裂展布在清江中、下游及其南部地区，主要有西湾断裂、渔洋关断裂和曲尺河断裂。它们从北至南大约以 20~30km 的间距呈并列式展布。卫星影像图上该组断裂的影像信息和活动性有所差异，线性特征与构造地貌表现有所不同：西湾断裂呈线段型、断续延伸，连续性差，线形展布总体上呈平缓的弧形，断裂西段两侧地貌形态有所差异，东段则从坡地中部横穿而过。渔洋关断裂的线性影像也呈断续延伸，但断裂两侧地貌差异明显，南侧为中山与低山地貌，北侧为海拔 350m 左右的古宽谷，断裂北盘岩层强烈破碎，规模较小的平行分支断裂发育。曲尺河断裂的卫星影像线形清晰，连续性好，呈浅色线，西段沿断裂可见到断层崖和断层三角面的发育，断裂两侧形成了不同的地貌类型，呈现出一定的活动性。

四、北北西向断裂组

该断裂组主要发育在清江中、下游地区，由仙女山断裂和松园坪断裂等组成，卫星图上线形影像明显，并显示出一定活动性，在这两者边缘还展布一系列规模较小平行分支断裂。