

文章编号: 1006-6616 (2016) 03-0454-24

滇中城市群重要活动断裂与 区域地壳稳定性评价

周春景^{1,2}, 吴中海^{1,2}, 马晓雪³, 李家存³, 王继龙⁴

(1. 中国地质科学院地质力学研究所新构造与活动构造研究室, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048;

4. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 结合前人资料的系统梳理、遥感解译及地表调查结果, 对滇中城市群地区的活动断裂进行活动程度分级, 得到该区“5纵2横”13条主要活动断裂的构造体系分布格局。按断裂活动强弱程度对城镇及重要工程的影响不同, 对滇中城市群地区城镇和“十三五”及中长期规划的重大工程开展活动断裂影响调查研究, 表明活动断裂是影响和制约该区城镇规划及重大工程建设的主要地质因素。综合考虑活动断裂活动程度、岩性特征和地形变化3因素进行的区域地壳稳定性评价初步结果表明, 该区的“极不稳定区”、“不稳定区”和“次不稳定区”约占全区面积三分之一。

关键词: 滇中城市群; 活动断裂; 断裂活动强度分级; 活动构造体系; 地壳稳定性综合评价

中图分类号: P546

文献标识码: A

0 引言

滇中城市群是中国未来重点发展的19个国家级重要城市群之一, 包含了昆明、曲靖、玉溪、楚雄等4个地级市, 面积约93139 km²。同时, 滇中城市群也是云南省“十三五”规划中的发展核心和重点, 是云南省构建“一核一圈两廊三带六群”全省经济社会发展空间格局中的“一核一圈”, 其中的“一核”即是以昆明中心城区与滇中新区为核心区, “一圈”为充分发挥滇中城市经济圈的支撑作用。

滇中城市群地区位于云贵高原西部, 为海拔1000~2000 m的高原及高原山岭的地形地貌, 同时, 该区也是中国第四纪活动断裂发育及地震活动强烈的南北地震带的南段, 特定的构造地质背景及特殊的地形地貌, 使得区内地震及泥石流、滑坡等地质灾害频发, 严重制约了该区的经济建设与社会发展。因此, 调查研究区内构造地质条件及地形地貌, 开展国家重

收稿日期: 2016-06-02

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20160268; 12120114002101; 1212011120163)

作者简介: 周春景 (1974-), 女, 构造地质学博士, 主要从事活动构造和地震地质等研究工作。E-mail: zhouchunjing@

cags.ac.cn

要城市群地质环境综合调查与评价,是配合国家及地方经济建设和社会发展的需要。第四纪活动断裂是影响中国西部地区包括滇中城市群地壳稳定性的重要地质因素,系统开展滇中城市群地区的活动断裂调查研究和地壳稳定性综合评价是支持该区域城镇规划建设及重大工程建设的地质科技保障。本文以活动断裂为主线,系统调查研究区内活动断裂的活动程度及其构造体系特征,分析评价活动断裂对滇中城市群地区重要城镇及规划的重大工程的影响程度,并综合活动断裂、岩性特征、地形条件等开展区域地壳稳定性初步评价,提出规避不利地质条件的建设性意见。

1 研究区地质构造背景

滇中城市群地区在大地构造分区上以红河断裂带、弥勒—富源断裂带为分界线,分别属于扬子准地台、华南褶皱系及唐古拉—昌都—兰坪—思茅褶皱系等一级大地构造单元(见图1)。其中红河断裂带与弥勒—富源断裂带之间占滇中城市群绝大部分地区的扬子准地台,具有典型的基底和盖层双层结构,并以普渡河断裂为界,分为川滇台背斜和滇东台褶带2个二级大地构造。川滇台背斜以元谋—绿汁江断裂为界进一步分为滇中中台陷和武定—石屏隆断束;滇东台褶带包括了4个三级构造单元,小江断裂东支以西为昆明台褶束,以北东向会泽断裂、寻甸—宣威断裂为界,自北向南分别为滇东北台褶束、会泽台褶束和曲靖台褶束。滇中城市群地区的东南属于华南褶皱系,即滇东南褶皱带,处于华南褶皱系与扬子准地台的过渡地带,包括罗平—师宗断褶束和丘北—广南断褶束2个三级构造单元。研究区的西南,

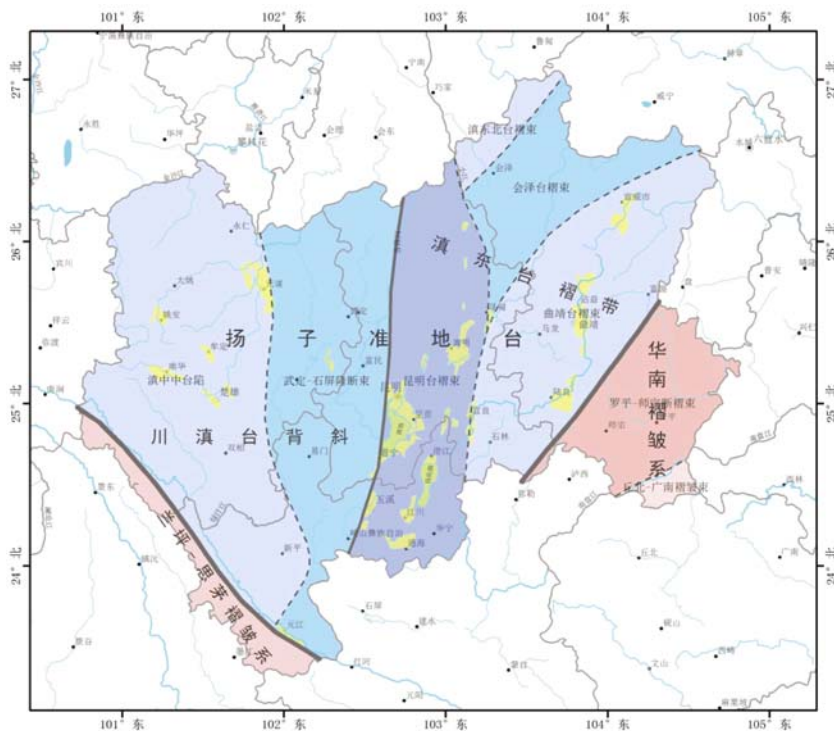


图1 滇中城市群地区大地构造纲要示意图(据文献[1~2])

Fig. 1 Geotectonic outline of the city group in central Yunnan

即红河断裂带以西,大地构造单元属于唐古拉—昌都—兰坪—思茅褶皱系(区内简称为兰坪—思茅褶皱系)。上述三个大地构造单元,从板块构造观点划分,自西向东,分别属于印支板块、扬子板块和南华亚板块^[1~2]。

滇中城市群地区在新构造单元划分上分别以红河断裂带、小江断裂带—寻甸—宣威断裂为界,可以划分出3个不同的一级构造单元^[1~2]。

①小江断裂带—寻甸—宣威断裂带以西地区为滇东—滇东南稳定抬升区,该区新构造运动以大面积稳定抬升为主要特征,断块间差异运动幅度较小;区内活动断裂主要为第四纪活动断裂,少数为晚更新世活动断裂,断裂活动强度较弱。

②红河断裂带与小江断裂带—寻甸—宣威断裂带夹持的构造区为滇中断块式抬升区,包括:以寻甸—宣威断裂和小江断裂带北段为东、西边界的滇东北地区,该区新构造运动强烈抬升,活动断裂以北东向和北北西向为主,上新世以来,年平均抬升率为0.12 mm/a;小江断裂带与普渡河断裂带之间的滇东新生代湖盆区,活动断裂以近南北向和北西向为主,多为晚更新世—全新世活动断裂,沿活动断裂带差异性抬升强烈,形成一系列滇东断陷盆地,区内新生代湖盆发育,其中包括滇池、抚仙湖、星云湖、杞麓湖、阳宗海、异龙湖等多个现代湖泊;普渡河断裂以西的滇中断块抬升区,该区自上新世以来,年平均抬升速率为0.09~0.14 mm/a,区内活动断裂以近南北向和北西向为主,多为晚更新世活动断裂,沿断裂发育第四纪断陷盆地。

③红河断裂以西狭长区属于滇西北—滇西南掀斜式抬升区,该区活动断裂为北西向为主,多为第四纪活动断裂与晚更新世活动断裂。

滇中城市群地区的地层从新元古界至新生界均有分布,其中新生代及中生代白垩纪地层主要为河流-湖泊相沉积;新元古代至古生代地层为海相沉积;中生代的三叠、侏罗纪地层既有海相沉积,也有陆相沉积;侏罗纪地层,在兰坪—思茅褶皱区为浅滨海-湖相沉积,东部其他地区为湖相沉积;三叠纪地层中,思茅地区为海相沉积,楚雄地区为河湖-海陆交互,昆明地区为湖泊-河湖沉积,曲靖地区为台地-碳酸岩-远滨沉积^[1~2]。

晚第四纪以来,受新生代以来印度板块对欧亚板块的持续挤压碰撞,青藏高原内部物质向东—东南挤出的影响^[3~21],滇中城市群地区发育了多条近南北向、近北西向及少量北东向活动断裂,这些活动断裂控制了区内中强—大震的发生。有历史记载以来,滇中城市群地区至少发生过27个 $M \geq 6$ 级的地震,其中 $M \geq 8$ 级地震1个、 $7 \leq M < 8$ 级地震5个、 $6 \leq M < 7$ 级地震21个(见表1,图2)。地震烈度分布图(见图2)表明,滇中城市群地区的最大地震烈度高达X度,其中Ⅷ度及以上区域的面积接近全区的四分之一。因此,研究区总体上表现为断裂活动强烈、中强—大震较活跃的现今大陆地壳构造活动区,因而也是一个震害严重、防震任务面临严峻挑战的地区。

2 主要研究方法

2.1 活动断裂范畴及活动断裂分级

活动断裂:根据应用目的不同,加之不同地区构造活动性的差异,活动断裂在实际应用中多种不同的定义^[22~25]。吴中海等^[26]对活动构造及活动断裂的不同定义做了较详细的综述,最具代表性的有4种:①距今约10 ka以来活动过的断裂;②距今50 ka或35 ka以来活动过的断裂;③过去0.15 Ma或0.10 Ma以来活动过的断裂;④过去0.50 Ma以来活动过的

表1 滇中城市群 $M \geq 6$ 级地震一览表Table 1 Earthquakes with $M \geq 6$ in the city group area of central Yunnan

| 序号 | 发震时间 | 经度/(°) | 纬度/(°) | 深度/km | 震级 | 发震断层 |
|----|------------|--------|--------|-------|------|---------|
| 1 | 1500-01-13 | 103.1 | 24.9 | 0 | 7.00 | 小江断裂东支 |
| 2 | 1571-09-19 | 102.8 | 24.1 | 0 | 6.25 | 小江断裂西支 |
| 3 | 1680-09-09 | 101.6 | 25.0 | 0 | 6.75 | 南华-楚门断裂 |
| 4 | 1713-02-26 | 103.3 | 25.6 | 0 | 6.75 | 小江断裂东支 |
| 5 | 1725-01-08 | 103.1 | 25.1 | 0 | 6.75 | 小江断裂西支 |
| 6 | 1733-08-02 | 103.1 | 26.3 | 0 | 7.75 | 小江断裂东支 |
| 7 | 1750-09-15 | 102.9 | 24.7 | 0 | 6.25 | 小江断裂东支 |
| 8 | 1755-01-27 | 102.2 | 24.7 | 0 | 6.50 | 会理—易门断裂 |
| 9 | 1761-05-23 | 102.6 | 24.4 | 0 | 6.25 | 小江断裂西支 |
| 10 | 1763-12-30 | 102.8 | 24.2 | 0 | 6.50 | 小江断裂西支 |
| 11 | 1789-06-07 | 102.9 | 24.2 | 0 | 7.00 | 小江断裂东支 |
| 12 | 1833-09-06 | 103.0 | 25.0 | 0 | 8.00 | 小江断裂西支 |
| 13 | 1909-05-11 | 103.0 | 24.4 | 0 | 6.00 | 小江断裂西支 |
| 14 | 1909-05-11 | 103.0 | 24.4 | 0 | 6.50 | 小江断裂东支 |
| 15 | 1913-12-21 | 102.5 | 24.2 | 0 | 7.00 | 峨山断裂 |
| 16 | 1913-12-22 | 102.5 | 24.2 | 0 | 6.00 | 峨山断裂 |
| 17 | 1927-03-15 | 103.0 | 26.0 | 0 | 6.00 | |
| 18 | 1962-06-24 | 101.2 | 25.2 | 0 | 6.20 | 南华—楚雄断裂 |
| 19 | 1966-02-05 | 103.1 | 26.1 | 0 | 6.50 | 小江断裂西支 |
| 20 | 1966-02-13 | 103.1 | 26.1 | 0 | 6.20 | 小江断裂西支 |
| 21 | 1970-01-05 | 102.7 | 24.2 | 13 | 7.80 | 峨山断裂 |
| 22 | 1985-04-18 | 102.9 | 25.9 | 5 | 6.20 | |
| 23 | 1995-10-24 | 102.2 | 25.9 | 0 | 6.50 | 会理—易门断裂 |
| 24 | 2000-01-15 | 101.1 | 25.5 | 0 | 6.50 | |
| 25 | 2003-07-21 | 101.2 | 26.0 | 0 | 6.20 | |
| 26 | 2003-10-16 | 101.3 | 26.0 | 0 | 6.10 | |
| 27 | 2009-07-09 | 101.0 | 25.6 | 6 | 6.30 | |

地震数据来源:中国地震信息网

断裂。其中定义①和③应用最广泛,前者一直被美国地质调查局地震危险性评价部门和加州地质调查局应用,后者则被新西兰和中国相关部门广泛采纳。

本文的活动断裂采用中国地震局惯用的定义,将晚更新世(距今约120 ka)以来活动过的,将来可能活动的,且在地质地貌上有表现的、或有中强地震活动的、或对第四纪盆地发育有控制作用的断裂定义为活动断裂。

活动断裂活动强弱程度分级:主要根据活动速率大小,并考虑断裂所处的构造部位、现今地震活动性特征等,对断裂活动性进行强弱分级,从而突出断裂的活动性差异与构造体系。根据速率大小将活动断裂分成如下4级:强烈活动断裂,活动速率 ≥ 5.0 mm/a;中强活动断裂,活动速率2.0~5.0 mm/a;中等活动断裂,活动速率0.5~2.0 mm/a;弱活动断裂,活动速率 < 0.5 mm/a。

2.2 区内活动断裂研究方法

活动断裂地质调查研究的内容主要包括活动断裂识别及其活动程度的鉴定^[27]。活动断裂的研究方法及手段目前主要有:①通过遥感解译或航拍,判读线性影像特征、错动的地质地貌体或人文标志物特征识别;②通过DEM及由此提取的地形坡度的线性特征识别;③通过地表地质调查测量错动晚第四纪地质地貌体或相关的构造地貌标志特征及错动量,取样测量错动的

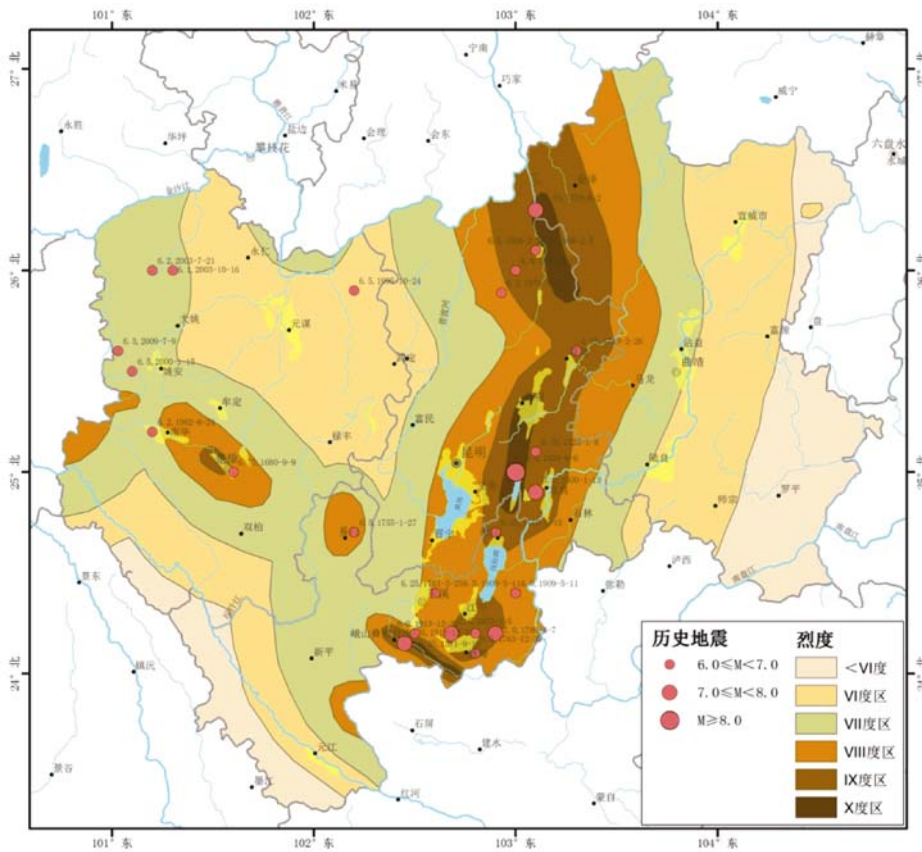


图2 滇中城市群地区 $M \geq 6.0$ 级地震及地震烈度分布

Fig. 2 Distribution of the earthquakes with $M \geq 6.0$ and the seismic intensity in the city group area of central Yunnan

地质体年龄，计算活动断裂速率；④地震依据：发生过产生地表破裂的地震，或多次发生过中强地震（ ≥ 5 级）；⑤断裂控制的火山、温泉或第四纪盆地发育等特征；⑥对第四纪覆盖区，活动断裂的调查往往还需通过深部的地球物理探测及第四纪地质钻探等手段方法。

滇中城市群地区处于南北构造带南段，其所属的中国西南地区活动断裂的研究程度相对较高，前人已在该区活动断裂调查研究方面做了大量工作，并取得了一系列重要成果^[1-2,28-45]。但对于该区活动断裂的系统梳理及其对城镇规划建设和重大工程影响的研究还需要做进一步工作。因此本文将基于活动构造体系的思想，在收集前人资料基础上，结合高精度遥感解译、DEM数据及基于DEM数据提取的地形坡度线性特征，以及地表地质调查，系统梳理该区活动断裂，根据活动断裂速率，结合错动的地形地貌、地震活动性及活动断裂对第四纪盆地的控制等标志特征进行断裂活动性的综合识别，并主要依据其活动速率进行活动强弱程度的分级，初步形成该区活动断裂构造体系框架。

2.3 区域地壳稳定性综合评价方法

地壳稳定性在工程地质学中一般分为区域地壳稳定性、场地稳定性和岩土体稳定性，其中区域地壳稳定性是与新构造运动背景有关的，可以称为狭义的区域地壳稳定性；场地稳定性和岩土体稳定性可以称为工程地壳稳定性。前人对与地壳稳定性分析相关的区域稳定性分析、地壳稳定性评价和工程稳定性区划方面进行了大量研究和长期探索，为国家重大工程建

设提供过重要依据,产生了良好的社会效应和较大的学术影响。早期的研究有20世纪60年代谷德振^[46~47]强调从新构造运动、地震活动和地质构造角度综合分析评价区域稳定性;李四光^[48~49]倡导在活动构造带选择相对稳定地区作为工程建设基地或场址,提出“安全岛”学术思想。后来的研究多将李四光的地质力学方法^[50]和(或)“安全岛”学术思想^[49]引入区域地壳稳定性评价中^[50~59]。陈庆宣等^[53~54]将现今构造应力场分析和构造活动性测量技术方法引入地壳稳定性研究领域,逐步形成以现今构造应力场、现今地形变测量、现今构造活动性分析为主要特色的地壳稳定性评价研究方向。孙广忠^[60]将地应力研究和构造控制论引入岩体地质力学,创建了岩体结构力学理论。王思敬等^[61~62]通过攀枝花场地稳定性分析、秦岭区域稳定性分析和地下工程稳定性分析,创新发展了工程地质力学理论。还有学者从区域地壳稳定性、工程场地稳定或工程稳定性区划的影响因素、评价系统或评价算法上进行不同的尝试^[57,63~71]。尽管前人做了很多研究、探索和尝试,但迄今为止,地壳稳定性评价和区域稳定性分析在理论、研究方法和评价技术方面还存在很多问题,在实际操作中缺乏适用于工程设计的指标体系和工作规范,技术标准不明确。

区域地壳稳定性实际评价工作主要涉及到影响区域地壳稳定性因素的选取问题以及多种因素之间关系的权重选择问题。在前人的研究中,往往考虑的影响因素较多,其中既有影响地壳稳定性程度的因素(因),也有地壳稳定性程度的表现(果)。然而,实际考虑的影响因素并不是越多越好,如果处理不好这些因素哪些是因,哪些是果,或者影响因素之间具有重复性,则权重关系也不好处理。

本文的区域地壳稳定性包含了与新构造运动背景有关的狭义区域地壳稳定性和岩土体稳定性问题。考虑到滇中城市群地区的新构造运动主要表现为第四纪断裂的活动,因此与新构造运动背景有关的因素只考虑第四纪活动断裂。该区的地震基本上是构造性地震,故此地震是活动断裂活动的结果;同时,构造地震往往是断层的分段错动引起,表现为准周期性,中国西部地区一般为千年左右^[72~76],一个地震在某段断裂发生后,实际上相对于没有发震的断裂段,可能更为安全,因此用历史地震来衡量某段断裂所在区域将来地壳的稳定性特征是不妥的。同样,直接用地震加速峰值来评价将来区域地壳稳定性也存在类似的问题。

城镇规划和重大工程建设中,滑坡、泥石流等地质灾害也是需要考虑的地壳稳定性问题,这种与岩土体性质和地形地貌相关的地壳稳定性问题实际上是属于岩土体本身的稳定性问题,其中岩土体的岩性、倾向、倾角和地形的坡度与坡向等因素为主要的影响因素。地形的坡度与岩土体性质具有一定相关性,不同性质的岩土体,其倾向、倾角与地形坡向、坡度的关系直接影响形成滑坡、泥石流、崩塌的难易程度。但在大面积、小比例尺区域性地壳稳定性初步评价中,只考虑岩土体岩性和地形坡度大小2个因素。岩土体的性质属于地下物质物性问题,是地壳物质对内、外动力的响应特性,直接影响在特定内外动力作用下地壳稳定性特征。

综上,本文的区域地壳稳定性初步综合评价考虑了地壳稳定性问题的内动力、外动力和自身岩性3类因素,共3个评价指标。活动断裂是相对独立的与内动力相关的因素,根据活动断裂的活动强弱程度、与断裂的距离分别赋予不同的分值。不同岩土体对地震波响应特征不同,对地面人类工程的破坏程度也不同,而地形坡度大小是影响滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害形成难易程度的主要因素,分别对不同的岩土性质和地形坡度赋予分值。据此,区域地壳稳定程度可以表达成:

$$\alpha(i) = k_1x_1(i) + k_2x_2(i) + k_3x_3(i)$$

式中: $x_1(i)$ 为活动断裂影响因子原始分值, $x_2(i)$ 为地形坡度影响因子原始分值, $x_3(i)$

为岩土体影响因子原始分值； k_1 、 k_2 、 k_3 分别为活动断裂、地形坡度和岩土体性质的权重值； $\alpha(i)$ 为区域地壳稳定程度。

3 个主要影响因素评价指标的分值和权重值赋予原则：

①活动断裂影响因子：根据梳理出的活动断裂的分级特征，受活动断裂影响的区域按距离断裂远近分别赋予不同的分值，权重取值 0.6。强烈活动断裂考虑断层两侧各 50 km 以内的区域，分为 3 个区，分别是距离断裂小于 10 km 区域，10~20 km 区域，20~50 km 区域；各区的原始分值依次为 1.35，1.20，1.00。中强活动断裂考虑断层两侧各 30 km 以内的区域，亦分为 3 个区，即距离断裂小于 5 km 区域，5~10 km 区域，10~30 km 区域；原始分值依次为 1.2，1.0，0.8。中等活动断裂考虑断层两侧各 15 km 以内的区域，同样分为 3 个区，即距离断裂小于 2.5 km 区域，2.5~5 km 区域，5~15 km 区域；原始分值依次为 0.8，0.6，0.5。弱活动断裂考虑断层两侧各 5 km 以内的区域，同样分为 3 个区，距离断裂小于 1 km 区域，1~2 km 区域，2~5 km 区域；各区的分值依次为 0.6，0.5，0.2。各项取值及对应的权重分值详见表 2。

表 2 不同强度活动断裂影响区域的分值取值标准一览表

Table 2 Assignment in different regions along the different active faults

| 断裂类型 | 与断裂的距离/km | 原始分值 | 权重分值 (权重 0.6) |
|--------|-----------|------|---------------|
| 极强活动断裂 | 0~10 | 1.35 | 0.81 |
| | 10~20 | 1.2 | 0.72 |
| | 20~50 | 1.0 | 0.60 |
| 中强活动断裂 | 0~5 | 1.2 | 0.72 |
| | 5~10 | 1.0 | 0.60 |
| | 10~30 | 0.8 | 0.48 |
| 中等活动断裂 | 0~2.5 | 0.8 | 0.48 |
| | 2.5~5 | 0.6 | 0.36 |
| | 5~15 | 0.5 | 0.30 |
| 弱活动断裂 | 0~1 | 0.6 | 0.36 |
| | 1~2 | 0.5 | 0.30 |
| | 2~5 | 0.2 | 0.12 |

②地形坡度影响因子：地形坡度分为 5 档，权重为 0.3。坡度大于等于 45°的，原始分值为 0.5；坡度值 25°—45°之间的，原始分值为 0.6；10°—25°之间的，原始分值 0.2；5°—10°之间的，原始分值 0.1；小于 5°的原始分值取 0（见表 3）。

表 3 不同坡度范围的分值取值标准一览表

Table 3 Assignment for the different areas with different slopes

| 坡度范围/(°) | 原始分值 | 权重分值 (权重 0.3) |
|----------|------|---------------|
| ≥45 | 0.5 | 0.15 |
| 25~45 | 0.6 | 0.18 |
| 10~25 | 0.2 | 0.06 |
| 5~10 | 0.1 | 0.03 |
| <5 | 0 | 0 |

③岩土体影响因子：岩土体分类主要根据大致强度进行粗略划分，分为新近世以来成岩程度不高的沉积物 (N+Q)、老地层以及岩体 (包括侵入岩和元古代以前的老变质岩) 等 3 类，原始分值分别为 0.1、0 和 -0.2。岩土体影响因子的权重为 0.1（见表 4）。

表4 不同岩土体性质分值取值标准一览表

Table 4 Assignment for different rocks

| 岩性范围 | 原始分值 | 权重分值 (权重 0.1) |
|---------------|------|---------------|
| 新近世以来的沉积物 N+Q | 0.1 | 0.01 |
| 老地层 | 0 | 0 |
| 岩体 (侵入岩和老变质岩) | -0.2 | -0.02 |

3 活动断裂调查研究和区域地壳稳定性评价结果

3.1 区内主要活动断裂带及基本特征

滇中城市群地区活动断裂发育, 主要有近南北向、近北西向断裂 (带) 及少量北东向断裂。其中近南北向断裂带包括曲靖—陆良断裂、小江断裂带、普渡河断裂带、会理—易门断裂带和元谋—绿汁江断裂带等 5 条左旋走滑断裂 (带); 近北西向断裂主要有红河断裂带、南华—楚雄断裂、石屏—建水断裂、牟定断裂和峨山断裂等 5 条右旋走滑断裂 (带); 北东向断裂主要有会泽断裂、寻甸—宣威断裂和弥勒—富源断裂等 3 条右旋走滑断裂 (见图 3, 表 5)。总体上, 活动断裂在遥感影像、DEM 地形及由 DEM 数据提取的地形坡度图像 (见图 4) 上线性特征明显, 断裂往往形成错动水系、沟谷、断层陡坎、陡崖等断错地貌现象。

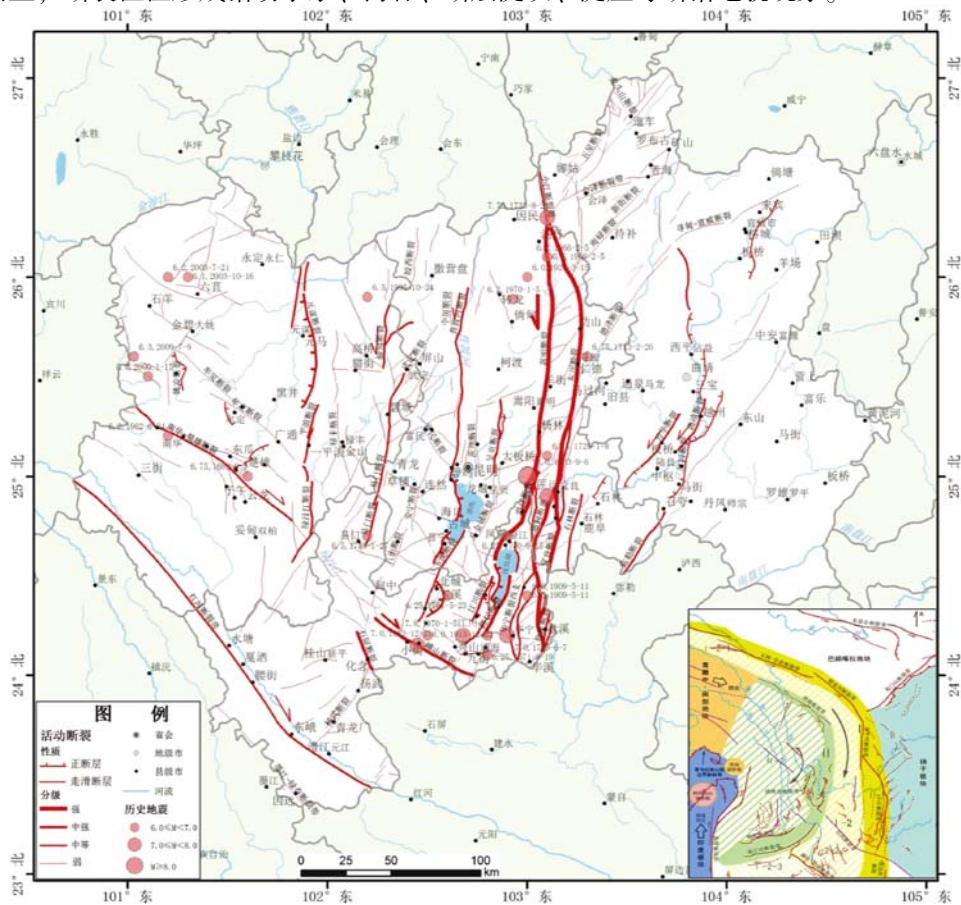


图3 滇中城市群地区活动断裂分布图

(镶嵌图为滇中城市群地区所处的青藏高原东南缘弧形构造体^[77]中的位置)

Fig. 3 A map showing the distribution of the active faults in the city group area in central Yunnan

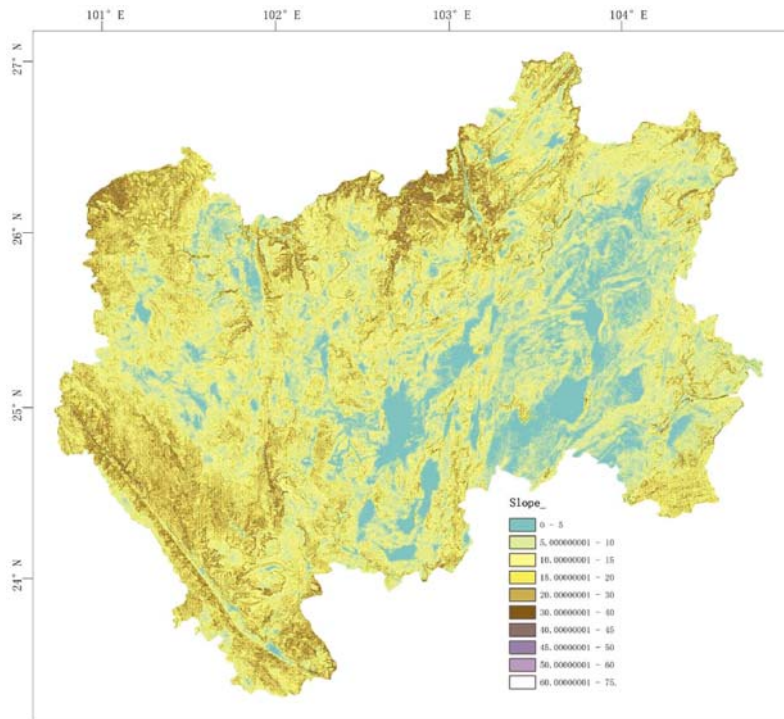


图4 滇中城市群地区基于90 m分辨率的DEM提取的坡度线性特征

Fig. 4 A map showing the linear characters of slopes derived from DEM with 90 m resolution in city group areas in central Yunnan

3.1.1 曲靖—陆良断裂 (F_1)

该断裂北起沾益县东北黎山附近, 向南经曲靖盆地东缘、陆良盆地东缘, 与弥勒—富源断裂交于陆良盆地的南东, 全长约 160 km。断裂总体呈南北向, 倾角较陡, 达 65° 左右^[1-2]。该断裂控制了曲靖、陆良第四纪断陷盆地的发育, 现今 3~4 级地震沿断裂带带状分布, 没有 $M \geq 6$ 地震的记载。沿断裂发育左旋错动的水系, 为第四纪左旋兼正断活动断裂, 沿主要盆地边缘的边界活动断裂的坡度线性特征较为明显 (见图 4)。该断裂分为南北两段, 其中控制陆良盆地东缘边界线的断裂段称为三岔河断裂 (F_{1-1}), 北段包括控制曲靖盆地发展的边界断裂, 统称为曲靖断裂 (F_{1-2})。总体上, 该断裂的第四纪活动程度为中等。

3.1.2 小江断裂带 (F_2)

小江断裂带近南北向, 贯穿了滇中城市群地区南北, 在蒙姑以南分为东、西两支。西支经乌龙、甸沙, 南达通海盆地, 在通海西南与峨山断裂相交; 东支经东川、寻甸、宜良盆地, 到达通海县东南。区内长度约为 270 km。小江断裂带晚第四纪表现为强烈左旋走滑错动及两侧地块的垂直差异活动, 错动的水系、山脊、地质体等左旋位错明显, 沿断裂带断层地貌清楚, 断裂的北段及东西分支的坡度线性特征非常明显 (见图 4)。该活动断裂对晚第四纪盆地的发育具有明显控制作用, 为西南乃至中国一条强震发生带, 历史上曾发生 6 级以上地震至少 12 个, 为区内活动强烈的晚第四纪活动断裂。其中小江断裂北段 (F_{2-1}) 最大活动速率约为 8.6 mm/a ^[2]; 小江断裂西支包括嵩明断裂 (F_{2-2})、澄江断裂 (F_{2-3})、江川断裂 (F_{2-4})、路居断裂 (F_{2-5}) 等主干断裂段, 最大活动速率约为 9.5 mm/a ^[2]; 东支包括东川断裂 (F_{2-6})、通甸断裂 (F_{2-7})、宜良断裂 (F_{2-8})、华宁断裂西支 (F_{2-9})、盘溪断裂

(F_{2-10})，最大活动速率约为 $8.0 \text{ mm/a}^{[2]}$ 。

3.1.3 普渡河断裂带 (F_3)

普渡河断裂区内沿普渡河谷经三江口，至沙坪后偏离普渡河继续南延，经玉溪盆地西缘，止于峨山断裂。区内长度约 230 km 。主要包括普渡河断裂 (F_{3-1}) 和玉溪断裂 (F_{3-2})，断裂总体以左旋扭动为主。沿断裂带，地形坡度线性特征较明显 (见图 4)，地形地貌上形成一系列小型断陷盆地、串珠状温泉及错断水系地貌；历史记载的最大地震震级为 6.3 级。断裂总体上为中等活动强度。

3.1.4 会理—易门断裂带 (F_4)

该断裂北起四川会理，向南穿过金沙江，止于易门盆地以南，由主干断裂和其旁侧的次级断裂组成。区内长度约为 165 km ，断裂总体走向近南北向，倾角约 70° ，为左旋走滑断裂。晚第四纪以来，断裂活动较强烈，形成一系列断陷盆地，沿活动断裂的地形坡度线性特征明显 (见图 4)。断裂带历史上至少发生过 2 次 6.5 级地震，为中等活动程度的晚第四纪活动断裂。区内主要包括插甸断裂 (F_{4-1})、武定断裂 (F_{4-2}) 和易门断裂 (F_{4-3})。

3.1.5 元谋—绿汁江断裂带 (F_5)

北起于元谋盆地北缘以北，向南延伸，分别与牟定断裂、南华—楚雄断裂相交，向南偏向南西，穿过绿汁江，止于红河断裂带附近，区内长约 220 km 。该断裂总体近南北走向，南段转为北北东方向，总体为左旋走滑，在元谋盆地西缘为控制该盆地发育的正断层。晚第四纪以来，北段为中强活动断裂，中段—南段为中等—弱活动断裂，总体上沿活动断裂的坡度线性特征明显 (见图 4)。该断裂带主要包括元谋断裂 (F_{5-1})、平浪断裂 (F_{5-2}) 和绿汁江断裂 (F_{5-3})。

3.1.6 红河断裂带 (F_6)

断裂带沿沅江、红河河谷西岸近北西向分布，区内长度约 230 km 。第四纪以来表现为拉张-右旋走滑错动特征，沿断裂发育断层崖、错断水系等断层地貌，沿活动断裂坡度线性特征很明显 (见图 4)。早期的研究者认为红河断裂带晚更新世以来活动速率为 $1.5 \sim 5.0 \text{ mm/a}^{[2,42]}$ ，但新的研究表明晚第四纪以来红河断裂的活动明显减弱，活动速率小于 $2 \text{ mm/a}^{[28]}$ ，总体上表现为中等活动断裂。

3.1.7 南华—楚雄断裂 (F_7)

该断裂总体为北西—南东走向，北西起于南华北西，经楚雄，向东南延至绿汁江，区内长约 140 km 。断裂倾角约 80° ，向东南倾。沿断裂发育断层陡崖、断层三角面、右旋错动水系等断层地貌。断裂对南华盆地和楚雄盆地具有明显控制作用，沿断裂的坡度线性特征没有南北向的断裂明显 (见图 4)。历史上至少发生过 2 个 $6 \leq M < 7$ 地震，其中最大震级为 6.75 级，为中等活动程度的第四纪活动断裂。

3.1.8 石屏断裂 (F_8)

该断裂西北起于绿汁江，经塔甸，至石屏，总体走向北西—南东，倾角约 60° ，区内长度约 60 km 。沿断裂发育断层崖、断层陡坎、右旋错动水系等断层地貌，为第四纪右旋走滑断裂。其中南段为中强活动程度，北段活动的程度较弱；同样，沿断裂的坡度线性特征南段较北段明显 (见图 4)。晚更新世以来平均活动速率约为 $3.5 \text{ mm/a}^{[2]}$ 。

3.1.9 牟定断裂 (F_9)

该断裂西北起于大姚县西南，经过牟定县，向东南延伸，止于元谋断裂附近。总体走向北西—南东向，沿断裂带发育断层崖、右旋错动水系等断层地貌，沿断裂的地形坡度线性特

征不明显(见图4)。历史上没有大于6级地震的记载。断裂总体活动程度为弱。

3.1.10 峨山断裂(F_{10})

该断裂北西起于峨山县城以西,向南东经峨山县、曲江,止于小江断裂,总体走向 40° — 50° ,倾角 50° — 80° ,第四纪活动性较强烈。沿断裂表现为直线型沟槽状断裂谷,发育多个断陷盆地,沿断裂坡度线性特征明显(见图4);晚更新世以来平均活动速率约为 3.2 mm/a 。历史上发生多次破坏性地震,最大地震为1977年通海7.9级地震,总体上为中强活动断裂。

3.1.11 会泽断裂(F_{11})

该断裂西起小江断裂,向北西,经会泽、若海,至云贵边界延至贵州,在滇中城市群地区的长度约为90 km。总体走向北 30° 东,倾角 60° — 80° 。沿断裂发育昭通、鲁甸盆地,右旋错动水系等,但沿断裂坡度线性特征不甚明显(见图4)。历史上没有大于6级地震的记载,总体上断裂活动性较弱。

3.1.12 寻甸—宣威断裂(F_{12})

该断裂南西端在寻甸附近交于小江断裂东支,向北东,至宣威以北,区内长约160 km。总体走向北偏东 30° ,北段为北偏东 50° ,倾角 60° — 80° 。沿断裂发育断层槽谷、右旋错动水系等断层地貌,沿断裂地形坡度线性特征较为明显(见图4);为第四纪右旋走滑活动断裂。历史上未发生过大于6级地震,总体上活动程度较弱。该断裂的西南段也称德泽断裂。

3.1.13 弥勒—富源断裂(F_{13})

断裂西南端始于弥勒县,向北东延至富源县附近,区内长度约150 km,总体走向北偏东 30° ,倾角 65° — 85° 。沿断裂断层崖、断层沟槽等断层地貌发育,有零星分布的断陷盆地,地形坡度线性特征较明显(见图4),为第四纪右旋走滑断裂。历史上没有6级及以上地震的记载,断裂总体活动程度较弱。该断裂的西南段也称为弥勒断裂。

从滇中城市群地区活动断裂分布图(见图3)可以看出,根据活动断裂分级情况,区内13条主要活动断裂带构成了“5纵2横”的格局。“5纵”即活动强度从强烈活动、中强活动到中等活动的近南北向左旋走滑断裂带,包括曲靖—陆良断裂带、小江断裂带、普渡河断裂带、会理—易门断裂带和元谋—绿汁江断裂带;“2横”为总体上北西走向的中强—中等右旋走滑活动断裂,包括红河断裂带、南华-楚雄断裂—石屏断裂—峨山断裂。这“5纵2横”构成了青藏高原东南缘双弧形旋扭构造体系^[26,77]外弧边界断裂的南翼和弧形块体内部断裂,是青藏高原受印度板块新生代以来北东持续挤压,高原内部向东挤出^[7,9,13,18~19],在高原东南缘受扬子板块阻挡及西侧喜马拉雅东构造结的阻挡,高原内部物质在高原东南缘向南—东南挤出的重要调节断裂带。

3.2 活动断裂对滇中城市群的主要影响

3.2.1 主要活动断裂对滇中城市群主要城镇的影响

滇中城市群地区晚第四纪活动断裂分布密集,主要城镇区基本分布于断陷盆地或断谷盆地,城镇的规划建设难以回避活动断裂(见图5)。

区内13条主要活动断裂带的主干及其分支或次级断裂,直接影响了滇中城市群地区的曲靖市、沾益县、陆良县、寻甸县、宜良县、华宁县、嵩明县、澄江县、川江县、昆明市、普宁县、玉溪市、易门县、元谋县、南华县、楚雄市、姚安县、牟定县、会泽县、寻甸、宣威、富源县等22个县、市级城市(见表5,图5、图6)。

上述受影响的县市中,昆明—玉溪—宜良—嵩明圈是云南人口密度较大、具有重要经济

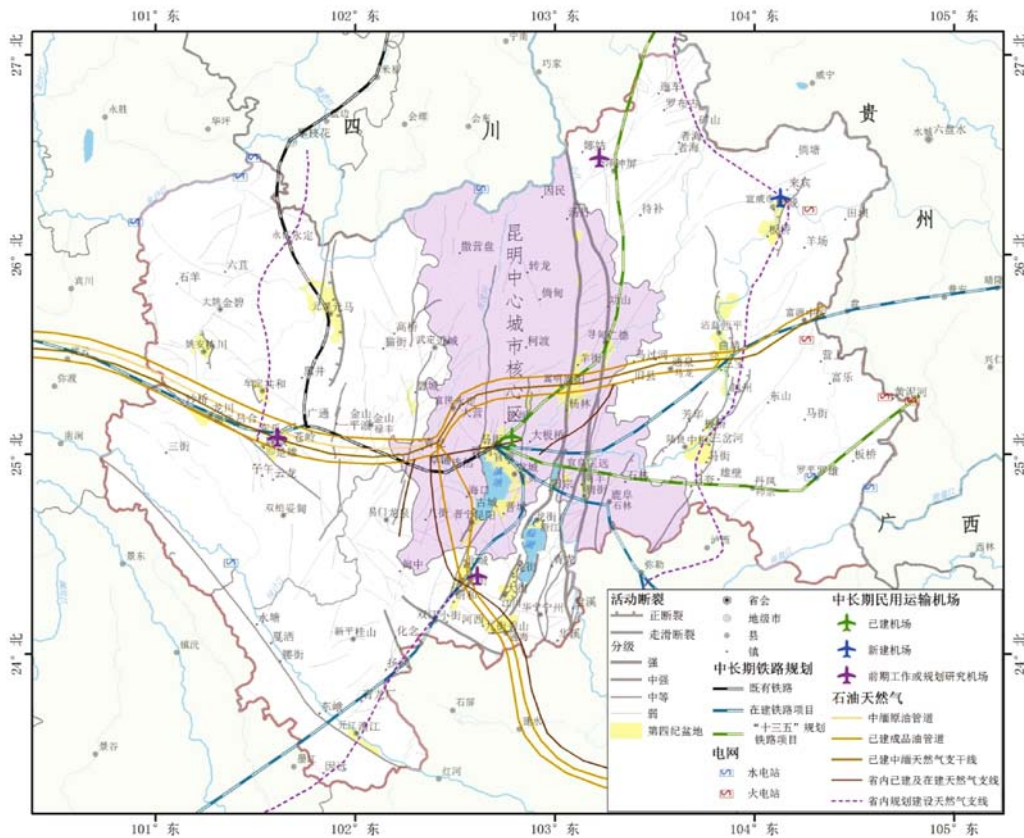


图5 滇中城市群地区主要城镇、交通、电网及石油天然气管道规划布局 (据云南“十三五”规划) 与活动断裂分布

Fig. 5 A map showing the main cities, the planning layout of the traffic, power grid, and oil and natural gas pipeline and the distribution of active faults in city group area in central Yunnan

和政治地位的城市圈，这些地区分别位于第四纪断裂活动为中强—强的普渡河断裂和小江断裂带南段上，是滇中城市群地区乃至云南的强震区带，中强震及大震较活跃，其诱发的地质灾害是该区域镇规划建设需要重点考虑的地质问题。位于曲靖—陆良断裂带上的曲靖市城镇圈，城镇规划面临的主要工程稳定性问题同样需要考虑第四纪断裂活动产生的灾害及诱发的滑坡、泥石流等问题。楚雄城镇圈位于北西向南华—楚雄断裂，该断裂中等活动程度，历史上曾发生过6.75级地震，城镇规划需要考虑活动断裂、中强地震以及诱发的次生地质灾害。

总体上说，滇中城市群的主要城镇基本上处于沿南北向断裂带、北西向活动形成的断陷盆地或断谷盆地内，这些断裂活动形成的平坦地形提供了适合人类生活和生产的环境，同时断裂的现今活动又制约了这些地区的规划建设，在进行城镇规划及重大工程建设中，活动断裂及地震活动，以及引发的次生地质灾害是滇中城市群发展中需要考虑的关键地质问题。

3.2.2 活动断裂对滇中城市群重大工程的影响

根据地方调研及云南省“十三五”规划纲要，滇中城市群地区已建、在建和拟建的重大工程主要有铁路、滇中引水工程、骨干光缆、石油天然气管道、重大水利工程、机场、大型水电火电站等电网工程、水运规划工程等民生工程 (图5、图6)。其中：在建国家级铁

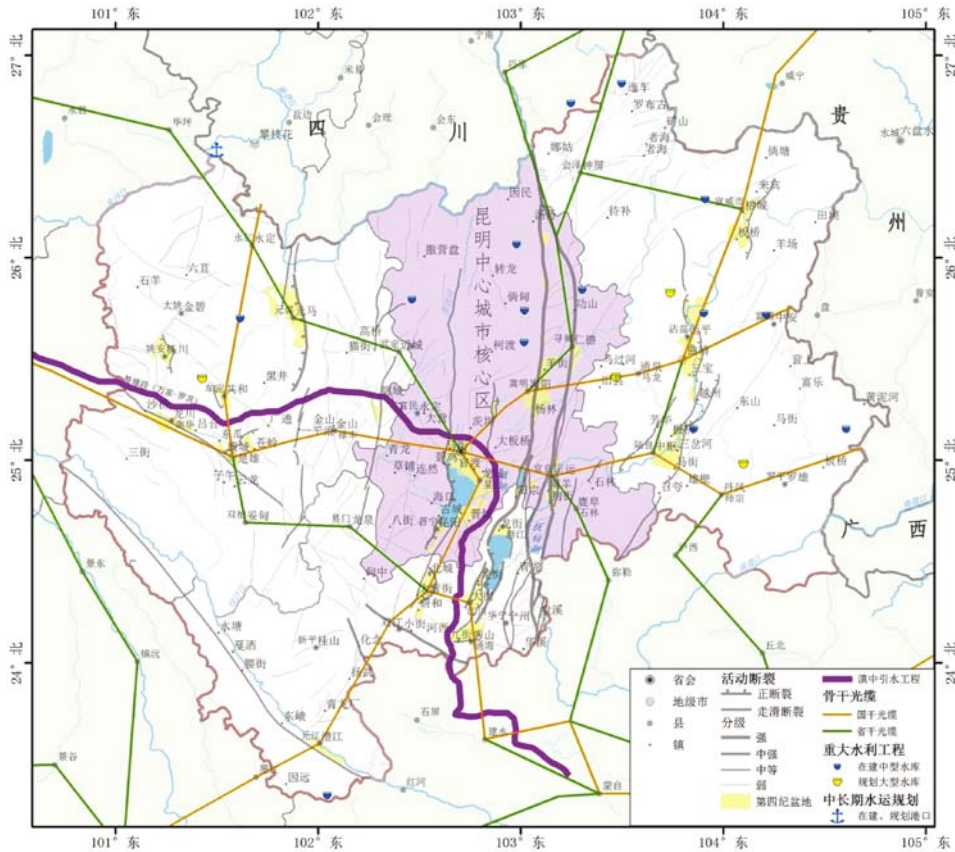


图6 滇中城市群地区主要城镇、引水工程、重大水利工程、水运规划及骨干光缆规划布局 (据云南“十三五”规划) 与活动断裂分布

Fig. 6 A map showing the main cities, the planning layout of the diversion project, water conservancy engineering, water transport, main optical cable and the distribution of active faults in city group area in central Yunan

路线和云南“十三五”及中长期规划铁路有8条,分别是中缅铁路通道、中老泰铁路通道、云桂铁路、中越铁路通道、南昆铁路、渝昆铁路、沪昆高铁、成昆铁路;滇中引水工程的楚雄段、昆明段和玉溪红河段,区内长341 km;国干光缆1116 km以及省干光缆774 km;主要石油天然气管道工程2218 km;在建中型水库及规划大型水库等重大水利工程16个;中长期民用运输机场工程5个;水电站和火电站等电网工程11个;在建、规划港口等中长期水运规划工程1个。

由于区内活动断裂分布密度大,多条近南北向活动断裂贯穿了城市群南北,北西向、北东向断裂的交错穿插,形成区内近似网状的活动断裂分布格局,使得城市群地区线状分布的重大工程难以回避活动断裂带,因此活动断裂的活动以及断裂控制的中强—大震是该区重大工程建设面临的主要工程稳定性问题;同时,由于区内特殊的高原-深谷地形地貌特征,断裂活动及地震诱发的次生灾害也是工程稳定性需要考虑的重要问题。

本文根据对断裂活动强弱程度的分级,将不同级别断裂对工程线路的影响范围和影响程度进行了划分,其中:强烈—中强断裂两侧各10 km区域内对工程线路的影响为严重;中等活动断裂两侧各5 km区域内对工程线路的影响程度为中等;弱活动断裂两侧各2 km的影响程度为弱;并据此对区内各类主要工程受活动断裂的影响及程度进行了统计。

3.2.2.1 活动断裂对主要在建及规划铁路的影响

穿过滇中城市群地区的在建国家级铁路线和云南“十三五”及中长期规划铁路线主要通过昆明，横贯东西或南北，总体上横穿了区内所有的南北向活动断裂以及穿过大部分北西向的活动断裂。

区内在建及规划铁路线累计长度约 1282 km，8 条铁路线总共受 16 条强烈—中强活动断裂影响，严重影响程度的区域宽度约为 262 km，占总铁路线长度的 20.4%；受 15 条中等活动程度的活动断裂影响，中等影响程度的区域宽度约为 197 km，占比 15.4%；受 71 条（段）弱活动断裂影响，轻度影响程度的区域宽度约为 294 km，占比 18.3%；三种影响程度合计占比 54.1%（见表 6）。

表 6 滇中城市群地区在建及规划主要铁路及其受活动断裂影响统计表

Table 6 The main under construction and planning rail affected by active faults in city group of central Yunnan

| 铁路名称 | 线路长度/ km | 活动断裂 数量/条 | 受影响程度 (断裂数量/累计受影响长度) | | | 累计受影响长度占比/% | | | |
|---------|-------------|--------------|-------------------------|--------|--------|-------------|------|-------|------|
| | | | 严重 | 中等 | 轻 | 严重 | 中等 | 轻度 | 小计 |
| 中缅铁路通道 | 85 | 6 | 0 | 1/54 | 5/19 | 0 | 63.5 | 22.4 | 85.9 |
| 中老泰铁路通道 | 216 | 18 | 2/65 | 2/38 | 14/45 | 30.1 | 20.1 | 23.8 | 74.0 |
| 云桂铁路 | 75 | 14 | 3/38 | 4/5 | 7/15 | 50.7 | 6.7 | 20 | 77.3 |
| 中越铁路通道 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 南昆铁路 | 228 | 22 | 4/36 | 10/25 | 8/6 | 15.8 | 11.0 | 2.6 | 29.4 |
| 渝昆铁路 | 242 | 19 | 2/89 | 1/18 | 16/55 | 36.8 | 7.4 | 22.73 | 66.9 |
| 沪昆高铁 | 184 | 17 | 5/34 | 3/20 | 9/34 | 18.5 | 10.9 | 18.5 | 47.8 |
| 成昆铁路 | 252 | 16 | 0 | 4/37 | 12/60 | 0 | 14.7 | 23.8 | 38.5 |
| 总计 | 1282 | 112 | 16/262 | 15/197 | 71/234 | 20.4 | 15.4 | 18.3 | 54.1 |

注：中等影响累计长度，不计在严重影响区内的长度；轻度影响累计长度，不计在在严重影响区内和中等影响区中的长度；中越铁路通道在滇中城市群地区内与云桂铁路为同一段，不再重复计算

3.2.2.2 活动断裂对滇中引水工程的影响

滇中引水工程从丽江向东至昆明，向南拐至石屏县，最终止于蒙自县的个旧，总干渠长约 661 km。区内斜穿过北西向华南—楚雄断裂北西端、牟定断裂东南段，横穿元谋—绿汁江断裂、会理—易门断裂、普渡河断裂等 3 条近南北向断裂，之后邻近小江断裂南段近似平行南行，穿过峨山断裂继续南行，共穿越区内 6 条断裂，并靠近 1 条断裂带与之并行（见图 6）。滇中引水工程穿越的地形地貌亦是高山峡谷区，因此滑坡、崩塌同样是工程稳定性面临的重要地质灾害问题。滇中引水工程在区内主要包括楚雄段（万家—罗茨），昆明段（罗茨—新庄）和玉溪红河段（新庄新坡背），长度约为 341 km，受 40 条（段）活动断裂的影响，受活动断裂影响的长度占比 46.1%，其中受强烈—中强、中等和弱活动断裂影响的长度占比分别为 13.5%，15.0% 和 17.6%（见表 7）。

表 7 滇中引水工程受活动断裂影响统计表

Table 7 The central Yunnan diversion project affected by active faults in city group of central Yunnan

| 工程名称 | 工程长度/ km | 直接产生 影响的活 动断裂 数量/条 | 受影响程度（断裂数量/ 累计受影响长度） | | | 累计受影响长度占比/% | | | |
|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------------|------|-------|-------------|------|------|------|
| | | | 严重 | 中等 | 轻 | 严重 | 中等 | 轻 | 总 |
| 楚雄段（万家—罗茨） | 141 | 7 | 0 | 2/11 | 5/18 | 0 | 7.8 | 12.8 | 20.6 |
| 昆明段（罗茨—新庄） | 115 | 20 | 1/20 | 3/29 | 16/34 | 17.4 | 25.2 | 29.6 | 72.2 |
| 玉溪红河段（新庄新坡背） | 85 | 13 | 2/26 | 2/11 | 9/8 | 30.6 | 13.0 | 9.4 | 52.9 |
| 合计 | 341 | 40 | 3/46 | 7/51 | 30/60 | 13.5 | 15.0 | 17.6 | 46.1 |

注：表中相应统计项的含义与表 6 相同

3.2.2.3 活动断裂对骨干光缆工程的影响

滇中城市群的骨干光缆主要包括国干光缆和省干光缆,其中国干光缆区内长1116 km,主要以昆明为中心,向东西部及北西南方向辐射;省干光缆以昆明为中心,放射状分布,辐射至周边城镇地区,区内总长约为774 km(见图6)。有146条活动断裂的活动对这些骨干光缆的正常使用可能造成影响,影响区域累计长度约为1202 m。其中强烈—中强活动断裂对其影响程度较严重,受影响的光缆工程累计长度311 km;受中等活动断裂影响的光缆长度累计390 km;受弱活动断裂影响的光缆长度501 km;骨干光缆累计受不同活动程度断裂影响的长度占比63.6%(见表8)。

表8 骨干光缆工程受活动断裂影响程度统计表

Table 8 The main optical cable project affected by active faults in city group of central Yunnan

| 光缆名称 | 光缆长度/ km | 直接产生 影响的活 动断裂数 量/条 | 受影响程度 (断裂数量/累计受影响长度) | | | 累计受影响长度占比/% | | | |
|------|-------------|-----------------------------|-------------------------|--------|---------|-------------|------|------|------|
| | | | 严重 | 中等 | 轻 | 严重 | 中等 | 轻 | 总计 |
| 国干光缆 | 1116 | 71 | 8/140 | 16/232 | 47/199 | 12.5 | 20.8 | 17.8 | 51.2 |
| 省干光缆 | 774 | 75 | 5/171 | 13/158 | 57/302 | 22.1 | 20.4 | 39.0 | 81.5 |
| 合计 | 1890 | 146 | 13/311 | 29/390 | 104/501 | 16.5 | 20.6 | 26.5 | 63.6 |

注:表中相应统计项的含义与表6相同

3.2.2.4 活动断裂对石油天然气管道工程的影响

根据云南“十三五”重大能源建设布局,滇中城市群地区已建、在建或规划建设石油天然气管道工程主要包括原油管道、成品油管道、天然气支干线,可分为过昆明市横贯滇中城市地区的近东西向管线,以及昆明—玉溪—蒙自近南北向管线工程。各类石油天然气管道工程总长2218 km(见图5)。主要受区内“5纵”断裂带的影响,管线工程累计受活动断裂影响的长度占比约为55.0%,其中影响程度严重的占11.6%,影响程度中等的20.0%,影响程度较弱的23.4%(见表9)。

表9 主要石油天然气管道工程受活动断裂影响程度统计表

Table 9 the main Oil and natural gas pipeline affected by active faults in city group of central Yunnan

| 管道名称 | 管道工程 长度/km | 直接产生 影响的活 动断裂数 量/条 | 受影响程度(断裂数量/ 累计受影响长度) | | | 累计受影响长度占比/% | | | |
|--------------|---------------|-----------------------------|-------------------------|--------|---------|-------------|------|------|------|
| | | | 严重 | 中等 | 轻度 | 严重 | 中等 | 轻度 | 总计 |
| 中缅原油管道 | 155 | 8 | 0 | 2/16 | 6/24 | 0 | 10.3 | 15.5 | 25.8 |
| 已建成品油管道 | 928 | 57 | 4/107 | 9/227 | 44/236 | 11.5 | 24.5 | 25.4 | 61.4 |
| 已建中缅天然气支干线 | 362 | 26 | 2/38 | 4/82 | 20/109 | 10.5 | 22.7 | 30.1 | 63.3 |
| 省内已建及在建天然气支线 | 223 | 30 | 4/72 | 8/40 | 18/49 | 32.3 | 17.9 | 21.9 | 72.1 |
| 省内规划建设天然气支线 | 550 | 31 | 2/41 | 6/78 | 23/101 | 7.5 | 14.2 | 18.4 | 40.0 |
| 合计 | 2218 | 152 | 12/258 | 29/443 | 111/519 | 11.6 | 20.0 | 23.4 | 55.0 |

注:表中相应统计项的含义与表6相同

3.2.2.5 活动断裂对重大水利工程的影响

根据云南省“十三五”及中长期水运规划,区内重大水利工程包括在建中型水库和规划大型水库分别为12和4个(见图6)。其中3个中型水库受强烈—中强活动断裂的影响,2个中型水库受中等活动断裂的影响,弱活动断裂影响中型水库1个及规划大型水库1个;受活动断裂影响的在建中型水库个数占比50%,规划大型水库受活动断裂影响个数占比25%。

3.2.2.6 活动断裂对中长期民用运输机场工程的影响

滇中城市群地区中长期民用运输机场5个,包括1个已建,1个新建,3个规划建设

(见图 5), 其中受中等活动断裂和弱活动断裂影响的机场各 2 个, 受断裂影响的个数占比 80%。

3.2.2.7 活动断裂对电网工程的影响

滇中城市群地区的电站 11 个, 其中水电站 7 个, 火电站 4 个, 主要分布在该区的北西、北部、西部及西南边缘地区, 距离主要的活动断裂都比较远, 只有 1 个火电站处在北西向的弥勒—富源断裂北东端附近(见图 5), 受到该断裂的影响。

3.2.2.8 活动断裂对中长期水运规划工程的影响

根据云南省“十三五”及中长期水运规划, 滇中城市群地区的在建、规划港口只有 1 个, 并且距离活动断裂较远(见图 6), 直接受断裂活动影响的程度小。

3.3 滇中城市群地区地壳稳定综合评价结果

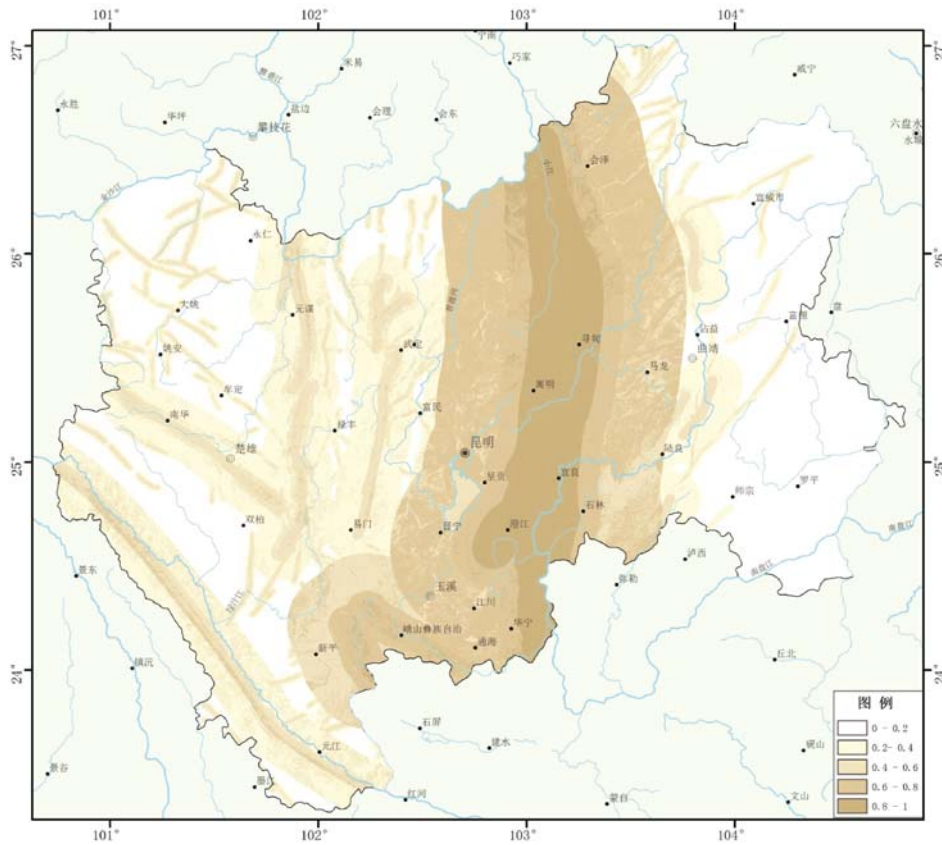
根据与不同活动程度断裂的距离、地形坡度特征及该区的岩性特征, 分别赋予 3 个区域地壳稳定性影响因子原始分值及相应的权重, 计算并综合评价出滇中城市群地区区域地壳稳定性程度, 结果见图 7。根据区域地壳稳定性程度 $\alpha(i)$ 的分值, 按 0.2 的间隔值将其分为 5 个档次, 得到 5 种不同的区域地壳稳定程度区域: ① $0.8 < \alpha(i) \leq 0.1$ 为极不稳定区; ② $0.6 < \alpha(i) \leq 0.8$ 为不稳定区; ③ $0.4 < \alpha(i) \leq 0.6$ 为次不稳定区; ④ $0.2 < \alpha(i) \leq 0.4$ 为次稳定区; ⑤ $\alpha(i) \leq 0.2$ 为稳定区。按照这个划分标准, 滇中城市群地区属于极不稳定区的是沿小江断裂带分布的寻甸—宜良—澄江南北向的狭长区; 不稳定区有 3 个, 位于极不稳定区外围, 分别为昆明—玉溪地区、会泽—马龙—石林区以及峨山—通海区; 次不稳定区主要沿断裂活动程度为中等的地区分布, 包括沿会理—易门断裂带区域、元谋—绿汁江断裂带区域、南华—楚雄断裂区域、红河断裂带区域和新平弧形区域; 次稳定地区沿各弱活动断裂分布; 远离断裂的地区为稳定区。极不稳定区、不稳定区和次不稳定区占全区面积的三分之一强。

可以看出, 该地区的地壳稳定性与活动断裂的活动程度及与断裂的距离远近关系最为密切, 地形坡度和岩性的影响主要在局部地区范围内。由于滇中城市群地区的活动断裂分布密集, 各活动断裂的活动程度也不尽相同, 加之地形坡度及岩性的影响, 在不稳定区内往往存在局部的次不稳定区或稳定区, 或者局部存在极不稳定区; 同时, 在次不稳定区内, 局部存在不稳定区。

4 讨论

4.1 关于活动断裂活动强弱程度分级及其对城镇及重大工程的影响

断裂活动的强弱程度不同, 其对邻近的城镇及工程的影响程度也不同, 因此活动断裂及其活动程度的识别对评价其对城镇及重大工程的影响极为重要。断裂的活动速率是判别其活动程度强弱的关键因素, 活动速率分为地质时期活动速率, 以及根据几年或十几年连续观测的地壳 GPS 运动速度差求得的现今活动速率。在评价活动断裂对城镇规划及重大工程影响程度时, 一般是考虑上百年的时间, 因此, 活动断裂地质时期的活动速率更有实际意义, 现今的 GPS 观测推算的活动速率可以作为参考。活动断裂地质时期的活动速率受断裂错动标志物的识别、不同测年方法及误差等影响, 不同研究者对同一断裂活动程度的认识有不同程度的差别。因此在活动断裂分级时, 除了活动速率, 还充分考虑了活动断裂对现今地形地貌的改造程度、对第四纪盆地的控制作用, 以及中强地震及大震的活动性等。活动断裂的影响



0.8 $\alpha(i)$ ≤ 0.1 为极不稳定区; 0.6 $\alpha(i)$ ≤ 0.8 为不稳定区; 0.4 $\alpha(i)$ ≤ 0.6 为次不稳定区; 0.2 $\alpha(i)$ ≤ 0.4 为次稳定区”;

图7 滇中城市群地区地壳稳定性综合评价初步结果

Fig. 7 A map showing preliminary result of regional crustal stability assessment in city group of central Yunnan

范围是评价其对城镇及重大工程影响的另一个重要指标, 参考区内中强地震烈度分布的短轴宽度、活动断裂错动可能引起的地壳变形影响宽度, 将区内强烈—中强断裂两侧各 10 km 区域内对工程线路的影响定性为严重, 中等活动断裂两侧各 5 km 区域内对工程线路的影响程度为中等, 弱活动断裂两侧各 2 km 区域内对工程线路的影响程度为轻度。

活动断裂的厘定及其活动强弱程度的分级有助于梳理出主干断裂及不同的分支断裂, 深入认识该区活动断裂的构造体系, 同时对活动断裂影响城镇及重大工程的评价有一个比较明确的定量参考指标。但同时也认识到, 这些量化的努力受到当前调查程度及科学认识水平的限制, 还存在很多问题, 尚无法完全量化。因此对一些采用定量方法获得的评价结果, 应该定性或半定量地去判别和看待。

4.2 关于地壳稳定性综合评价问题

地壳稳定性综合评价是一个复杂的问题。地壳稳定性本是一个不明确或不确切的概念, 在不同的使用场合, 其含义不同, 并且稳定与不稳定也是相对的。因此, 只有明确其使用范围并规定其稳定与不稳定的含义, 才可能具有比较明确的意义。

本文的区域地壳稳定性评价属于区域上小比例尺的地壳稳定性问题, 与工程场地的稳定性评价不一样, 只考虑了本地区与区域地壳稳定性普遍相关的 3 个主要因素, 即活动断裂的

活动程度、岩性特征及地形的坡度。这只是一个区域地壳稳定性评价粗略的初步结果,各影响因子的取值及权重有待做更多相关研究工作;另外,当具体到工程场地的稳定性评价时,区域地壳稳定性评价结果可以作为工程场地稳定性评价的参考,在区域地壳稳定性评价基础上,考虑更多的与场地稳定性相关的影响因素作进一步的评价工作。

5 结论

活动断裂的系统梳理结果表明,滇中城市群地区的活动断裂带主要有13条,构成了“5纵2横”的构造格局,即5条近南北向的从强烈活动、中强活动到中等活动的左旋走滑断裂带(曲靖-陆良断裂带、小江断裂带、普渡河断裂带、会理—易门断裂带、元谋—绿汁江断裂带),以及2条北西走向的中强—中等右旋走滑活动断裂带(红河断裂带、南华-楚雄断裂—石屏断裂—峨山断裂带)。

滇中城市群地区13条主要活动断裂带直接影响区内22个县级以上城市;按强烈—中强断裂两侧各10 km区域内对工程线路的影响为严重,中等活动断裂两侧各5 km区域内对工程线路的影响程度为中等,弱活动断裂两侧各2 km的影响程度为轻度统计,滇中城市群地区“十三五”规划或中长期规划的重要已建、在建和拟建的铁路、滇中引水工程、骨干光缆、石油天然气管道、重大水利工程、机场、大型水电火电站等电网工程、水运规划工程等重大民生工程建设受活动断裂影响的占比如下:在建国家级铁路线和云南“十三五”及中长期规划铁路有8条,总长1282 km,受活动断裂影响的长度占比54.1%;滇中引水工程区内长341 km,受活动断裂影响的长度占比46.1%;国干光缆及省干光缆1890 km,受活动断裂影响的长度占比63.6%;主要石油天然气管道工程2218 km,受活动断裂影响的长度占比55.0%;在建中型水库及规划大型水库等重大水利工程16个,受活动断裂影响的7个;中长期民用运输机场工程5个,受活动断裂影响的4个;水电站和火电站等电网工程11个,受活动断裂影响的1个;在建、规划港口等中长期水运规划工程1个,受活动断裂影响的0个。

滇中城市群地区区域地壳稳定性综合评价的初步结果表明:区内极不稳定区为沿小江断裂带分布的寻甸—宜良—澄江南北向的狭长区;不稳定区有3个,含昆明—玉溪地区,会泽—马龙—石林区,以及峨山—通海区;次不稳定区主要沿活动断裂为中等程度的地区分布,包括沿会理—易门断裂带的区域、元谋—绿汁江断裂带区域、南华—楚雄断裂区域、红河断裂带区域和新平弧形区域。

由于活动断裂是制约该区发展的主要地质因素,在今后的地质调查中,应该加强活动断裂大比例尺调查工作,详细查明活动断裂的演化及现今活动特征,系统开展区内活动构造体系研究。

面临的主要问题:滇中城市群地区活动断裂分布密度大,区内具有多条控震断裂,地震活动性强,同时区内的高山深谷地形地貌容易引发崩塌、滑坡等地质灾害,重要城镇基本位于断裂形成的断陷盆地或断谷盆地内,因此,不论是城镇规划建设,还是重要工程建设,活动断裂、中强—大震活动以及诱发的次生地质灾害是工程稳定性需考虑的首要问题。

建议:重点发展绿色生态旅游及特色农业;重大工程建设必须加强活动断裂的调查工作。

参 考 文 献

- [1] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1990.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province. Regional geology of Yunnan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [2] 毛玉平, 韩新民. 云南地区强震 ($M \geq 6$) 研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003.
MAO Yu-ping, HAN Xin-min. The study on the $M \geq 6$ earthquakes in Yunnan Province [M]. Kunming: Yunnan Science & Technology Press, 2003.
- [3] Armijo R, Tapponnier P, Han T. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94: 2787 ~ 2838.
- [4] Armijo R, Tapponnier P, Mercier J L, et al. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implication [J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91: 13803 ~ 13872.
- [5] Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia [J]. Geophys. Res. Lett., 1993, 20: 895 ~ 898.
- [6] Burchfiel B C, Royden L H. Tectonics of Asia 50 years after the death of Emile Argand [J]. Ecol. Geol. Helv., 1991, 84: 599 ~ 629.
- [7] England P, Molnar P. Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet [J]. Nature, 1990, 344: 140 ~ 142.
- [8] Kidd W S F, Molnar P. Quaternary and active faulting observed on the 1985 Academia Sinica-Royal Society Geotraverse of Tibet [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 1988, 327 (1594): 337 ~ 363.
- [9] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of continental collision [J]. Science, 1975, 189: 419 ~ 425.
- [10] Patriat P, Achaache J. India-Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates [J]. Nature, 1984, 311: 615 ~ 621.
- [11] Rowley D B. Age of initiation of collision between India and Asia; A review of stratigraphic data [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1996, 145: 1 ~ 13.
- [12] Rowley D B, Currie B S. Palaeo-altimetry of the Late Eocene to Miocene Lunpola Basin, central Tibet [J]. Nature, 2006, 439: 677 ~ 681.
- [13] Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet [J]. Science, 1997, 276: 788 ~ 790.
- [14] Shen Z K, Lü J, Wang M, et al. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110: B11409.
- [15] Tapponnier P, Mercier J L, Armijo R, et al. Field evidence for active normal faulting in Tibet [J]. Nature, 1981, 294: 410 ~ 414.
- [16] Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of Tibet Plateau [J]. Science, 2001, 294: 1671 ~ 1677.
- [17] Tapponnier P, Mercier J L, Proust F, et al. The Tibetan side of the India Eurasia collision [J]. Nature, 1981, 294: 405 ~ 410.
- [18] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plastcine [J]. Geology, 1982, 10: 611 ~ 616.
- [19] Wang E C, Burchfiel B C, Royden L H, et al. Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang, Red River, and Dali fault systems of south-western Sichuan and central Yunnan, China [J]. Geological Society of America Special Paper, 1998, 327: 108.
- [20] Yin A, Harrison M T. Geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 2000, 28: 211 ~ 280.
- [21] Zhang P, Shen Z, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data [J]. Geology, 2004, 32: 809 ~ 812.
- [22] Yeats R S, Sieh K, Allen C R. The geology of earthquake [M]. New York: Oxford University Press, 1997.
- [23] Slemmons D B, McKinney R. Definition of active fault [M]. Vicksburg Miss: Army Engineer Waterways Experiment Station, 1977.
- [24] Slemmons D B, Defolo C. Evaluation of active faulting and associated hazards [C] // Active tectonics: Impact on society. The National Academies Press, 1986: 45 ~ 48.

- [25] Machette M N. Active, capable, and potentially active faults; A paleoseismic perspective [J]. *Journal of Geodynamics*, 2000, 29 (3): 387 ~ 392.
- [26] 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 ~ 402.
WU Zhong-hai, ZHANG Yue-qiao, HU Dao-gong. Neotectonics, active tectonics and earthquake geology [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33 (4): 391 ~ 402.
- [27] 吴中海, 周春景, 谭成轩, 等. 长江经济带地区的活动构造与区域地壳稳定性 [J]. *地质力学学报*, 2016, 22 (3): 379 ~ 411.
WU Zhong-hai, ZHOU Chun-jing, TAN Cheng-xuan, et al. The active tectonics and the regional crustal stability in the Yangtze River economic belt [J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22 (3): 379 ~ 411.
- [28] 吴中海, 龙长兴, 范桃园, 等. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制 [J]. *地质通报*, 2015, 34 (1): 1 ~ 31.
WU Zhong-hai, LONG Chang-xing, FAN Tao-yuan, et al. The arc rotational-shear active tectonic system on the southeastern margin of Tibetan Plateau and its dynamic characteristics and mechanism [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34 (1): 1 ~ 31.
- [29] 邓起东, 冉永康, 杨晓平, 等. 中国活动构造图 [M]. 北京: 地震出版社, 2007.
DENG Qi-dong, RAN Yong-kang, YANG Xiao-ping, et al. Active tectonics map of China [M]. Beijing: Seismological Press, 2007.
- [30] 魏顺民, 李祥根, 向宏发, 等. 云南红河走滑断裂尾端拉张区的运动学模式 [C] // 国家地震局地质研究所. 现代地壳运动研究. 北京: 地震出版社, 1991: 1 ~ 12.
GUO Shun-min, LI Xiang-gen, XIANG Hong-fa, et al. Kinematic model of Honghe strike-slip fault in Yunnan [C] // Institute of Geology, China Earthquake Administration. Study on modern crust movement. Beijing: Seismological Press, 1991: 1 ~ 12.
- [31] 魏顺民, 向宏发, 计凤桔, 等. 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.
GUO Shun-min, XIANG Hong-fa, JI Feng-ju, et al. A study on the relation between Quaternary right-lateral slip and tip extension along the Honghe fault [J]. *Seismology and Geology*, 1996, 18 (4): 301 ~ 309.
- [32] 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.
XIANG Hong-fa, HAN Zhu-jun, GUO Shun-min, et al. Large-scale dextral strike-slip movement and associated tectonic deformation along the Red River fault zone [J]. *Seismology and Geology*, 2004, 26 (4): 597 ~ 610.
- [33] 国家地震局西南烈度队. 川滇强震区地震地质调查汇编 [M]. 北京: 地震出版社, 1979.
Southwest Intensity Team of National Seismological Bureau. Compilation of seismic and geological survey of strong earthquake areas in Sichuan and Yunnan [M]. Beijing: Seismological Press, 1979.
- [34] 李珏. 鲜水河—小江断裂带 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.
LI Ping. The Xianshuihe-Xiaojiang fault zone [M]. Beijing: Seismological Press, 1993.
- [35] 宋方敏, 汪一鹏, 俞维贤, 等. 小江活动断裂带 [M]. 北京: 地震出版社, 1998.
SONG Fang-min, WANG Yi-peng, YU Wei-xian, et al. The Xiaojiang active fault zone [M]. Beijing: Seismological Press, 1998.
- [36] Allen C R, 韩源, Sich K E, 等. 红河断裂的第四纪活动研究 (一): 现代活动概貌和活动断裂证据 [J]. *地震研究*. 1984, 7 (1): 39 ~ 51.
Allen C R, HAN Yuan, Sich K E, et al. 1984. Study of the Quaternary activities of the Red River Fault (I): General survey of its contemporary activities and evidence of the active faulting [J]. *Journal of Seismological Research*, 1984, 7 (1): 39 ~ 51.
- [37] Allen C R, 韩源, Sich K E, 等. 红河断裂的第四纪活动研究 (二): 断裂活动特征、滑动速率与地震重复间隔探讨 [J]. *地震研究*, 1984, 7 (2): 171 ~ 186.
Allen C R, HAN Yuan, Sich K E, et al. 1984. study of the Quaternary Activities of the Red River Fault (II) -its Features of Activity, Slip Rate and Recurrence Intervals of Earthquakes [J]. *Journal of Seismological Research*, 1984, 7 (2): 171 ~ 186.
- [38] 魏顺民, 计凤桔, 向宏发, 等. 红河活动断裂带 [M]. 北京: 海洋出版社, 2001.
GUO Shun-min, JI Feng-ju, XIANG Hong-fa, et al. Red-river fault zone [M]. Beijing: China Ocean Press, 2001.
- [39] 向宏发, 魏顺民, 张晚霞, 等. 红河断裂带南段断裂活动性转换的地质特征研究 [C] // 邓起东, 汪一鹏, 张培

- 震,等. 活动断裂研究(4). 北京:地震出版社,1995:38~45.
- XIANG Hong-fa, GUO Shun-min, ZHANG Wan-xia, et al. Geologic characteristics of the transition of fault activity on the southern segment of the Honghe Fault zone [C] //DENG Qi-dong, WANG Yi-peng, ZHANG Pei-zhen, et al. Research on active fault (4). Beijing: Seismological Press, 1995: 38~45.
- [40] Duong C, Feigl K L. Geodetic measurement of horizontal strain across the Red River Fault near Thac Ba, Vietnam [J]. J. Geod., 1999, 73: 298~310.
- [41] Feigl K L, Duong C, Becker M, et al. Insignificant horizontal strain across the Red River Fault near Thac Ba, Vietnam from GPS measurements 1994—2000 [M]. Geophys. Res. Abst., 2003, Abstract 04707.
- [42] 向宏发, 魏顺民, 张晚霞, 等. 红河断裂带南段中新世以来大型右旋位错量的定量研究 [J]. 地震地质, 2007, 29 (1): 34~50.
- XIANG Hong-fa, GUO Shun-min, ZHANG Wan-xia, et al. Quantitative study on the large scale dextral strike slip offset in the southern segment of the Red River Fault since Miocene [J]. Seismology and Geology, 2007, 29 (1): 34~50.
- [43] 杨振宇, 孙知明, 马醒华, 等. 红河断裂两侧早第三纪古地磁研究及其地质意义 [J]. 地质学报, 2001, 75 (1): 35~44.
- YANG Zhen-yu, SUN Zhi-ming, MA Xing-hua, et al. Palaeomagnetic study of the Early Tertiary on both sides of the Red River Fault and its geological implications [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75 (1): 35~44.
- [44] 徐锡伟, 程国良, 于贵华, 等. 川滇菱形块体顺时针转动的构造学与古地磁学证据 [J]. 地震地质, 2003, 25 (1): 61~69.
- XU Xi-wei, CHENG Guo-liang, YU Gui-hua, et al. Tectonic and paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of the Sichuan-Yunnan rhombic block [J]. Seismology and Geology, 2003, 25 (1): 61~69.
- [45] 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, 55 (1): 76~94.
- LI Shi-hu, HUANG Bao-chun, ZHU Ri-xiang. Paleomagnetic constraints on the tectonic rotation of the southeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55 (1): 76~94.
- [46] 谷德振. 地质构造与工程建设 [J]. 科学通报, 1963, 8 (10): 18~23.
- GU De-zhen. Geological structure and engineering construction [J]. Chinese Science Bulletin, 1963, 8 (10): 18~23.
- [47] 谷德振. 岩体工程地质力学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- GU De-zhen. Foundations of rock engineering geomechanics [M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [48] 李四光. 关于地震地质问题 [J]. 中国地质, 1965, 12: 1~7.
- LI Si-guang. Some problems on seismo-geologic research [J]. Geology in China, 1965, 12: 1~7.
- [49] 李四光. 地震地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- LI Si-guang. Seismology and geology [M]. Beijing: Science Press, 1973.
- [50] 李四光. 地质力学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- LI Si-guang. Introduction to geological mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1973.
- [51] 刘国昌. 地质力学及其在水文地质工程地质方面的应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1979.
- LIU Guo-chang. Geomechanics and its application in hydrological and engineering geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979.
- [52] 刘国昌. 中国工程地质发展的回顾、反思和展望 [J]. 河北地质学院学报, 1988, 11 (3): 1~8.
- LIU Guo-chang. Review, rethink and prospect on the development of engineering geology in China [J]. Journal of Hebei Geology College, 1988, 11 (3): 1~8.
- [53] 陈庆宣, 孙叶, 邵云惠. 中国构造体系的现今活动性 [C] //国际交流地质学术论文集(1). 北京: 地质出版社, 1980: 69~78.
- CHEN Qing-xuan, SUN Ye, SHAO Yun-hui. The present activity of the tectonic system in China [C] //Proceedings of international exchange geology (1). Beijing: Geological Publishing House, 1980: 69~78.
- [54] 陈庆宣, 孙叶, 王治顺. 运用地质力学方法研究区域地壳稳定性 [C] //地质力学文集(第九集). 北京: 地质出版社, 1989.
- CHEN Qing-xuan, SUN Ye, WANG Zhi-shun. Study on the regional crustal stability applying geomechanism [C] //The collection of geomechanism. Beijing: Geological Publishing House, 1989.
- [55] 胡海涛. 广东核电站规划选址区域地壳稳定性分析与评价 [M]. 北京: 中国档案出版社, 1988.
- HU Hai-tao. Analysis and evaluation of regional crustal stability in nuclear power plant site selection in Guangdong [M]. Beijing: China Archives Press, 1988.

- [56] 胡海涛, 贾加麟, 殷跃平. 区域地壳稳定性研究的理论与发展 [C] // 第五届国际工程地质大会论文集. 北京: 地质出版社, 1987.
HU Hai-tao, JIA Jia-lin, YIN Yue-ping. The theory of studying on regional crustal stability and its development [C] // Proceedings of the IAEG 5th Congress. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [57] 孙叶, 谭成轩, 李开善, 等. 区域地壳稳定性量化评价 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
SUN Ye, TAN Cheng-xuan, LI Kai-shan, et al. Quantitative evaluation of regional crustal stability [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [58] 刘传正, 胡海涛. 工程选址的“安全岛”多级逼近与优选理论 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1993, 4 (1): 28~37.
LIU Chuan-zheng, HU Hai-tao. The multi-scale approaching to “safety island” and optimization theory in engineering site selection [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1993, 4 (1): 28~37.
- [59] 刘传正. 环境工程地质学导论 [M]. 北京: 地质出版社, 1995.
LIU Chuan-zheng. Introduction to environmental engineering geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [60] 孙广忠. 岩体结构力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
SUN Guang-zhong. Rockmass structural mechanism [M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [61] 王思敬, 黄鼎成. 攀西地区环境工程地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
WANG Si-jing, HUANG Ding-cheng. Environmental engineering geology problems in Panxi Region [M]. Beijing: China Ocean Press, 1990.
- [62] 王思敬, 牛宏建. 东秦岭—大别山造山带大型推覆构造的物理机制及动力学分析 [M]. 北京: 地震出版社, 1995.
WANG Si-jing, NIU Hong-jian. Physical mechanism and dynamic analysis on large nappe structure in East Qinling-Dabieshan orogenic belt [M]. Beijing: Seismological Press, 1995.
- [63] 张卓元. 工程地质勘探 [M]. 北京: 地质出版社, 1981.
ZHANG Zhuo-yuan. Engineering geological exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1981.
- [64] 殷跃平. 区域地壳稳定性研究的专家知识结构模型 [J]. 水文地质工程地质, 1990, 18 (2): 8~15.
YIN Yue-pin. Expert knowledge structure model of regional crustal stability studies [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1990, 18 (2): 8~15.
- [65] 殷跃平, 胡海涛, 康宏达. 重大工程选址区域地壳稳定性评价专家系统 [M]. 北京: 地震出版社, 1992.
YIN Yue-ping, HU Hai-tao, KANG Hong-da. Expert system of regional crustal stability assessment in important engineering site selection [M]. Beijing: Seismological Press, 1992.
- [66] 吴树仁. 清江流域地壳稳定性工程地质研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995.
WU Shu-ren. The engineering geology study on the crustal stability of Qingjiang River basin [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1995.
- [67] 易明初. 中国区域地壳稳定性图 [M]. 北京: 地质出版社, 1997.
YI Ming-chu. Map on regional crustal stability in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
- [68] 彭建兵, 毛彦龙, 范文, 等. 区域稳定性动力学研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
PENG Jian-bing, MAO Yan-long, FAN Wen, et al. Researches on the dynamics of region stability [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [69] 吴珍汉, 周春景, 王薇, 等. 青藏铁路沿线构造活动性评价和工程稳定性区划 [J]. 地质通报, 2005, 24 (5): 401~410.
WU Zhen-han, ZHOU Chun-jing, WANG Wei, et al. Assessment on tectonic activity and divisions of engineering stability along the Golmud-Lhasa Railway [J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24 (5): 401~410.
- [70] 周春景, 吴珍汉, 石广仁. BP神经网络在青藏铁路南段地壳稳定性定量评价中的应用 [J]. 地质科技情报, 2007, 26 (3): 79~85.
ZHOU Chun-jing, WU Zhen-han, SHI Guang-ren. Application of BP artificial neural network to quantitative assessment on crust stability along the Golmud-Lhasa Railway across South Tibetan Plateau [J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26 (3): 79~85.
- [71] 姚鑫, 李凌婧, 张永双, 等. 青藏高原东缘区域地壳稳定性评价 [J]. 地质通报, 2015, 34 (1): 32~44.
YAO Xin, LI Ling-jing, ZHANG Yong-shuang, et al. Regional crustal stability assessment of the eastern margin of Tibetan Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34 (1): 32~44.
- [72] 胡道功, 吴中海, 吴珍汉, 等. 东昆仑断裂带库赛湖段晚第四纪古地震研究 [J]. 第四纪研究, 2007, 27 (1):

27~34.

HU Dao-gong, WU Zhong-hai, WU Zhen-han, et al. Late Quaternary paleoseismic history on the Kusai Lake segment of East Kunlun fault zone in northern Tibet [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27 (1): 27~34.

[73] 胡道功, 叶培盛, 吴珍汉, 等. 东昆仑断裂带西大滩段全新世古地震研究 [J]. *第四纪研究*, 2006, 26 (6): 1012~1020.

HU Dao-gong, YE Pei-sheng, WU Zhen-han, et al. Research on Holocene Paleoearthquakes on the Xidatan Segment of the East Kunlun fault zone in northern Tibet [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26 (6): 1012~1020.

[74] 吴中海, 周春景, 冯卉, 等. 青海玉树地区第四纪活动断裂与地震 [J]. *地质通报*, 2014, 32 (4): 419~469.

WU Zhong-hai, ZHOU Chun-jing, FENG Hui, et al. Active faults and earthquake around Yushu in eastern Tibetan Plateau [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 32 (4): 419~469.

[75] 周春景. 巴颜喀拉块体边界应力场变化及其对强震发生的影响 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2014.

ZHOU Chun-jing. The stress field changes near the boundary fault zones in the Bayanhar Block and their effect on the large earthquake [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, 2014.

[76] 李陈侠. 东昆仑断裂带东段(玛沁—玛曲)晚第四纪长期滑动习性研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2009.

LI Chen-xia. The long-term faulting behavior of the eastern segment (Maqin-Maqu) of the East Kunlun Fault since the Late Quaternary [D]. Beijing: Institute of Geology of China Earthquake Administration, 2009: 101~117.

[77] 吴中海, 周春景. 中国及西南地区活动构造体系格局 [C] // 杨振宇, 范桃园, 吴中海, 等. 西南地区活动构造与应力场模拟成果报告. 2011.

WU Zhong-hai, ZHOU Chun-jing. The active tectonic system in China and its southwest region [C] // YANG Zhen-yu, FAN Tao-yuan, WU Zhong-hai, et al. the Report to the active tectonic in the southwest of China and its structural stress modeling results. 2011.

THE MAJOR ACTIVE FAULTS AND REGIONAL CRUSTAL STABILITY ASSESSMENT IN THE AREA OF CITY GROUP IN CENTRAL YUNNAN

ZHOU Chun-jing^{1,2}, WU Zhong-hai^{1,2}, MA Xiao-xue³, LI Jia-cun³, WANG Ji-long⁴

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Neotectonic and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;

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

4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Combining previous data, active fault remote sensing interpretation and geological field survey, we classify the active faults into four classes according the fault activity in city group of central Yunan. They are faults with very high activity rate, faults with high activity rate, faults with moderate activity rate and faults with low activity rate. It shows that there are thirteen main active faults zone in the study area, with an image of “5 longitudinal and 2 lateral” fault zones. The study of the active fault affection on the main project reveals that the active faults are the key geological factor that restricts the layout of the cities and the main projects. The regional crustal stability assessment is calculated by the three factors of faults, rocks and slopes. The result suggests that most areas of the city group of central Yunnan is “unstable”, one-third of the city group area is “extremely unstable region”, “unstable region” or “sub unstable region”.

Key words: city group in central Yunnan; active fault; classification of fault activity intensity; active structural system; regional crustal stability assessment