

长江三峡地区巴东野三关地震成因探讨*

狄莉莎¹⁾ 陈俊华^{1,2)}

(1) 中国地震局地震研究所, 武汉 430071
(2) 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026)

摘要 巴东野三关地区的微震活动具有间歇性、低频特征, 分布于长江、清江分水岭——香龙山背斜南侧。通过对该区近年来微小地震震源参数研究表明: 其成因不同于天然地震和水库诱发地震, 似乎是由于长期开采煤矿, 使地表浅层应力集中、应变累积, 导致岩体失稳而产生的采矿诱发地震。

关键词 微震 地震成因 地质构造 震源参数 诱发地震

中图分类号: P315.72+8 **文献标识码:** A

ON GENESIS OF YESANGUAN MICRO-EARTHQUAKES IN THREE GORGES AREA ON YANGTZE RIVER

Di Lisha¹⁾ and Chen Junhua^{1,2)}

(1) *Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071*
(2) *Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

Abstract The micro-earthquakes in Yesanguan region have the features of intermittency and low frequency. They distribute on the south side of Xianglong hill anticline—the watershed between Yangtze river and Qingjiang river. Having studied the parameters of the micro-earthquakes in recent years, we find that the genesis is different from the natural earthquake and reservoir earthquake. It seems to be caused by the occurrence of coal mining goaf where the shallow layer's stress of the earthsurface converges and strain accumulates, leads the rock body become unstable and induce these earthquakes.

Key words: micro-earthquake, seismogenesis, geologic structure, focal parameter, induced earthquake

1 引言

长江三峡水库于2003年6月蓄水以来,在水库库首区的秭归、巴东、长阳、巫山等沿江库段发生了一系列微小地震,引起有关方面的高度关注。在此期间,2004年5~9月和2005年9~12月,在距长江三峡水库南侧40千米的巴东野三关地带间歇性地发生了一些微小地震。由于这些地震事件处于三峡

水库库首区地震重点监视区南缘,因此研究其成因,以探索与三峡水库库段内的地震事件的关系是有意义的。为此,本文以2004年9月13日野三关 M_L 3.8地震为中心,对北纬 $30.4^\circ \sim 30.8^\circ$,东经 $110.1^\circ \sim 110.5^\circ$ 为地震地质研究区,取震源深度 ± 5 km左右发生的微小地震,从地质构造、震源参数等方面对发生在巴东野三关地区的微小地震的成因进行探讨。

* 收稿日期:2006-11-02

基金项目:中国科技部社会公益研究专项(2004DIB3J131);长江三峡工程开发项目

作者简介:狄莉莎,女,1956年生,高级工程师,主要研究方向:地震分析预报及地震活动性研究。E-mail:saly0560@163.com

2 地质地理环境

该研究区处于扬子地台上扬子褶皱变形带近东西向的香龙山短轴背斜南翼近轴部地带。香龙山背斜轴部地层为寒武系、奥陶系和志留系。翼部由泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系构成。香龙山背斜南翼地层倾向南,倾角 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$;含煤地层多有出露,即为二叠系吴家坪组马鞍煤系,煤层为3层,最大厚度约为6 m。新构造期以来在该区以大面积整体间歇性隆起为主要活动形式^[1]。区内断裂以北北东走向为主,东西向次之。断裂规模一般都不大,但密集成带,形成北东向磨坪断裂组,展布于秭归磨坪-巴东野三关一线,10余条北东向小断裂呈右行斜列或大致平行等间距排列。断裂带通过处多以山间垭口、沟谷和陡崖负地形显示,但是新构造期以来没有形成线性切割的构造地貌形态,断裂活动微弱^[2]。区内野三关、麻沙、木龙、故县、柳家山、白沙坪等均分布有煤矿,煤层厚度一般在3~6 m。上世纪70年代就有多处在开采,而目前的开采状况难以详知。

东西走向的香龙山(背斜山)构成长江与清江的分水岭,地处云台荒、火烧坪鄂西期夷平面,高程2000 m左右。野三关震区位于分水岭南坡清江水系源头,峡谷深切,高差800~1000 m。主要岩性为石灰岩、夹页岩、燧石结核,多成条带广泛分布于褶皱翼部;溶洞、暗河强烈发育,泉流量 $> 10 \text{ L/s}$;暗河流量 $> 100 \text{ L/s}$,季节性变化较大。

3 地震宏观调查与宏观震源参数^①

3.1 2004年5月24日巴东野三关柳家山村 $M_L 3.0$ 地震

$M_L 3.0$ 地震震中区位于近东西走向的香龙山短轴背斜南缘(图1),主要出露中、古生界地层。该区域断裂构造主要为一组北北东-北东向的磨坪断裂带。这组断裂带以多条长度在十几千米~几十千米,大小、规模不一的断裂组成。

这次地震有感范围东至麻沙坪村,南至野三关南谭家村,西至大树坪,北至麻沙坪。Ⅲ度有感区宽14 km,长17 km,面积 238 km^2 ;呈长轴为北北东向椭圆状,与断裂构造走向一致^①。震中区Ⅴ度位于柳家山-故县坪,室内外人员普遍感到震动强烈,地面上下颤动,听到沉闷的嗡嗡声。地震时悬挂物摇摆,墨水瓶从桌上掉下,个别土坯房墙角局部开裂。龙坪村观垭震时一些山石滚落,每块重达100~200 kg,并砸断直径10 cm的树木。此次地震次日柳家山又发生 $M_L 2.6$ 有感地震。利用宏观等震线求得

$M_L 3.0$ 地震发震断层走向北北东,与震源机制解B节面大致相当。

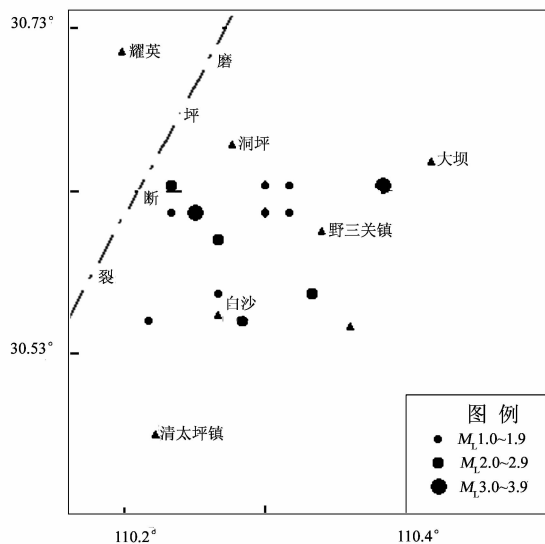


图1 巴东野三关地震震中分布图

Fig. 1 Distribution of earthquake epicenters of Yeshanguan area, Badong

3.2 2004年9月13日巴东野三关青龙桥 $M_L 3.8$ 地震^①

$M_L 3.8$ 地震波及范围东到长阳,西至建始,大部在巴东境内。长轴走向 $NW315^{\circ}$,长约52 km,宽约26 km。本区震中烈度定为Ⅴ,并将波及范围划分为Ⅴ度区和有感区^①。

Ⅴ度区:其范围东起四渡河,西至支井河,北接谭家村,南邻大路坡。长轴为 $NWW290^{\circ}$,长约24 km,短轴长约8 km,总面积约 150 km^2 。室内的人普遍感觉到震动,站立的人感到上下颠动,有的老年人几乎站立不稳。个别房屋掉瓦,极少数房屋墙壁震裂。从 $M_L 3.8$ 地震等震线有感范围看出,震中西南方向衰减较慢,而北东向衰减较快。与区内北北东向断裂走向不一致,但与香龙山背斜南翼地层走向、倾向、倾角大体一致。这是一次孤立型有感震。据 $M_L 3.8$ 地震宏观等震线,求得发震断层走向北西西,倾向南西,倾角约 30° ,与震源机制解节面A走向大致相当,但倾向受解的局限性而不明确。

4 地震定位研究

以本文主要地震 $M_L 3.8$ 震中为中心,对周围5 km范围内 $M_L \geq 2.0$ 地震作为研究区地震重新定位(从该区有三峡数字台网记录以来的目录资料中查询,2000~2003年该区没有 $M_L \geq 2.0$ 地震记录)。

① 据鄂震发[2004]93号和129号文的附件1中的分布图。

采用李胜乐^[3,4]编制的定位软件中走时误差最小方法对表 1 中的 7 次微小震进行了重新定位研究。尽量选择近台能包围震中的部分台站进行定位,获得的和达曲线相关系数达 0.99 以上。由于这些地震偏于三峡台网南侧,因此,还加选了清江台网部分测站和恩施基准台。

从重新定位的结果看,7 次地震的震中位置经纬度变化都不大,基本只有 $0.01 \sim 0.04^\circ$ 的变化,震级有 3 次由变化定位台站造成偏小或偏大 $0.1 \sim 0.5$ 级。而震源深度值变化较大,由优化的少数包围

震中的台站参与定位后,尽量选择定位最小残差值所对应的深度值。如表 1 所示,7 次地震深度在海平面以下 $0.1 \sim 0.5$ km 内。图 2 给出 $M_L 3.8$ 主震定位的震中定位图和定位深度残差值。

由于重新定位涉及 3 个台网观测系统的测站,因此,最小残差拟合后,震源深度仍具有多解性。如 $M_L 3.8$ 地震的 $S-P$ 拟合残差为 0.11 左右时,震源深度的可能取值范围为 $0 \sim 9$ km, $S-P$ 拟合残差为最小值 0.103 0 时,震源深度为 0.2 km。因此,结合成因,综合探讨其震源深度是必要的。

表 1 巴东野三关 $M_L \geq 2.0$ 地震重新定位参数

Tab. 1 The relocating parameters of $M_L \geq 2.0$ earthquakes in Yesanguan region

序号	发震时间		纬度 ($^\circ$)	经度 ($^\circ$)	震级 (M_L)	震源深度 (km)	残差	波速比	台站数
	年月日	时分秒							
1	2004-05-24	16-54-27.2	30.58	110.32	3.0	0.5	0.06	1.54	7
2	2004-05-25	21-10-47.4	30.59	110.34	2.6	0.1	0.19	1.57	6
3	2004-08-31	19-08-39.6	30.62	110.28	2.2	0.3	0.05	1.61	6
4	2004-09-13	11-14-10.5	30.60	110.26	3.8	0.2	0.10	1.71	7
5	2004-09-20	04-56-36.4	30.61	110.31	2.9	0.1	0.04	1.61	5
6	2005-09-15	16-38-14.5	30.62	110.24	2.2	0.4	0.07	1.60	5
7	2005-12-09	11-37-29.6	30.63	110.35	2.5	0.5	0.09	1.67	5

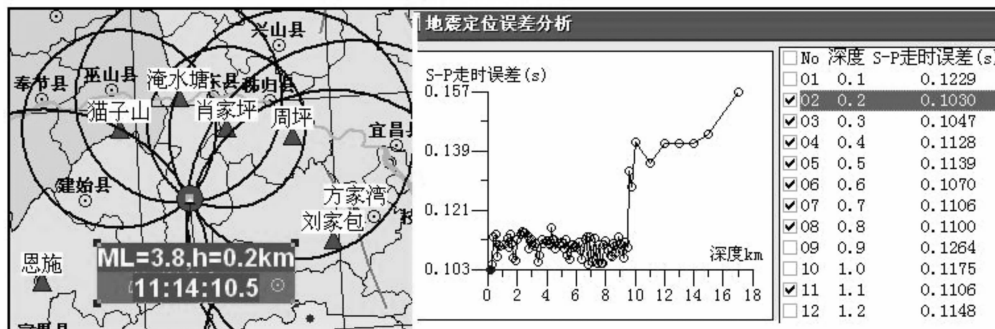


图 2 $M_L 3.8$ 主震定位和深度误差图

Fig. 2 The main-event location and depth error of $M_L 3.8$ earthquake

5 地震活动概况

自 1959 年至 2000 年有三峡模拟台网记录以来,只在 70 年代记录到野三关地区一次 $M_L 3.0$ 地震,2 次 $M_L 2.0$ 地震;再于 90 年代记录到 3 次 $M_L 2.0$ 地震。2000 ~ 2004 年 4 月自三峡数字地震台网运行后未记录到 $M_L \geq 2.0$ 地震,只记录到 1 次 $M_L 1.4$ 地震。说明该地区微小地震活动频次很低。本次地震前无明显前震活动, $M_L 3.8$ 地震发生前如表 1 所示,只是 2004 年 5 月在野三关柳家村发生过一次 $M_L 3.0$ 地震,另外发生 2 次 $M_L \geq 2.0$ 地震。 $M_L 3.8$ 地震后也只发生 3 次 $M_L \geq 2.0$ 地震。至 2005 年 12 月也无 $M_L \leq 1.0$ 极微震发生。故本次地震属孤立型小震。2 年来该区共发生 $M_L \geq 1.0$ 地震 13 次(图 3),其中 $M_L \geq 2.0$ 地震 7 次、 $M_L \geq 3.0$ 地

震 2 次。因此,野三关地区为间歇性、低频度微震活动区。

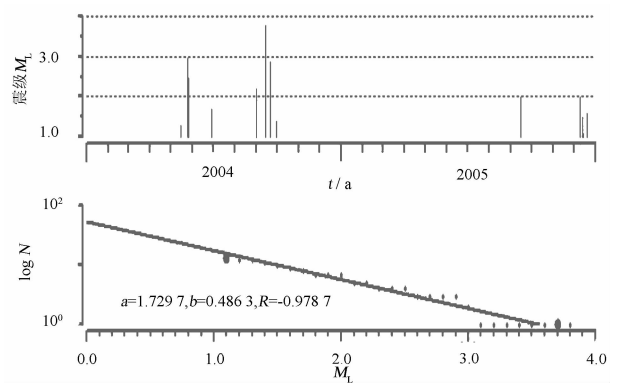


图 3 野三关地区地震序列图

Fig. 3 Seismic sequences in Yesanguan region

6 震源机制解

对表 1 所列的 7 次地震事件的 P 波初动作震源机制解结果见表 2 和图 4。由于野三关地区偏于三峡数字地震台网南缘外侧,因此,地震 P 波初动符号基本分布于两个象限之中,震源机制解结果有一定偏差,但仍有重要参考价值。除了 2005 年 9 月

15 日 $M_L 2.0$ 地震应判定为塌陷事件外,其它事件均具有正倾滑断层作用,最大主压应力轴向可分为近南北向和北西-南东向两组。这些结果与湖北西部平均震源应力场^[5,6]具有明显差别,但与构成近东西向分水岭的香龙山背斜南翼的层间正倾滑作用有一定的相关性。

表 2 震源机制解结果

Tab. 2 Results of focal mechanism solution

地点	序号	发震日期 (年月日)	震中位置 (°)		震级 (M_L)	节平面 A (°)			节平面 B (°)			P 轴(负区) T 轴(正区) (°)		N 轴 (°)		矛盾 比%			
			纬度	经度		走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	仰角	方位	仰角				
	1	2004-05-24	30.56	110.35	3.0	129	41	-139	6	64	-56	322	57	72	13	170	30	0.206	
	2	2004-05-25	30.59	110.34	2.6	200	79	-168	292	78	-12	156	16	246	0	336	74	0.150	
野 三 关	3	2004-08-31	30.62	110.28	2.2	115	41	-168	16	82	-50	323	39	76	26	190	40	0.188	
	4	2004-09-13	30.60	110.26	3.8	140	90	-160	50	70	0	7	14	273	14	140	70	0.161	
	5	2004-09-20	30.61	110.31	2.9	282	48	-149	170	67	-46	127	48	230	11	330	40	0.269	
	6	2005-09-15	30.62	110.24	2.0	208	51	103	8	41	75	289	5	173	79	20	10	0.182	
	7	2005-12-09	30.63	110.35	2.0	337	56	-127	211	48	-48	190	60	93	4	180	30	0.200	
湖北西部 ^[6]						14	70		117	56		62	39	158	9				
鄂西南 ^[6]						218	77		99	24		57	29	189	54				

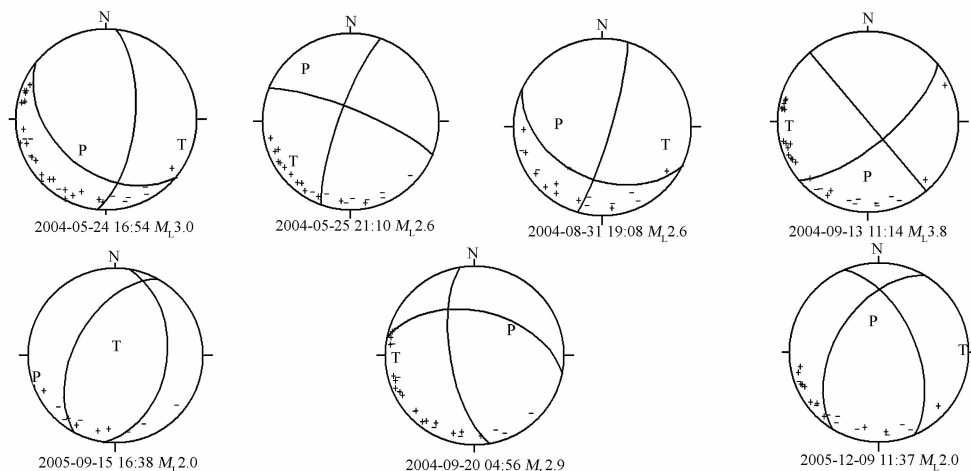


图 4 7 次微小地震震源机制解

Fig. 4 The focal mechanism solutions of 7 small earthquakes

7 地震波衰减特征

7.1 地震波衰减因子 Q 值

为进一步了解研究区内地壳介质特征,将表 1 中的 7 次三峡台网数字地震波形记录进行了数据采集。利用 PG、SG 波的到时差来计算震源距;将 S 波开始到包含 S 波总能量的 90% 的时间段定义为“S 窗”。由于选取的地震均在野三关地区,震源相距很近,计算的剪切波频谱的总体形状变化较少。计算 Q 值的方法采用文献[7,8]的傅里叶谱变换,Atkinson 模型拟合,得到研究区内非弹性衰减 Q 值随

频率 f 的关系为 $Q(f) = 52.4f^{(0.890)}$,反应了该地区震源介质的低 Q 值的特殊性(Q 值拟合曲线见图 5)。以上结果说明研究区与所述构造地震^[9]的 Q 值在 140 ~ 300 之间,而非构造地震的 Q 值为 30 ~ 100 是一致的。

7.2 地震尾波衰减

三峡数字台网记录的 S 波最大振幅随震中距离的衰减关系,以下式进行统计:

$$\log A = \alpha - \beta \sqrt{\Delta}$$

其中, A 为最大振幅; Δ 为台站与震中的距离; α 与震级有关,同样震级的非构造地震比构造地震的衰

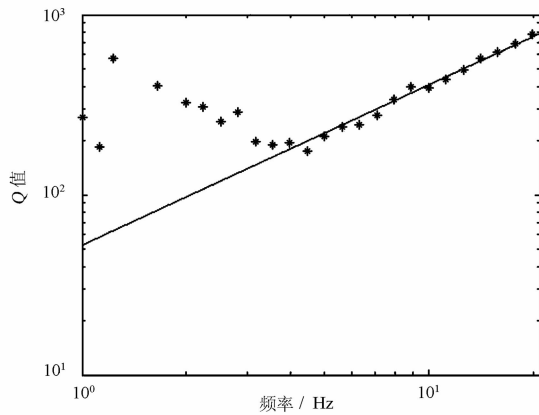


图5 Q值拟合曲线

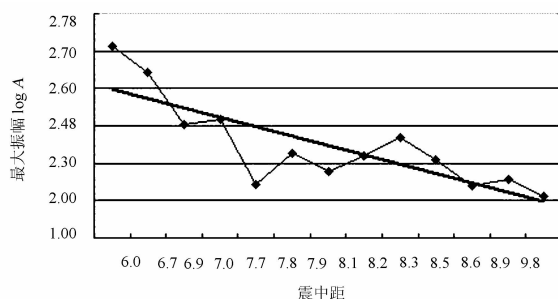
Fig. 5 filtering curve for Q value

减小; β 反映振幅随距离的衰减快慢,同样震级的非构造地震比构造地震大。即使宏观地看最近台和最远台S波的衰减程度就能发现:对于非构造地震,最近台与最远台两者变化剧烈;而对于构造地震,变化没有那么显著。

据张少泉研究结果^[10]: 1) $M_L = 3.0 \sim 3.4$ 时,非构造地震 $\alpha = 1.2, \beta = 0.18$; 构造地震 $\alpha = 0.74, \beta = 0.12$; 2) $M_L = 2.6 \sim 2.8$ 时,非构造地震 $\alpha = 0.4, \beta = 0.14$; 构造地震 $\alpha = 0.3, \beta = 0.12$ 。

选择野三关地区较大的6次 $M_L \geq 2.0$ 地震波形进行统计,得出: $M_L = 3.0 \sim 3.8$ 时, $\alpha = 2.18 \sim 2.78, \beta = 0.08 \sim 0.10$; $M_L = 2.0 \sim 2.9$ 时, $\alpha = 1.36 \sim 2.11, \beta = 0.10 \sim 0.13$ 。

以上统计结果中,本地区的 α 值较大,而 β 值略小。单从数值上看还无法对应得出是什么类型的地震。但从宏观上看, $M_L 3.8$ 地震最近台站较场坝(震中距 36.4 km)的S波最大振幅为 513 $\mu\text{m/s}$,而最远台牛坪垭(震中距 95.8 千米)的S波最大振幅只有 110 $\mu\text{m/s}$,两者相差 400 $\mu\text{m/s}$ 。对两者分别开方和取对数作图 6,结果又似乎表明研究区的微小地震不属于构造地震。

图6 最大振幅 $\log A$ 随震中距 $\sqrt{\Delta}$ 的变化Fig. 6 The biggest amplitude $\log A$ changing with epicentral distance $\sqrt{\Delta}$

8 成因分析

1) 两年来,巴东野山关地区微震活动具有间歇性低频度特征,总共 13 次 $1.0 \leq M_L \leq 3.8$ 地震事件大体呈东西向展布于长约 10 km 地带。这些地震事件各自具有相对的独立性,尤其是 2004 年 9 月 13 日 $M_L 3.8$ 有感地震为孤立型小震,没有前震或余震序列的出现,它们分别体现了局部应力-应变释放^[10]。这种现象与 20 世纪 70 年代以来三峡台网记录到的野三关地区间歇性零星微震活动是相似的。

2) 利用三峡台网数字地震波频谱分析表明,这些微小地震的介质品质因子 Q 值很低,为 $Q(f) = 52.4f^{0.890}$,属浅表沉积盖层中地震事件,与位于地壳易震层(10 ~ 20 km)震源深度的构造地震 Q 值(大于 200)相去甚远。值得注意的是,野三关 $M_L 3.8$ 地震并没有显示区别于其它事件的独特的介质品质因子属性,地震尾波衰减也无法定性给出其地震类型。因此,野三关地区这些浅层微小地震事件必有其特殊的成因机制。

3) 野三关地区位于近东西向香龙山背斜构成的长江与清江分水岭南坡清江水系源头地带,分水岭的绿葱坡(火烧坪)、云台荒最大高程在 2 000 m 左右。野三关镇北距长江三峡库区约 40 km,南距清江水布垭水库 21 km。显然,由于香龙山背斜分水岭对长江与清江水系起着分隔效应,所以处于分水岭南坡的野三关地区与相距甚远的位于奉节-巴东向斜轴部的长江三峡库区渗透场没有直接关联。亦即长江三峡水库蓄水后所发生的浅层地震事件与野三关地区的地震活动没有直接关联。

4) 野三关地区的地震事件具有微震有感,甚至有轻度破坏的地震影响场特征。如 2004 年 5 月 24 日野山关柳家山 $M_L 3.0$ 地震,室内外人员震感较强烈,地下发出沉闷雷声;震中区有较大山石滚落,少量房屋轻度破坏,并且 5 月 25 日的 $M_L 2.6$ 地震也有感。这无疑表明震源是非常浅的。此外,测震学给出的海平面以下 0.5 km 的震源深度,再加上地面约 1 500 m 的高程,则约为 2 km。因此,二者是相容的、可信的。尽管因地震偏于台网外缘,而导致测定的震源深度有多种选择,我们仍可合理地判定 $M_L 3.0$ 地震属浅表层事件。据调查,野三关镇东北方向的柳家山震中区,沿泗渡河源头两条近南北向溪谷内有多处煤矿,长期开采二叠系马鞍煤层,如麻沙、木龙、柳家山、故县坪等地,由于震中区二叠系(P)之上有以三叠系(Tid)厚层大冶灰岩为上覆盖层的山体荷载存在,因此,作为软弱(下转第 92 页)