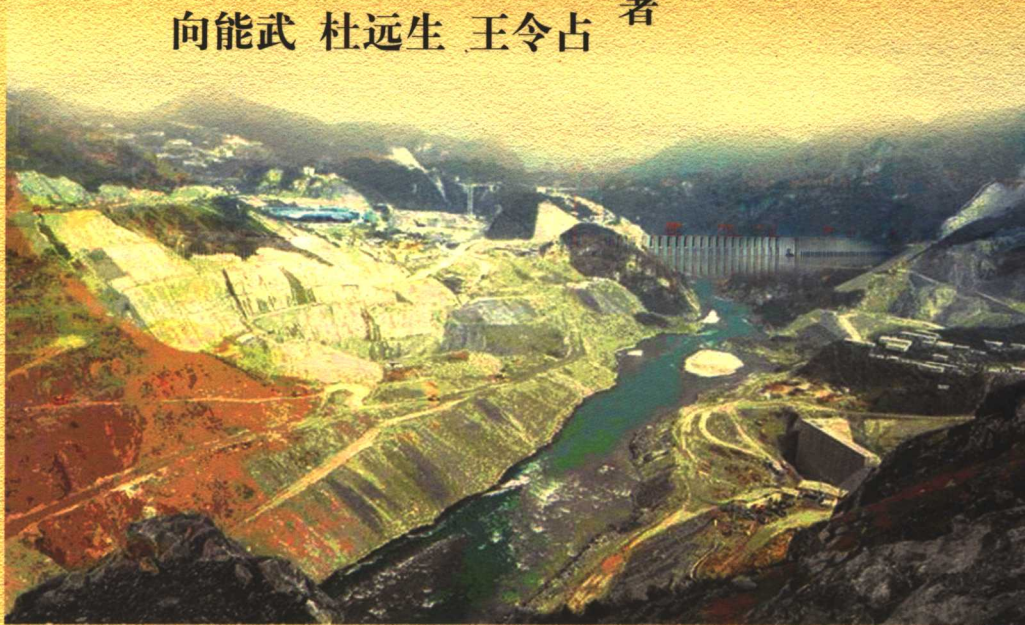


沉积岩

构造与破裂

——乌江构皮滩水电站工程破裂系统及愈合行为研究

侯光久 陈文理 方灯明 著
向能武 杜远生 王令占



中国地质大学出版社

沉积岩构造与破裂

——乌江构皮滩水电站工程破裂系统及愈合行为研究

侯光久 陈文理 方灯明 著
向能武 杜逸生 王令占

中国地质大学出版社

内容简介

本书以岩石破裂理论为指导,对乌江构皮滩水电站坝址区发育的破裂系统进行了几何学、运动学、流变学和动力学分析,建立了发育序列和不同破裂系统的三维型式,给出了流变学及动力学解释,强调孔隙流体压力在破裂的形成和发育过程中所起的关键作用。全书资料翔实,内容丰富,图文并茂,基础性、实用性、针对性均有一定特色,可供构造地质、工程地质科研工作者及各类地质院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

沉积岩构造与破裂——乌江构皮滩水电站工程破裂系统及愈合行为研究/侯光久,陈文理,方灯明,向能武,杜远生,王令占著. —武汉:中国地质大学出版社,2006.5

ISBN 7-5625-2112-3

I. 沉…

II. ①侯…②陈…③方…④向…⑤杜…⑥王…

III. ①沉积岩-地质构造-研究-余庆县 ②沉积岩-岩石破裂-研究-余庆县

IV. P588.297.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 054234 号

沉积岩构造与破裂

——乌江构皮滩水电站工程破裂系统及愈合行为研究

侯光久 陈文理 方灯明 著
向能武 杜远生 王令占

责任编辑:刘桂涛 赵颖弘

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电话:(027)87482760

传真:87481537

E-mail: cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cn>

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16

字数:212 千字 印张:7.875 彩版:5

版次:2006 年 5 月第 1 版

印次:2006 年 5 月第 1 次印刷

印刷:武汉中远印务有限公司

印数:1—500 册

ISBN 7-5625-2112-3/P·667

定价:35.00 元

目 录

1 绪 论	1
2 区域地质背景	4
2.1 区域地层简介	4
2.2 区域构造简述	15
3 原生沉积构造及次生沉积构造	19
3.1 物理成因的沉积构造	19
3.2 化学成因的沉积构造	24
3.3 生物成因的沉积构造	26
4 摩擦流变学及水力破裂理论简介	28
4.1 摩擦流变学	28
4.2 水力破裂	30
5 裂隙系统及构造序列	33
5.1 裂隙系统分析	33
5.2 典型地段破裂形式	41
5.3 工程揭露的破裂构造	52
5.4 北东向断裂带	60
6 水力破裂	64
6.1 水力破裂的研究历史与现状	64
6.2 水力破裂的发育特征	67
6.3 水力破裂形成条件分析	71
6.4 坝区水力破裂形成过程讨论	75
7 坝区岩体破裂框架及破裂面的愈合行为	80
7.1 主干(优势)破裂构造	80
7.2 破裂面的愈合行为	82
7.3 流体包裹体特征	87
7.4 方解石 e 双晶差异应力估算	96
7.5 北东向构造带的形成物理环境	97
7.6 破裂构造对水电站工程影响的讨论	100
8 讨论与结论	102
8.1 关于 NWW 及 NNW 向破裂构造	103
8.2 关于层间滑动及水力破裂	104

8.3 结论	105
Abstract	107
主要参考文献.....	115
图版说明.....	121
图版.....	123

1 绪 论

乌江构皮滩水电站是乌江干流梯级开发中以发电为主,兼顾航运、防洪等综合效益的大型骨干工程。为了确保工程的质量,从选址、勘察、论证、施工指导到工程监测,我国地质及工程地质工作者进行了 20 余年的艰辛研究和劳动。自 20 世纪 90 年代初勘察工作开始以来,围绕水库、坝址的水库诱发地震问题、重点地段的岸坡稳定性及环境地质、岩溶发育规律和水文地质条件、坝基及拱座岩体结构和岩体质量、地下洞室围岩分类和稳定性、人工及自然边坡稳定性及谷坡岩体卸荷带特征等专题,开展了大量的综合勘察、研究和分析,为工程建设打下了良好基础。

根据技术服务合同书及水利部长江水利委员会长江岩土工程总公司的要求,本次研究的目的是,选择构皮滩电站坝区开挖揭露的工程关键地段和露头,系统观察和测量岩体内部破裂方位、形态、力学性质、运动学特征及三维组合型式和序列,分析局部应力状态、平面应力场和破裂发育的物理环境,对不同的破裂组合型式作出合理的成因解释,研究不同地层的同沉积构造。结合区域构造背景分析,总结沉积岩的沉积及成岩特点,以及破裂-愈合规律,以提高构皮滩电站工程坝区构造研究水平。涉及的内容包括:

(1) 依据已有资料和工程布置,分别在左岸、右岸、上下游围堰及建基面等选择典型地段,进行大比例尺露头观察、测量、解析,建立认识支撑点。

(2) 在这些关键地段上,进一步确定主要破裂(裂隙)的方位、形态、规模、间距、充填物、位移和运动过程、力学行为、先后关系、组合型式或阵列,确定不同型式破裂间的相对序列。

(3) 观察和分析不同尺度的几何学和力学边界,尤其注意岩体内部先存不均一性及先期破裂对后期破裂的控制和影响。如早期水力破裂对后期顺层滑动的影响和制约等。

(4) 对坝区典型地段破裂发育的特殊性(差异性)的形成条件和力学行为进行研究,作出合理解释。

(5) 观察、分析裂隙的破裂-愈合行为,充填裂隙低温矿物脉体(如方解石)的形态、期次,矿物学和组构的显微观察,判别破裂-愈合的物理环境。

(6) 对坝区出露的以泥质、粉砂质为主的碎屑岩进行研究,了解其矿物成分及含量,利用伊利石的结晶指数(H_{br}值)及 b_0 值,推算变形变质物理条件,确定成岩或变质作用特征。

(7) 综合坝区典型地段、路线观察及重要露头点的详细研究,总结破裂规律,建立坝区破裂总的运动学和演化模式。

考虑到前人研究工作基础,同步进行的工程地质编录以及研究对象的特殊性,笔者籍用的指导理论是岩石圈流变学,特别是摩擦滑动流变学(frictional rheology),采用的技术路线和方法是构造解析(structural analysis)和地质力学(geomechanics),即在不同尺度上,从几何学、运动学、流变学及动力学领域将复杂的破裂系统从三维空间和时间上“分解”开来,抓住应力一应变分析,而后再将它们分别进行“组合”,建立思维,找出规律。该种构造分析方法的关键是,在揭露良好的关键地段(点)上,必须作出认识上的支撑点,把客观的构造现象认识清楚,把握

准确,使之经得起检验。

一年多来,我们先后4次到现场进行观察研究,共测制比例尺1/500~1/1 000典型地段构造剖面图15幅(因条件所限,基坑尚在清理,围堰建基面现已浇筑水泥,多以剖面为主);野外观察、实测地层剖面9条,总距离约20km;重点观察分析了另外37处破裂系统及构造变形,绘制剖面、素描图37幅;共采集构造标本280个,化石标本260个,照片780幅。室内工作包括:磨制岩石薄片127片,包裹体测温标本23块,X光衍射分析15件,矿物流体包裹体测试22件。于2004年12月向岩土公司呈送简报一份,公开发表了《构皮滩水电站坝区节理特征及对区域构造应力场的指示》论文一篇,另一篇题目为《贵州构皮滩地区裂隙系统及其对电站工程的影响研究》的研究论文已被《地质力学学报》录用待刊。通过研究,在前人对坝区的区域构造框架及工程地质环境基本认识的基础上,得出下列新的认识:

(1) 在研究、分析沉积构造类型和特征的基础上简述了沉积构造尤其是原生面理对后期构造变形及其对水电站大坝及边坡稳定性的影响,提出原生面理为后期构造变形继承的初始面,这些原生面理对工程边坡稳定性会产生不同程度的不利影响。

(2) 乌江构皮滩电站坝区碳酸盐岩(包括少量碎屑岩)岩体内的破裂系统形成机制,总体上属于脆性域内碎裂作用或碎裂流动作用,服从摩擦流变学原理及相关本构定律,即

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \rho g z (1 - \lambda)$$

孔隙流体压力在破裂的形成和演化过程中起着决定性作用。

(3) 在坝区岩体内部复杂的破裂系统中,依据几何学、运动学、流变学和动力学标志以及对称性原理,至少识别出8套破裂系,分别归属3个大的破裂系形成阶段,按照构造复合交切关系,建立了它们的相对顺序,其中水力破裂系统形成较早,对后期的顺层滑动起着重要的影响。

(4) 坝区岩体内部的破裂系统大部分已被构造岩或方解石脉充填愈合(sealing),根据方解石脉体形态、矿物特征、矿物流体包裹体分析以及脉体之间的切割或侵入关系,可识别出5期(次)破裂-愈合作用。在低孔隙度岩石中伴有流体压力的不断增大,从而导致裂隙缓慢的张开,过程中伴有方解石脉沉淀(愈合),流体压力的降低会导致滑动的发生,并伴随新的裂隙产生,如此循环模式是本区裂隙系统的一大特点。

(5) 从坝址下游马鞍山一带通过的通木坪北东向断裂带是由多条断裂组成(F_2 、 F_3 、 F_4)、倾向南东的叠瓦状逆-逆冲断裂系,为南东-北西方向的强烈挤压所致,其差异应力估算为83.3~143.1MPa,温度为150~300℃,属地壳浅层变形,形成于燕山运动晚期,未见再活动迹象。坝区未见其他大型断裂发育。

(6) 通过对裂隙系统代表的应力场及应变场推算,最大主(压)应力(σ_1)的方向总体有北西-南东方向水平→近东西方向水平→近南北方向水平的逆时针旋转特点,最后逐步旋转至近直立位置,反映燕山早期北西-南东方向压扁(缩)、垂向增厚到燕山主期的北东向变形、南北向变形及近东西向变形,以及喜山期的构造抬升,垂向压缩(重力失稳),到北东-南西向伸展。可以看出,坝区基岩中破裂系统的发育及所反映的变形场和应力场,是与区域上北东向构造为主干构造,并有南北向和东西向构造的动力学过程中的局部应力场相协调的。

由于时间、经费及研究范围和水平的限制,本次构造研究工作仍遗留一些问题,有待进一步深入研究和讨论。这些问题包括:

(1) 破裂-愈合的时限。据地表地质及显微构造研究,坝区岩体内的破裂系统及溶液活动

的相对顺序基本上是可以肯定的。由于工程揭露完好,它们之间的几何关系可以直接观察到,不需要推测和猜想。至于破裂的形成及脉体充填愈合的绝对时限,目前还没有充分而扎实的年代学资料给予判定。

(2) 燕山主期的构造变形。构皮滩地区所经历的构造运动主要是燕山运动,其次是喜山运动,而喜山运动是以间歇式抬升运动为主。参照区域构造,通过应力-应变分析和裂隙之间的复合交切关系,将不同组合型式的裂隙系分别归为 NE 向、SN 向和 EW 向构造。除 NE 向构造外,构造-热事件的支撑资料尚不足。

(3) 水力破裂的详细分布。由于这次构造研究的有限目标和客观条件限制,未能将水力破裂角砾岩的产出状态,从平面上和剖面上逐一进行追索。工程上揭露的“层间错动”并不一定都是水力破裂,但水力破裂一定会发生后期的顺层滑动。顺层破裂-滑动,尤其是尚未愈合的滑动面,是电站工程关注的地质问题之一。总而言之,虽然岩体内部破裂和缺陷大都是古老的、性状较好的系统,但是在新的应力场和环境条件下,它们的动向应时刻给予监测和充分关注。

该项目的研究工作是在水利部长江水利委员会长江岩土工程总公司徐福兴教授、石林教授和中国地质大学地球科学学院索书田教授指导下进行的。长江岩土工程总公司多位工程师参加了工作和讨论,并提供了良好的资料、生活及工作条件,保证了研究工作顺利进行。在此一并致谢!项目由侯光久负责,项目组主要成员有水利部长江水利委员会长江岩土工程总公司陈文理、方灯明、向能武,中国地质大学地球科学学院侯光久、杜远生、张哲和研究生王令占等。

本书是一个集体劳动成果。第一、五章由陈文理执笔,第二章由侯光久和陈文理执笔,第三章由杜远生和方灯明执笔,第四章由侯光久执笔,第六章由王令占和向能武执笔,第七章由侯光久和方灯明执笔,第八章由侯光久、陈文理执笔。最后由侯光久、陈文理进行统一修改。书中大部分插图是由王令占和陈文理用计算机清绘的,向能武、尹春明、张哲广泛收集了有关参考文献。外文摘要由陈文理、侯光久执笔。

笔者在此向所有为本项目的完成及该书编写、出版进行过指导、帮助和关心的有关领导、专家、教授及同事们,致以衷心的感谢!尤其要感谢索书田教授在项目立项、初期踏勘和全书构思的指导和教诲!

向所有乌江构皮滩电站工程建设者致敬!

2 区域地质背景

乌江构皮滩水电站工程,大地构造位置处于扬子准地台内鄂黔台褶皱带上,位于云贵高原东北部的乌江中游贵州省余庆县境内(图 2-1)。

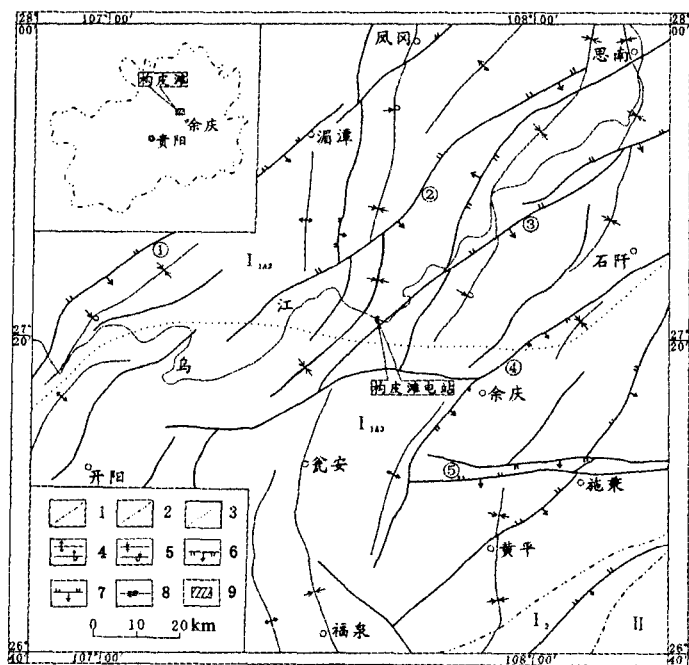


图 2-1 研究区位置及大地构造单元(据贵州省区域地质志地质构造图(1986)改编)

1. 一级构造单元界线;2. 二级构造单元界线;3. 四级构造单元界线;4. 背斜及倒转背斜;

5. 向斜及倒转向斜;6. 正断层;7. 逆断层;8. 平移断层;9. 研究区位置

大地构造单元: I. 扬子准地台; I₁. 黔北台隆; I₂. 黔南台陷; I_{1A}. 遵义断拱;

I_{1A2}. 凤冈北东向构造变形区; I_{1A3}. 贵阳复杂构造变形区; II. 华南褶皱带

主要断裂: ①. 湄潭断裂; ②. 思南-敖溪断裂; ③. 本庄断裂; ④. 石阡断裂; ⑤. 施秉-玉屏断裂

2.1 区域地层简介

扬子准地台基底岩层为一套浅变质的碎屑岩、火山变质砂岩、凝灰岩等。沉积盖层从震旦系至第四系均有分布,其中震旦系下统主要为冰川和冰水碎屑沉积;震旦系上统至三叠系中统主要为浅海-海陆交互相碳酸盐岩及碎屑岩;三叠系上统至下第三系为陆相红色碎屑岩;第四系分布零星。寒武系与奥陶系之间为整合接触,前震旦系板溪群与梵净山群、

侏罗系与白垩系—第三系以及第四系与老地层之间为不整合接触,其他各系之间为假整合接触。

构皮滩水电站工程坝区出露地层(由老至新)主要有寒武系娄山关群浅灰白色白云质灰岩、白云岩;下奥陶统生物碎屑灰岩、白云岩夹页岩、砂岩;志留系杂色泥质岩夹砂岩,下部生物碎屑灰岩(寒武系\奥陶系\志留系之间多为断层接触关系);二叠系灰岩、燧石团块灰岩、夹炭质页岩、夹拉斑玄武岩,下部炭质页岩、铝土岩;三叠系灰岩夹页岩、白云岩(志留系\二叠系\三叠系之间为假整合接触)。该区缺失泥盆系和石炭系沉积(表2-1)。

表2-1 区域地层简表

系	统	组	代号	厚度(m)	简要岩性描述	
第四系			Q	0~10	残坡积亚粘土,冲洪积亚粘土、砂、砂砾石等	
下第三系至白垩系			E ₁ —K ₂	0~400	紫色钙泥质粉砂岩、泥岩及厚层块状砾岩	
三叠系	下统	夜郎组	T _{1y}	211~545	上部为紫红、灰绿色钙质泥岩夹泥质灰岩;中部为浅灰、灰色薄层至块状致密灰岩;下部为灰、黄绿色钙质页岩夹泥质岩与灰岩	
二叠系	上统	长兴组	P _{2c}	21~88	灰色厚层细微晶生物碎屑灰岩,含燧石结核、底部夹钙质页岩	
		吴家坪组	P _{2w}	74~245	灰色薄层、中厚层泥微晶生物碎屑灰岩与含粘土质生物碎屑灰岩、粘土岩、灰岩及硅质岩	
					深灰色中厚层、薄层含炭质、粘土质生物碎屑灰岩、粘土岩互层	
			P _{2w}		灰色薄层灰岩与粘土质生物碎屑灰岩、粘土岩互层	
		P _{2w}	灰色厚层含燧石生物碎屑灰岩,底部为粘土岩并夹一层煤			
	下统	茅口组	P _{1m}	15~240	浅灰色厚层生物碎屑灰岩,含少量方解石团块、燧石团块和燧石结核。顶面起伏不平,为古侵蚀面	
					浅灰色厚层含方解石团块生物碎屑灰岩	
			P _{1m}		灰色中厚层含燧石结核、硅质条带生物碎屑灰岩	
					灰色薄层微晶生物碎屑灰岩,中下部夹薄层波链状含炭、泥质生物碎屑灰岩	
					灰色中厚层微晶生物碎屑灰岩,下部夹硅质条带	
		P _{1q}			灰色厚层微晶生物碎屑灰岩,具斑状白云化。顶部为含炭、泥质生物碎屑灰岩	
				栖霞组	70~160	深灰色中厚层链状微-泥晶生物碎屑灰岩与波状含炭、泥质生物碎屑灰岩互层
						灰色中厚层微晶生物碎屑灰岩,底部夹波状含炭、泥质生物碎屑灰岩
						灰色中厚层微-泥晶生物碎屑灰岩,含燧石结核,底部夹波状含炭、泥质生物碎屑灰岩
		深灰色厚层疙瘩状微晶生物碎屑灰岩,底部夹薄层含炭、泥质生物碎屑灰岩				
梁山组		P _{1l}	0~43	灰色铝土质页岩、杂色粘土岩,夹粉砂岩、炭质页岩		

续表 2-1

系	统	组	代号	厚度(m)	简要岩性描述
志留系	中统	韩家店组	S_2h	0~476	灰绿色粉砂质粘土岩、紫红色夹灰绿色粘土岩
	下统	石牛栏组	S_1sh	0~190	上部为中、细粒钙质砂岩,下部为灰绿色粘土岩、钙泥质粉砂岩夹薄层泥灰岩及透镜状灰岩
					上部为灰色中厚层细晶生物碎屑灰岩,下部为含泥灰岩夹少量钙质粉砂岩
		龙马溪组	S_1l	0~127	上部为泥、钙质粉砂岩,下部为粉砂质粘土岩及粘土质粉砂岩
奥陶系	中统	宝塔组	O_2b	0~60	紫红色夹灰色泥灰岩
		十字铺组	O_2sh	0~60	灰色生物碎屑灰岩、泥灰岩
	下统	湄潭组	O_1m	0~225	薄层粉砂岩、页岩,加生物碎屑灰岩
					灰色薄层、中厚层细生物碎屑灰岩加网纹状、极薄层含钙、泥质粉砂岩
					灰绿色页岩。上部夹少量砂岩,下部夹少量细晶灰岩,底部为薄层灰岩与页岩互层
		红花园组	O_1h	0~45	灰色厚层细晶生物碎屑灰岩
		桐梓组	O_1t	0~180	浅灰色中厚层细晶白云岩。上部夹 2~3m 白云质石英灰岩,底部为页岩
					浅灰色细晶白云岩
寒武系	中上统	娄山关群	$\in_{2-3}ls$	130~767	浅灰色薄层白云岩,顶部含极少量燧石结核
	中统	石冷水组	$\in_2sh$	32~197	灰色薄至中厚层白云岩,夹泥质角砾状白云岩、顶部为粉砂岩、底部为鲕粒状灰岩

构皮滩电站库区主要发育寒武纪—三叠纪地层,除局部夹有碎屑岩地层外,大部分地层为碳酸盐岩地层。

2.1.1 寒武系

研究区中、上寒武统娄山关群($\in_{2-3}ls$)主要出露于水电站大坝东,其自下而上可以分为 3 个岩性段:第一段主要为灰色到浅灰色白云岩。其顶部为厚层白云质灰岩;中上部为灰色、浅灰色厚层细晶白云岩;夹角砾状及鲕状白云岩;下部为中薄层—中厚层微晶—细晶白云岩,夹角砾状白云岩;底部夹中厚—薄层中细粒石英砂岩。该段厚度 360 m 左右。

第二段主要为灰色、灰白色、深灰色厚层细晶—粗晶白云岩,具白云岩晶洞。岩石风化后呈砂糖状,底部常见灰色厚层中粒鲕状白云岩,该段厚度 376~360 m。

第三段为灰色—深灰色厚层细晶—粗晶白云岩、条带状白云质灰岩、灰岩,内具薄层状、团块状燧石,厚度 78~178 m。

娄山关组含化石稀少,仅在邻区湄潭附近发现有晚寒武世后期三叶虫,该地层以白云岩为主,内夹鲕状灰岩、白云岩,总体为碳酸盐台地沉积。

构皮滩电站的娄山关组白云岩以均质白云岩为主,局部见鸟眼构造、藻纹层及晶洞构造,

属于潮坪相-局限潮下带沉积。该白云岩中刀砍纹发育,地表岩石较破碎,反映刀砍纹节理没有被胶结、愈合。因此,该白云岩总体构造稳定性差。

2.1.2 奥陶系

测区的奥陶系分布于水电站大坝东侧,除缺失上奥陶统外,其余均有沉积。因此,本区奥陶系包括下奥陶统桐梓组、红花园组、湄潭组和中奥陶统十字铺组。

(1) 桐梓组(O_1t)

桐梓组主要由白云岩夹灰岩组成,下部夹一层很稳定的页岩,厚 150 m。以稳定的页岩为标志,可将该组划分为 3 段,自下而上为:

下段:深灰、灰色薄层生物碎屑灰岩,灰色中厚层粗粒生物碎屑灰岩。底部与寒武系分界处常有 1~3 m 厚的中厚层灰岩或砂质灰岩或钙质砂岩。厚度一般为 20 m 左右。产三叶虫:*Wanliangtingia* sp., *Asaphellus* sp., *Szechuanella* sp., 腕足类:*Finkelburgia meitanensis* Wang, *Syntrophinella* sp., *Imbricratis* sp., *Hesperonomia?* sp. 等。该地区寒武系顶部含大量燧石,并以此作为与桐梓组下段分界的标志。

中段:灰绿、灰白、黄绿色页岩(即桐梓页岩),厚度薄,仅 3 m 左右,页岩中产三叶虫:*Asaphellus inflatus* Lu, *Dactylocephalus dactyloides* Hsu, 腕足类:*Nanorthis* sp., *Apheoorthis* sp. 等。

上段:浅灰色厚层白云岩,呈微至细粒结构,含燧石团块和石英小颗粒,夹灰、浅灰色中厚层灰岩、白云质灰岩、钙质白云岩,近顶部常有泥质白云岩或泥岩。厚度达 115m。

构皮滩电站的桐梓组位于大坝东侧,出露较差,仅局部见地层露头。总体来看,桐梓组下段生物碎屑灰岩中含有较多的生物化石及生物碎屑,代表开放潮下带的较高能动荡环境下的碳酸盐沉积。中段泥质页岩中见保存完好的三叶虫等化石,并见水平层理静水沉积构造,反映其形成于浪基面以下的浅海沉积。上段灰岩、白云岩为局限潮下带—开放潮下带的沉积。

(2) 红花园组(O_1h)

本组岩性变化不大,主要为灰色中厚层至厚层生物碎屑灰岩,下部含泥质,近底部常含少量白云质或白云质团块,产头足类和海绵化石。厚度一般 20~30 m。

本组与桐梓组整合接触,其底界的划分以含大量生物碎屑、产 *Cameroeras* 的灰岩或白云岩出现为准。

本组生物群以头足类、腕足类和海绵为主。头足类:*Cameroeras hupeihense* Yu, *Belermnoceras* sp., *Hopeioceras* sp., 腕足类:*Apheoorthis* sp., *Tritoechia* sp., 海绵:*Calathium* sp. 等。它们是黔北红花园组中的常见分子,可与鄂西红花园组中、下部对比。

构皮滩电站的红花园组位于大坝东侧,出露较差。红花园组生物碎屑灰岩中含有较多头足类、海绵等生物化石,以开放潮下带沉积为主。下部的含白云质灰岩为局限潮下带沉积。

(3) 湄潭组(O_1m)

湄潭组主要岩性为黄绿色页岩、砂质页岩,中部夹一层稳定的生物灰岩,上部夹多层细砂岩,含种类繁多的生物化石,包括笔石、三叶虫、头足类、腕足类等,厚 224.37m。按岩性、生物群的纵向变化,可将其分为 3 段。

下段:以灰绿色页岩为主,包括黄绿、灰绿色页岩、砂质、钙质页岩,上部夹少量薄层细砂岩、钙质粉砂岩,中、下部夹薄层或透镜状生物碎屑灰岩、泥灰岩,底部为灰色薄层、极薄层生物

碎屑灰岩与灰绿色页岩互层,厚度一般 90.18m。生物群以笔石为主,主要有:*Didymograptus* cf. *filiiformis* Tullberg, *D. eobifides* Chen et Xia, *D. deflexus* Elles, *D. nicholsoni* (Lapworth), *D. vacillans* Tullberg, *Azygograptus suecus* Moberg, *Phyllograptus angustifolius* Hall, *Tetragraptus* cf. *decipiens* Hall; 次为腕足类:*Orthis serica* Martelli, *Sinorthis* cf. *typica* Wang, *Leptelloidea leptelloides* (Bekker), *Tritoechia* sp., *Mimella* sp.; 三叶虫:*Megalaspides* sp., *Liomegalaspides* cf. *hupeiensis* (Sun), 腹足类:*Ecculiomphalus sinensis* (Frech)等。

中段:灰色中厚层生物碎屑灰岩、结晶灰岩、瘤状灰岩、泥灰岩等,局部夹页岩、砂质页岩和砂岩透镜体,厚约 23.87 m。生物化石主要为腕足类:*Yangtzeella poloi* (Martelli), *Poramonites* sp., *Leptelloidea* sp.; 次为头足类:*Vaginoceras multiplectoseptatum* Yu, 腹足类:*Ecculiomphalus sinensis* (Frech), *Maclurites meitanensis* (Yu)等。

上段:厚度一般为 110.32m。下部黄绿、灰绿色含云母页岩、粉砂质页岩。夹灰绿色钙质云母粉砂岩、细砂岩及瘤状生物碎屑灰岩。中部为中薄层瘤状生物碎屑灰岩与钙质细砂岩互层。上部为中薄层钙质、泥质粉砂岩、粉砂质页岩夹中薄层瘤状生物碎屑灰岩与钙质细砂岩。近顶部见灰色薄层生物碎屑灰岩、瘤状灰岩、砂质灰岩。产笔石:*Glyptograptus sinodentatus* var. *minor* Mu, *Tetragraptus* cf. *bigbyilatus* Hsu, *Didymograptus nitidus* Hall, *D. nicholsoni* Lapworth, 三叶虫:*Ichangolithus ichangensis* Lu, *Megalaspides tainingenses* (Weller), *Ningkianolithus* sp., *Hanchungolithus* sp., *Taihungshania* sp., *Neseuretus* sp., *Hungiodes* sp., *Prosopiscus* sp., *Psilocephalina* sp., 腕足类:*Mimella* sp., *Yangtzeella poloi* (Martelli), 头足类:*Protocycloceras* sp. 等。

湄潭组与下伏含头足类和海绵化石的红花园组整合接触。

综上所述,本组生物化石十分发育,尤以笔石最为突出,岩性以碎屑岩类为主,细砂岩、页岩、灰岩在纵向上迅速地更替。从而证明,湄潭组是在地壳振荡运动频繁,富含泥、砂质的浅海环境下沉积形成的。

构皮滩电站的湄潭组位于大坝东侧,在工程开挖面上可见较好露头。湄潭组下段灰绿色页岩、砂质和钙质页岩夹细砂岩、钙质粉砂岩,中、下部夹薄层或透镜状生物碎屑灰岩、泥灰岩,内含较多笔石类、腕足类、腹足类、三叶虫等化石,总体为混合物源的陆棚浅海—潮下带沉积。中段碎屑灰岩、结晶灰岩、瘤状灰岩、泥灰岩,局部夹页岩、砂质页岩和砂岩透镜体,内含腕足类、头足类、腹足类等化石,为高能潮下带—陆棚浅海沉积。上段页岩、粉砂质页岩、钙质云母粉砂岩、泥质粉砂岩、细砂岩及瘤状生物碎屑灰岩、砂质灰岩等,内有笔石、三叶虫、腕足类、头足类等化石,代表混合物源的陆棚浅海到滨海沉积。

(4) 十字铺组(O_{2sh})

根据岩性大致可分两部分。

下部:灰色厚层粗晶生物碎屑灰岩、厚层灰岩、瘤状灰岩,厚度一般在 10 m 左右。内产笔石 *Glyptograptus teretiusculus* (Hisinger), *Dictyonema* sp.; 三叶虫:*Ampyx* sp., *Hanchungolithus* sp., 腕足类:*Yangtzeella poloi* (Martelli)等。与下伏湄潭组含 *Didymograptus* 或 *Glyptograptus sinodentatus minor* 的页岩,界线清楚。

上部:灰色薄至厚层泥灰岩,风化后似页岩。厚度 16 m 左右。生物群以笔石最为丰富,主要包括 *Glyptograptus teretiusculus* (Hisinger), *Gymnograptus linnarssoni* (Moberg), *Glyptograptus euglyphus* (Lapworth), *Climacograptus* sp., *Pseudoclimacograptus* cf.

scharenbergi Lapworth, *Amprexograptus* sp., *Callograptus* sp., *Dictyonema* sp.; 次为三叶虫: *Calymenes* *tingi* (Sun), *Lonchodomas* sp., *Birmanites* sp., 头足类: *Dideroceras* cf. *endocylindricum* (Yu), *D. wuhlenbergi* (Foord) 和 *Meitanoceras subglobosum* Chen 等。

构皮滩电站的十字铺组出露较差,厚度较小。生物碎屑灰岩、厚层灰岩、瘤状灰岩、泥灰岩含有笔石、三叶虫、头足类等化石,代表内源为主的潮下带—陆棚浅海的碳酸盐岩沉积。

(5) 宝塔组(O_{2b})

宝塔组主要为浅灰、浅紫、紫红色中厚层至厚层龟裂纹灰岩、瘤状泥质灰岩、泥灰岩,常含生物碎屑和泥质。上部夹薄层灰绿色钙质粉砂岩。厚度一般在 4 m 左右。

本组生物群以头足类最发育,包括: *Michelinoceras elongatum* (Yu), *Eosmichelina* *huanafense* Chen, *Sinoceras chinense* (Foord), *Discoceras eurasiaticum* Frech, *Richardsonoceras fenggangense*, *R. scofieldi*, *R.* sp., *Fenggangoceras planoseplatum* 等,产少量三叶虫: *llaenus* sp.。

构皮滩电站宝塔组分布于大坝东侧,因厚度较小,出露较差。其总体为陆棚浅海的碳酸盐岩和细碎屑岩沉积。

2.1.3 志留系

构皮滩电站的志留系仅有中、下统,为浅海相碎屑岩建造及碳酸盐岩建造,沉积旋回清楚,生物发育。总厚 580 余米,与下伏奥陶系平行不整合接触。

(1) 龙马溪组(S_{1l})

龙马溪组由浅海相的碎屑岩组成,厚度 30.07 m。

依岩性大致可分为两部分:

下部:黄绿、灰绿色页岩、粉砂质页岩及钙质、泥质粉砂岩、细砂岩,具层纹状和球形风化,局部含少量钙质页岩及粉砂岩,为笔石页岩相沉积。厚度 16.85 m。生物群单一,几乎全为笔石,包括: *Glyptograptus* cf. *tamariscus* Nicholson, *G.* cf. *lungmaensis* Sun, *Climacograptus normalis* Lopworth, *Diplograptus orientalis* Mu, *Pristiograptus* sp., *Monoclimacis* sp., 仅见个别腕足类: *Zygospiraella* sp. 等。

中、上部:灰色薄层钙质粉砂岩、钙质砂岩,夹薄层灰岩或灰岩透镜体。厚度 13.22m。化石有笔石: *Glyptograptus tamariscus* Nicholson, *Climacograptus minutus*? Corrutherse, *Pseudoclimacograptus* sp., *Climacograptus* sp.; 三叶虫: *Anistohorpes sinensis* (Grabau), *Leonaspis* cf. *sinensis* Chang, *Latiproetus*? sp., *Eucrinuroides* sp., *Gaotania*? sp., *Ptilillaenus* sp.; 腕足类: *Dalmanella* sp., *Fardenia* sp., *Eospirifer* sp. 等。

构皮滩电站的龙马溪组位于大坝东侧,厚度较小,仅在公路两侧的开掘面上见到露头。龙马溪组总体以细碎屑岩—泥质岩为主,水平层理、韵律层理等发育,反映静水条件。该组含有笔石、三叶虫、腕足类等化石,为典型的陆棚浅海沉积。

(2) 石牛栏组(S_{1sh})

石牛栏组主要为浅海碳酸盐岩和碎屑岩组成,其底部为灰色中厚层生物碎屑灰岩,顶部为灰绿色、黄绿色页岩、砂质页岩。厚度 42.67m。

按岩性可以分为三部分:

下部:灰色中厚层、厚层生物碎屑灰岩、介壳灰岩,夹瘤状灰岩及泥灰岩。含大量化石,包

括珊瑚: *Troedssonites* sp., *Crassilasma* sp., *Heliolites* sp., *Halysites* sp., *Amplexoides* sp., *Palaeofavosites* sp., *Yassia* sp., *Fletcheria* sp., *Gyalophyllum* sp., *Microplasma* sp., *Cystiphyllum* sp., *Favosites* sp., *Syringopora* sp.; 腕足类: *Camarotoechia fengkangensis*, *Conchidium* sp., *Eospirifer sinensis* Rung, *Spirigerina sinensis*, *Striispirifer acuminiplicatus*, *Clintonella? kueichouensis* (Wang), *Nalivkina* sp., *Eostropheodonta* sp., *Zygospira* sp.; 三叶虫: *Latiprotus* cf. *latilimbatus* (Grabau) 等。

中部: 以黄绿色、灰绿色页岩为主, 次为粉砂质页岩、钙质页岩、泥岩夹中厚层泥灰岩、瘤状灰岩等。内含珊瑚: *Crassilasma* sp., *Favosites* sp., *Heliolites* sp., *Halysites* sp., *Fletcheria* sp., *Mesofavosites* sp., *Syringopora* sp., *Stauria* sp., *Trypolasma* sp., *Microplasma* sp., *Meitanopora convexocytata* Yang, *Parafletcheria dupliiformis* Yang; 腕足类: *Zygospirifer dubisi* (Verneuil); 三叶虫: *Encrinuroides* sp., *Latiproetus* sp.; 笔石: *Pristiograptus regularis?* Torngust, *Monoclimacis* sp. 等化石。

上部: 灰绿色、黄绿色页岩夹薄层砂岩、粉砂岩, 局部夹黄绿色钙质页岩和少量泥灰岩。化石稀少, 仅见少量三叶虫: *Latiproetus* sp. 和笔石: *Monograptus* sp., *Pristiograptus* sp., *Dendrograptus* sp. 等。

构皮滩电站的石牛栏组分布于大坝东侧, 该组总体为混合物源的细碎屑岩、泥质岩、碳酸盐岩沉积, 内含较多浅海相珊瑚类、腕足类、三叶虫、笔石等化石, 反映该组形成于混合物源的陆盆浅海环境。

(3) 韩家店组 (S_2h)

区域上韩家店组主要为紫红色夹灰绿色、黄绿色碎屑岩, 自下而上可以分为两个段。

第一段岩性主要为紫红色夹灰绿、黄棕色碎屑岩, 可以分上、中、下三部分:

下部岩性稳定, 且较单一, 为紫红色泥岩、粉砂质泥岩, 夹少量灰绿、蓝灰色泥岩、粉砂质泥岩及薄层砂岩。厚度 50 余米。生物化石稀少, 除见少量 *Lingulla* sp. 外, 未发现其他化石。

中部主要为灰绿、黄绿色泥、页岩及砂质泥、页岩、钙质页岩, 夹少量紫红色泥岩、粉砂质泥岩, 夹层多少随中部厚度大小而增减。厚度约 55 m。生物化石稀少, 仅见个别腕足类: *Nucleospira* sp., 苔藓类: *Fenestella* sp.。

上部主要为紫红色页岩及砂质泥、页岩夹灰绿、黄绿色薄层粉砂质砂岩、泥页岩, 或呈互层。由北向南紫红色逐渐减少, 灰绿、黄绿色增多, 同时紫红色泥岩中钙质成分增加。其顶部以紫红色泥岩或紫红色粉砂质泥岩与韩家店组第二段分界。厚度达 53 m。生物化石贫乏, 仅少量腕足类: *Nucleospira* sp., 腹足类: *Murchisonia* sp., 双壳类: *Nucalidae* (科)。

综上所述, 本段在岩性上变化不大, 主要为泥岩、页岩夹砂质页岩、粉砂质泥岩及钙质泥页岩, 下部还夹薄层砂岩。中部虽以灰绿、黄绿色为主, 夹少量紫红色夹层, 但其上、下部岩层均以紫红色为主, 从而证明总体上本段岩层是在炎热、干燥的气候环境下沉积形成的, 而且不宜于生物生长。

本段以紫红色的泥页岩出现与下伏石牛栏组的灰绿色砂页岩分界。

第二段为浅海相碎屑岩沉积, 厚度为 336 m。按其岩性可分为上、下两部分:

下部主要岩性为灰绿、黄绿色页岩、泥岩、粉砂质泥岩、砂质泥岩, 偶夹薄层砂岩, 局部夹钙质泥岩和深灰色薄层灰岩, 厚度稳定, 一般为 172 m。生物群以腕足类为主, 包括: *Howellella uniplicatus* Tsiu, *Eospirifer* cf. *radiatus* Sowerby, *Striispirifer shiqianensis* Rung, *Naliv-*

kinia sp., *Leptostrophia* sp., *Eostrophonella* sp. 等; 次为双壳类: *Orthonota perlata* Barrande, *Modiolopsis* cf. *lavalii* (Mansuy), *Actinopteria* sp., 三叶虫: *Encrinurus* sp. 等。

上部主要岩性为灰绿、黄绿、蓝灰色泥岩、粉砂质泥岩、页岩夹灰岩结核或透镜体(结核直径为 5~20cm, 一般 10cm), 其顶部为页岩夹薄层砂岩。厚度 164 m 左右。生物群发育, 其中以三叶虫、头足类、腹足类为最多, 次为腕足类、双壳类、植物等, 包括下列属种: 三叶虫: *Coronoccephalus rex* Grabau, *Latiproetus* sp.; 头足类: *Jangziceras yinkiangensis* var. *major* (Lai), *Sichuanoceras depressum* Yang; 腹足类: *Hormotoma kutsingensis* Grabau; 腕足类: *Eospirifer* cf. *radiatus* Sowerby, *Naliukinia* cf. *strita*, *Brachyprion* sp., *Nucleospira* sp.; 双壳类: *Orthonota perlata* Barrande, *Actinopteria* cf. *mansuyi* Grabau。

综上所述, 本段岩性变化不大, 主要为泥、页岩含少量粉砂质、砂质, 上部含灰岩结核, 底部以含腕足类化石的黄绿、灰绿色泥、页岩与下伏第一段的紫红色泥岩分界。其上部含灰岩结核。由此反映出当时沉积环境较为稳定, 气候温和, 生物繁茂。本段的生物化石下部少、中上部多, 目前虽然中志留统的标准笔石在本区尚未发现, 但中志留统的重要化石, 如 *Coronoccephalus rex*, *Jangziceras yinkiangense*, *Hormotoma kutsingensis* 等是比较发育的。根据岩性、生物群和层位, 可与川东南秀山一带含 *Stomatograptus sinensis*, *Monograptus shiqianensis*, *M. guizhouensis*, *Monoclimacis chuchlensis* 的秀山组上部对比。

构皮滩电站坝区韩家店组厚度较小, 仅 46.96 m。主要为紫红色夹灰绿色页岩、粉砂质页岩、夹泥质、钙质粉砂岩、细砂岩。该组砂岩中具有典型的浪成波痕、浪成交错层理等构造。内含较多的腕足类、双壳类、头足类、腹足类、三叶虫、苔藓虫等海相生物化石。其页岩、粉砂岩为陆棚浅海沉积为主, 砂岩是以潮坪为特征的滨海沉积。

2.1.4 二叠系

二叠系主要由浅海相灰岩建造组成, 局部夹薄煤层, 包括以下地层单位: 下二叠统栖霞组、茅口组, 上二叠统吴家坪组、长兴组。其中栖霞组、茅口组位于构皮滩电站大坝的坝基和发电站、导流洞工地。吴家坪组、长兴组位于大坝西侧的库区。

(1) 栖霞组(P_{1q})

栖霞组底部包括粘土岩、绿泥石岩、炭质页岩、砂岩、硅质岩等, 为梁山段, 厚度 1.6~3.4m。梁山段与下伏志留纪地层呈平行不整合接触。

梁山段以上, 栖霞组由浅海灰岩、燧石灰岩夹波状—链状、疙瘩状(图版 I-1)泥质条带灰岩、泥灰岩组成, 颜色深, 波状—透镜状条带异常发育, 生物群以筳类、珊瑚类为主, 厚 152.57~153.94 m。根据岩性、生物群的纵向变化, 自下而上分为 4 层:

第一层: 厚度 60 m, 下部为灰色—深灰色中至厚层含生物碎屑灰岩夹波—链状泥质条带灰岩或泥质灰岩, 底部一般含燧石结核。中部为深灰色中—厚层、块状含生物碎屑灰岩、泥晶灰岩, 含灰黑色不规则炭、泥质生物碎屑灰岩。上部灰—深灰色厚层含生物碎屑泥晶灰岩, 内含燧石团块, 偶夹少量钙质页岩。产筳: *Nankinella* sp., *Schwagerina* aff. *bicornis* Chen; 珊瑚: *Hayasakaia rari cystata* Zhao et Chen, *Wentzellophyllum* cf. *volzi* 等化石。岩性的横向变化不大, 一般厚 50~60 m。

第二层: 下部为灰—深灰色厚层块状含炭、泥质含生物碎屑泥晶灰岩、含生物碎屑泥晶灰岩。中部为灰色—灰黑色含生物碎屑泥晶灰岩, 含燧石结核或团块。上部为灰—灰黑色厚层

块状含生物碎屑泥晶灰岩,含白云化或硅化生物碎屑泥晶灰岩,局部夹燧石条带。产筳:*Nankinella* sp., *Schwagerina* sp., *Chusenella* sp.; 珊瑚: *Polythecalis* cf. *yangtzeensis* Huang, *Tetraporinus* cf. *planotabulatus* Zhao et. Chen; 腕足类: *Linoproductus tenuistriatus* (Verneuil), *Teloplecta nankingensis* (Frech) 等化石。岩性在全区都很稳定,厚 45.55~46.92 m。

第三层:深灰色中一厚层生物碎屑泥晶灰岩,中下部夹灰黑色波状—链状含碳、泥质条纹或薄层状泥晶灰岩或薄层泥质灰岩,形成了十分特殊的波状—透镜状构造,含少量燧石结核或团块。产筳: *Schwagerina* cf. *chihsiaensis* var. *regularis* Chen, S. cf. *chihsiaensis* var. *fragilis* Chen, *Spseudochihsiaensis* Chen; 珊瑚: *Allotropiophyllum sinense* Grabau; 腕足类: *Cryptospirifer* sp. 等化石。厚 24.87 m。

第四层:以深灰色—灰黑色中一厚层波状、链状含炭、泥质生物碎屑灰岩夹含生物碎屑泥晶灰岩为主,顶部为生物碎屑泥晶灰岩,夹少量薄层波状、链状含炭、泥质生物碎屑灰岩。底部为中一厚层生物碎屑泥晶灰岩,夹少量含炭、泥质生物碎屑灰岩及少量燧石团块。产筳: *Schwagerina pseudochihsiaensis* Chen, 珊瑚: *Tetraporinus gilunshanensis* Lin, 腕足类: *Cryptospirifer* sp. 等化石。厚度 22.15 m。

构皮滩电站的栖霞组灰岩总体为浅海相含生物碎屑灰岩,内有珊瑚类、腕足类、筳类等浅海相生物化石。尤其是在乌江北岸构皮滩电站大坝坝基,栖霞组下部、中部、上部发育 3 个碳酸盐灰泥丘,其中下部灰泥丘厚度 35 m,中部灰泥丘厚约 95 m,上部的灰泥丘厚度约 15 m。灰泥丘是碳酸盐沉积中的一种特殊沉积类型,岩性以泥晶灰岩为主,块状层理发育(图版 I-2),即沉积体内没有层面分隔,内可以含少量生物,形成巨厚的碳酸盐岩块体,空间上为向上隆起的丘状凸起,丘体呈缓透镜状,野外剖面可见向下变薄(图版 I-3)。

(2) 茅口组(P_1m)

茅口组由灰岩夹燧石灰岩和硅质岩组成,含少量白云岩团块或透镜体。生物群以筳类为主,厚度 220.77~223.64m。以其中部稳定的硅质岩、燧石灰岩夹层为标志,分为两段。

第一段主要是灰—灰黑色灰岩,厚 108.73~110.60m,自下而上亦分 3 层:

第一层:灰及深灰色中一厚层生物碎屑泥晶灰岩,偶含燧石结核,产筳: *Parafusulina* sp., *Verbeekina* cf. *grabau* Thompson et. Foster, *Schwagerina exilis* Schwager, *Chusenella conicocylindrica* Chen, *Pseudofusulina* sp.; 珊瑚: *Allotropiophyllum sinense* Grabau, *Yatsengia asiatica* Huang, *Metasinopora crassa*; 腕足类: *Monticulifera sinensis* (Frech) 等化石。厚度 60 m 左右。

第二层:灰及深灰色厚层灰岩,产筳: *Yabeina quasigubleri* sp., *Schwagerina* aff. *pingdingensis* Sheng, *Chusenella tingi* Chen; 腕足类: *Crurithyris* sp. 等化石,底部含燧石结核或透镜体,偶夹白云岩,顶部为 0.5~4 m 的生物灰岩,盛产筳化石 *Pseudodoliolina pulchra* Sheng, *P. pseudolepida* (Deprat), *P. cf. chinghaiensis* Sheng, *P. cf. ozawai*, *Yabeina* sp., *Neoschwagerina* cf. *megasphaerica*, Deprat, ? *Afghanella* sp., *Verbeekina* sp., *Nankinella* sp., *Chusenella* sp., *Kahlerina* sp. 等。厚 10.60~12.64m。

第三层:灰、深灰及灰黑色厚层一块状灰岩,中偏上部含燧石结核或条带,中、下部含泥质条带(局部为泥质灰岩)。产筳: *Schwagerina* sp., *Rugososchwagerina* sp., *Chusenella* cf. *tingi* Chen, *C. sinensis* Sheng, *C. douvillei* (Colani), *Codonofusiella* sp., 珊瑚: *Ipciphyll-*