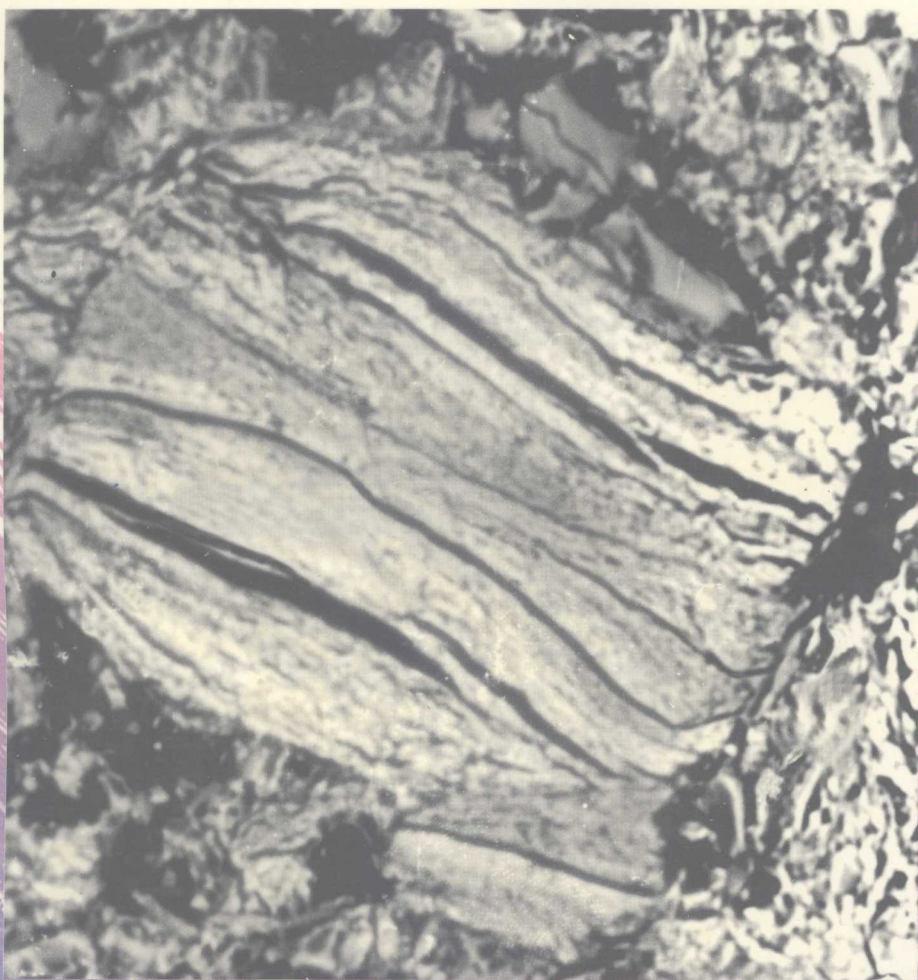


国家自然科学基金资助

极低级变质作用

——以右江中生代构造带为例

索书田 毕先梅 周汉文 著



地质出版社

国家出版基金项目

极低级变质作用

——以塔里木中生代构造带为例

袁顺开 李海兵 陈国宏 等 著



地质出版社

国家自然科学基金资助

极低级变质作用

——以右江中生代构造带为例

索书田 毕先梅 周汉文 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以岩石圈流变学理论为指导,在宏观地质研究和光学显微镜观察基础上,运用 TEM、XRD、EMPA 等技术,系统地对右江中生代盆地三叠系槽盆相浊流沉积区域极低级变质作用进行了研究;建立了变质作用格架,划分出五个变质亚带;结合构造变形分析,讨论了变形与变质关系及其地球动力学意义,指出区域极低级变质作用属于伸展构造背景下的埋藏低压型,是印支—燕山构造旋回早期的重要地质事件。

本书方法、思路新颖,内容丰富,语言简练,可供从事地质构造生产、科研工作者及高等院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

极低级变质作用:以右江中生代构造带为例/索书田等著.-北京:地质出版社,1999.6

ISBN 7-116-02799-8

I. 极… I. 索… III. 中生代-构造带-变质作用,极低级-研究-右江 N.P588.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 15814 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:祁向雷

责任校对:黄苏晔

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:4.625 图版:3 页 字数:112,000

1999 年 6 月北京第一版·1999 年 6 月北京第一次印刷

印数:1~400 册 定价:11.00 元

ISBN 7-116-02799-8

P·2012

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

序

右江中生代构造带位于特提斯构造域与濒太平洋构造域的交接和复合部位。作者运用伊利石结晶度 (illite crystallinity)、绿泥石-云母堆垛集合体 (chlorite-mica stacks)、标志性层状硅酸盐矿物及其组合、牙形石色变指数 (CAI) 等判别标志, 在地质观察基础上, 较深入研究了右江构造带三叠纪陆源碎屑浊积岩的极低级变质作用和区域构造变形。以伊利石结晶度指数 (IC) 为参考系, 建立了变质作用格架, 划分出五个变质亚带, 即低级成岩带 ($<150^{\circ}\text{C}$)、高级成岩带 ($150\sim 200^{\circ}\text{C}$)、低级浅层 (近) 变质带 (anchizone) ($200\sim 250^{\circ}\text{C}$)、高级浅层 (近) 变质带 ($250\sim 350^{\circ}\text{C}$) 和浅变质带 ($>350^{\circ}\text{C}$)。三叠系碎屑岩主体属浅层 (近) 变质带或极低级变质带 (very low-grade metamorphic zone)。作者认为右江构造带主变形期形成近东西向与近南北向造山型构造带的交叉、叠加复杂构造格局, 变形过程中的物质及运动具双向迁移特征, 变形时代虽可能起始于印支晚期, 但主体是燕山期, 因之, 称为印支—燕山构造带。宏观及微观组构观察证明, 区域变形及区域板劈理 (S_1) 发生在极低级变质作用之后。极低级变质作用程度在地层柱中由下向上降低, 变质亚带的边界总体上与地层分界线一致。构造变形则相反, 在构造地层柱中, 由下向上变形强度相对增大。主期变形的微观变形机制以压溶作用为主, 属于准塑性流变学 (quasi-plastic rheology) 域。这些事实证明, 右江构造带的极低级变质作用为前构造或前变形的埋藏型变质作用, 主要控制因素是区域构造背景、巨厚的浊积岩层自身负荷及盆地高热流状态。多种温压计及标志估算, 三叠纪岩层最下部 (含晚二叠纪碎屑岩层) 的古温度局部可达 350°C , 静岩压力约 195 MPa , 伊利石 (白云母) b_0 值累积频率曲线图显示为低压环境, 具高热流、高古地温梯度 ($40\sim 43^{\circ}\text{C}/\text{km}$), 反映了伸展型盆地内部与沉积-埋藏深度相关的热流状态。

综合沉积学、构造学及区域极低级变质作用特征可以看出, 右江中生代构造带经历了早期大陆边缘裂谷—弧后伸展盆地沉积、埋藏型极低级变质作用和主构造变形以及主构造变形期后等构造演化阶段。在构造演化的早期沉积和变质作用阶段, 主要受特提斯构造域控制, 而在主构造变形阶段, 则受特提斯和濒太平洋构造域双重控制。滇黔桂“金三角”区微细浸染 (卡林) 型金矿与主构造变形有成因及空间上的直接联系。主构造变形以水平挤压为主, 与印支地块、扬子地块及华南造山带 (地块) 在晚印支—燕山期会聚碰撞的地球动力学过程相关, 形成造山型的印支—燕山构造带。右江中生代构造带构造演化, 可以提供一个认识中国大陆构造动力学特征的窗口。

目 录

序	
绪 言	(1)
第一章 区域岩石地层序列	(5)
第二章 极低级变质作用	(9)
一、极低级变质作用研究现状	(9)
二、伊利石结晶度	(13)
三、绿泥石-云母堆垛集合体	(20)
四、标志性粘土矿物及其组合	(28)
五、牙形石色变指数和镜质体反射率	(30)
六、流体包裹体	(32)
七、 p - T 条件	(34)
第三章 区域构造变形	(37)
一、变形演化序列	(37)
二、主期构造变形格局——物质双向运动及迁移	(39)
三、板劈理及其发育机制	(41)
四、北西向剪切带	(45)
五、主期变形时代讨论	(46)
第四章 微细浸染(卡林)型金矿的构造控制	(50)
第五章 构造演化	(55)
结束语	(60)
主要参考文献	(61)
英文摘要	(64)
图版及说明	(67)

CONTENTS

Preface

Introduction	(1)
Chapter 1 Regional lithostratigraphic sequence	(5)
Chapter 2 Very low-grade metamorphism	(9)
1 A review of very low-grade metamorphism research	(9)
2 Illite crystallinity	(13)
3 Chlorite-mica stacks	(20)
4 Index clay minerals and their assemblages	(28)
5 Conodont colour alteration index and vitrinite reflectance	(30)
6 Fluid inclusions	(32)
7 Metamorphic <i>p-T</i> conditions	(34)
Chapter 3 Regional tectonic deformation	(37)
1 Deformational sequence	(37)
2 Tectonic framework for the main phase deformation-double directional motion of geological bodies and migration of deformational events	(39)
3 Slaty cleavage and its formation mechanism	(41)
4 NW-trending shear zones	(45)
5 Discussion on timing of the main phase deformation	(46)
Chapter 4 Structural controls on sedimentary rock hosted disseminated (Carlin-type) gold diposits	(50)
Chapter 5 Tectonic evolution	(55)
Conclusions	(60)
References	(61)
Abstract	(64)
Plates and illustrations	(67)

绪 言

“右江中生代构造带极低级变质作用与构造演化”是一个国家自然科学基金资助的项目，期限3年。研究工作从1995年1月开始，1997年12月结束。

右江中生代构造带位于特提斯构造域与濒太平洋构造域的交接和复合部位，中生代三叠纪岩层出露良好，沉积特征和岩相变化明显，是研究沉积盆地演化的最佳场所之一。近年来，由于在盆地北部滇黔桂接壤地带三叠纪岩层及古生代岩层中发现了一系列中—大型微细浸染（卡林）型金矿，更加促进了该区基础地质工作的研究。尤其是关于右江盆地的沉积学、微细浸染型金矿的成矿条件和沉积盆地的演化历史，研究比较深入，成果突出（刘宝珺等，1987；张锦泉等，1994；吴江等，1993；王砚耕等，1994、1995；张继淹，1995；夏文臣等，1995；曾允孚等，1995；吴浩若等，1997；侯宗林和杨庆德，1989），为深入研究右江构造带的构造演化和地球动力学过程，奠定了良好的基础。

早在1990~1993年期间，我们曾与贵州省地矿局合作，进行了“黔西南构造与卡林型金矿”研究工作。研究工作中发现右江盆地内三叠纪槽盆相陆源碎屑岩序列一般都遭受了低级区域变质作用，板劈理发育，构造变形强烈，具有造山带的构造变形特征（王砚耕等，1994）。但是，变质作用的特征、性质、空间分布、与地层及变形的关系、地球动力学背景及与盆地热历史的关系，由于时间和经费限制，当时并未进行深入研究。

“右江中生代构造带极低级变质作用与构造演化”项目的宗旨是在地质研究基础上，综合运用常规及现代测试技术，查明右江盆地三叠纪槽盆相陆源碎屑岩序列变质作用类型及与构造变形的关系，进而恢复古盆地热历史及构造演化的地球动力学过程。

研究工作中吸取了国外先进的研究思路和方法，与Frey和Kisch等著名极低级变质作用研究学者进行了接触和交流，收获颇大。但更重要的是结合我国实际和右江盆地的地质特点、前人研究基础，按照有限经费和有限目标的原则，精心设计、部署、采样和分析测试，努力避免一般化。工作中着重抓了下列几个环节：

1. 把基础地质研究放在首位

重新观察了典型的地层剖面（如田林县利周一河口、西林石炮、百色百康、望谟乐康、贞丰联合及龙头山、罗平板桥等不同构造及层位剖面），建立右江盆地内部槽盆相碎屑岩沉积岩石地层序列；做了南北向4条、东西向3条概略地质构造剖面，重点解剖了百色—田林—八渡一线（150 km）地质剖面变质变形序列，对坡坪、泥凶、乐业、玉洪、凌云、旧州、叉路口、西林、板桥、百合等关键地区，较深入地进行了观察研究，系统采集了各种样品，构筑了认识的支撑点，从而建立了右江中生代构造带的基本构造框架和变形历史；先后参观和研究了金牙、高龙、板其、丫他、烂泥沟、紫木凶、戈塘等主要中—大型金矿，分析和比较了它们的成矿构造控制因素。

2. 样品采集与测试

伊利石结晶度指数（IC）是确定极低级变质作用及其框架的主要参考系。但由于伊利

(1) 运用伊利石结晶度指数 (IC)、绿泥石-云母堆垛集合体、标志性粘土矿物及组合、牙形石色变指数 (CAI) 等判别标志结合宏观地质观察, 确认组成右江构造带的三叠纪陆源碎屑浊流岩系的主体部分, 遭受了区域性极低级变质作用, 变质温度区间为 $200\sim 350^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 以伊利石结晶度指数为参考系, 将右江盆地内三叠纪陆源碎屑岩系划分为五个变质亚带, 即低级成岩带、高级成岩带、低级浅层(近)带、高级浅层(近)带和浅变质带。其中, 高级成岩带与浅层(近)变质(带)(含低级和高级带)为极低级变质带。各变质亚带的边界与地层的边界大体一致。变质程度与岩层在地层柱中位置相关, 由下而上变质程度降低。

(3) 右江中生代构造带具有复杂的变形历史。主期变形表现为近东西向与近南北向线状构造系统交叉、叠加形成的复杂构造格局, 物质运动具双向迁移行为, 发育区域性板劈理, 在构造地层柱中, 变形强度由下向上增大。后期的北西向对接变形带、大型多层逆冲推覆构造、网格状断裂系统及小型半地堑盆地, 对主期构造有明显的破坏和改造。主期变形可能开始于印支晚期, 但主要是在燕山期完成的, 因而称为印支—燕山构造带。

(4) 右江构造带的极低级变质作用框架与构造框架不相吻合, 伴随主期变形的区域性板劈理 (S_1) 切割平行层理的初始组构 (S_0) 及绿泥石-云母堆垛集合体。因之, 极低级变质作用属于前构造或前变形的埋藏变质作用类型。三叠纪地层最下部的古温度可达 350°C , 静岩压力约为 195 MPa , 由伊利石(白云母) b_0 值累积频率曲线图显示为低压环境, 具高热流, 古地温梯度为 $40\sim 43^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。反映出伸展沉积盆地内部与埋藏深度相关的热状态。

(5) 综合沉积、火山岩、变质作用、构造变形等特征可以看出, 右江构造带经历了早期弧后伸展盆地—边缘盆地演化阶段及后期盆地萎缩—关闭、强烈变形的演化阶段。在沉积盆地演化阶段, 主要受特提斯构造域控制, 金沙江—哀牢山洋向扬子大陆壳俯冲, 导致右江地壳拉伸薄化和盆地进一步扩展, 上隆的地幔及穿过莫氏面的高热流, 是右江三叠纪盆地高热流的主要来源。在构造变形阶段, 特提斯构造域与濒太平洋构造域的联合及复合作用较为明显, 水平挤压体制是主要的。晚期的半地堑盆地, 乃是“造山”期后伸展塌陷作用的结果。

(6) 滇黔桂“金三角”区的微细浸染型金矿(卡林型)的成矿控制因素很多, 但构造是主导或第一因素。这些矿床均是在主期构造变形阶段形成的。黔西南各矿床受控于挤压体制; 桂西北—滇东各矿床受控于伸展体制。变形事件和成矿过程都有迁移行为, 但处于统一的地球动力学背景下。

由于主客观原因, 特别是第一次对一个区域规模的极低级变质带进行综合研究, 还缺乏足够的理论和测试技术的准备, 因此研究工作还存在以下不足:

(1) 研究工作涉及到大量的有关粘土矿物晶体结构、成分、演变等专门性很强的内容, 但没有足够的条件充分开展工作;

(2) 极低级变质作用过程中的矿物反应, 不仅受温度控制, 还受 $f(\text{CO}_2)$ 、 $f(\text{O}_2)$ 及流体/岩石比等诸多因素制约, 有关领域本次工作未能涉足;

(3) 高分辨电子显微技术等方法, 解释水平还不高。

这些问题和缺陷, 有的属于理论和方法本身就不成熟, 还处于假说及试验阶段, 有的则属于我们素质不高、经验不足所造成的。

研究工作由索书田主持, 参加的成员有周汉文、游振东(兼指导)、毕先梅(电子探

针)、陈荣秀(粘土矿物 X 射线衍射)、赵文霞(透射电子显微镜)、陆琦(伊利石结晶度)、张文淮(流体包裹体),研究生王会云、祁向雷参加了部分工作,黄思骥负责岩石薄片鉴定,吴秀玲协助扫描电镜观察。云南、贵州、广西三省(区)地矿系统有关所(队)参加了协作,侯光久、张志斌和张明发参加了部分样品和资料收集工作。所以,该项目的完成,得益于多学科的结合及多单位的协作。报告编写中参考和引用了前人不少资料,其中一部分是未公开发表的。工作过程中,得到地质矿产部原国际合作司司长陶惠亮教授的鼓励。与瑞士巴塞尔大学 Frey 教授、以色列 Ben-Gurion 大学 Kisch 教授及美国密执安大学 Jiang 博士的交流与讨论,受益匪浅。

项目结束后,由中国科学技术大学刘德良教授、中国地质科学院沈其韩院士、西北大学张国伟教授、江西省地质矿产局杨明桂教授和贵州省地质矿产局王硕耕教授组成的评审委员会对该项研究成果进行了认真评审,提出了许多建议,作者对他们的辛勤劳动和严肃认真精神表示钦佩。

本书是在研究报告的基础上进一步修改而成。在本书正式出版之际,特向上述单位和个人一并表示谢意。

第一章 区域岩石地层序列

右江三叠纪盆地内碎屑岩系的沉积学、层序地层学、地层格架及盆地构造演化,先后由侯方浩等(1984)、卢重明(1986)、刘宝珺等(1987)、秦建华和吴应林(1989)、杨成奎(1993)、王砚耕等(1994, 1995)、曾允孚等(1993)、夏文臣(1994)、张锦泉和蒋廷操(1994)及张继淹(1995)等进行过较深入的研究。滇黔桂三省(区)地矿系统的区域地质测量成果,为这些研究工作奠定了良好基础。但是,由于右江盆地内三叠纪岩层相变、变形均很强烈,因而,有关三叠纪碎屑岩系的地层划分、岩石地层名称术语使用很不统一。在此暂据各省(区)岩石地层多重划分对比研究成果及我们区域上的观察比较,建立了右江三叠纪盆地陆源碎屑岩区岩石地层序列或地层柱(表 1-1),作为下面有关章节内容讨论时的地层参考框架。为了简明,一些厚度较小的岩石地层单位名称被删去了,放在同一地层柱位置上的单位也只能总体上对应,而且,不少岩石地层单位是穿时的(张继淹, 1995)。三叠纪槽盆相碎屑岩总厚度约 8000~10000 m,贞丰、望谟地区实测的地层残留厚度为 7660 m。

表 1-1 右江三叠纪岩石地层序列

Table 1-1 Stratigraphic sequence of Triassic strata in the Youjiang River basin

时 代	岩 石 地 层
T_3	平寨组 黑苗湾组
T_2^2	兰木组 河口组 边阳组
T_2^1	百蓬组 板纳组 新苑组 许满组
T_1	石炮组 罗楼组 乐康组
下伏地层 P_2	邻薄组 合山组

早三叠世地层以西林城北石炮剖面(图 1-1)为代表,主要岩性为凝灰质砂岩、层凝灰岩、泥质板岩夹深灰色灰岩、粉砂质板岩等,厚 1072 m,具鲍马序列和深水槽盆沉积特征。

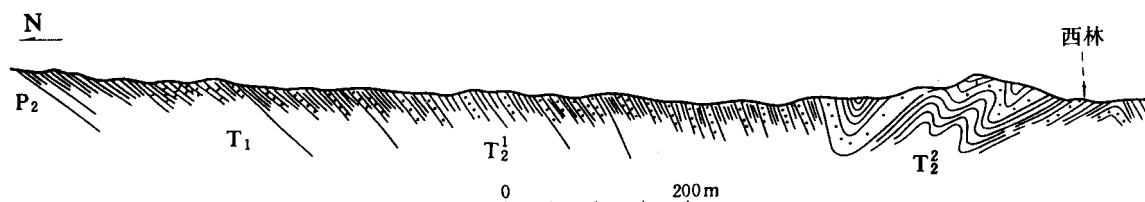


图 1-1 西林三叠纪地层剖面图

Figure 1-1 Geological section of Triassic strata in Xilin

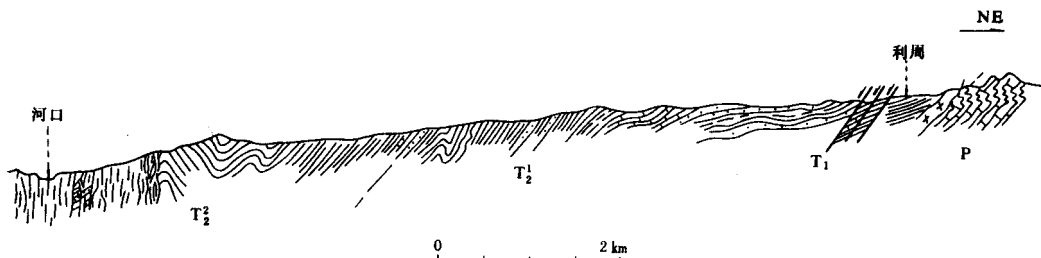


图 1-2 田林县利周一河口三叠纪地层剖面

Figure 1-2 Cross-section of Triassic strata from Lizhou to Hekou, Tianlin

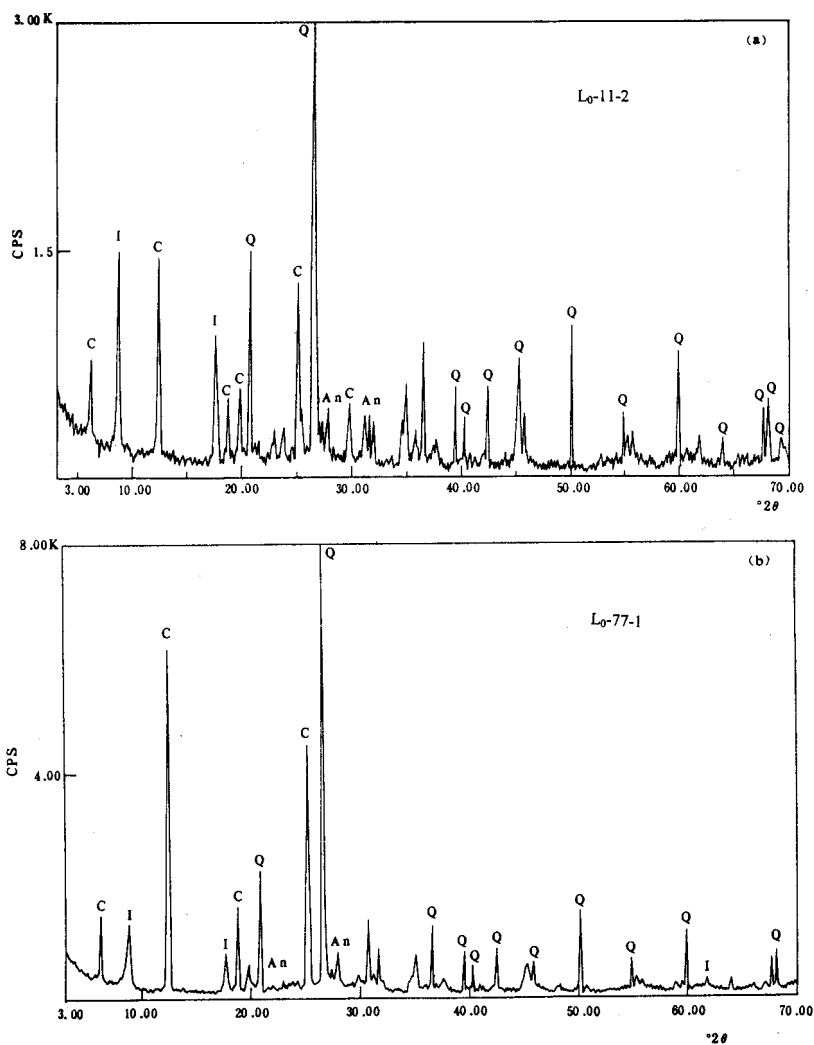


图 1-3 板岩 X 射线粉晶衍射图谱

Figure 1-3 X-ray powder diffraction patterns of the slate

L₀-11-2, 凌云; L₀-77-1, 玉洪

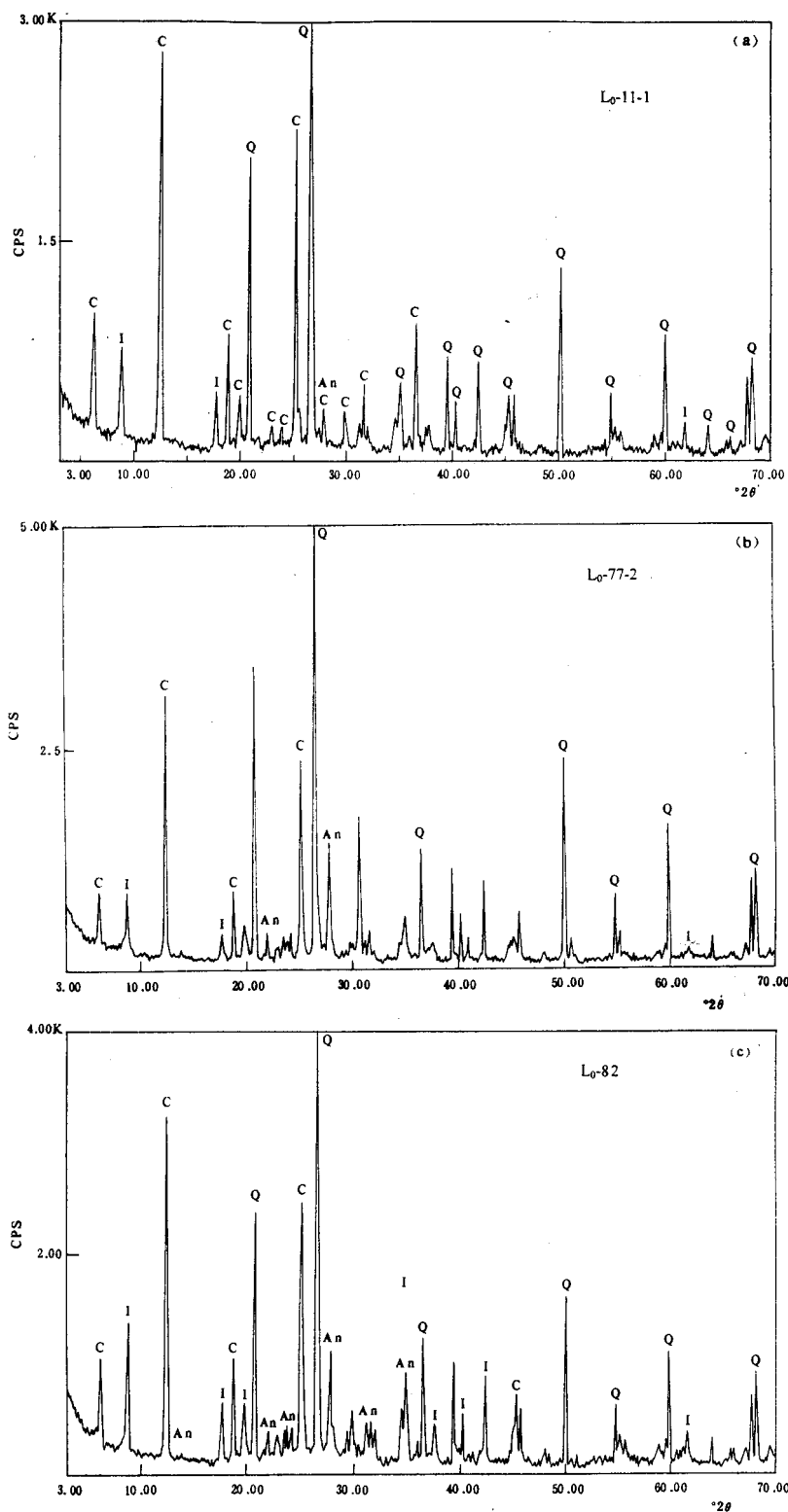


图 1-4 变粉砂岩 X 射线粉晶衍射图谱

Figure 1-4 X-ray powder diffraction patterns of the metasiltstone

L₀-11-1, 凌云; L₀-77-2, 玉洪; L₀-82, 东兰

中三叠世地层在西林城北石炮剖面及田林县利周一河口剖面(图1-2)都出露较好。主要岩性是杂砂岩、粉砂岩、页岩夹泥质灰岩、白云岩,下部常有凝灰岩、薄层凝灰质砂岩。总体组成一套巨厚的深水—较深水的陆源碎屑浊积岩系(张锦泉和蒋廷操,1994;张继淹,1995),普遍具有鲍马序列(图版I-1),AE、ABCDE、BCDE、CDE组合常见,一个完整的鲍马序列层系厚2~4 m,最大厚度有8 m,单层块状砂岩厚可达2 m以上。发育枕状构造、包卷层理、方盘状石香肠及多种底模构造(图版I-2),以槽模和重荷模为主,槽模呈舌状、拉长状等各种形状,高1~3 cm,但高达4.5 cm者也会见到(百色平旺)。中三叠世岩层下部(T_2^1)与上部(T_2^2)为连续整合接触关系,两者相比,下部杂砂岩多,砂岩单层厚度大、砂/泥岩比值较高,岩屑及杂基含量大。但是,无论下部(T_2^1)和上部(T_2^2),都具有大量的粉砂岩、泥质粉砂岩和页岩,遭受极低级变质,发育透入性板劈理。

偏光显微镜观察,粉砂岩、泥质粉砂岩及页岩的原始沉积结构、构造保存尚好。主要碎屑成分为石英、斜长石、黑云母、白云母及碎屑状绿泥石-云母堆垛集合体(Chlorite-mica stacks)等,基质多为极细的粘土矿物或凝灰质-钙质、硅质等。可认矿物为伊利石、绢云母。岩石具平行原始层理(S_0)的初始劈理(S_0') (图版N-1)及斜交层理的板劈理(S_1) (图版N-2, 3)。因而,这些细粒的沉积碎屑岩,岩石学上应分别称为变粉砂岩、粉砂质板岩、板岩。从典型的板岩(L_0 -11-2, L_0 -77-1)全岩X射线粉晶衍射图谱(图1-3)及变粉砂岩(L_0 -11-1, L_0 -77-2, L_0 -82)全岩X射线粉晶衍射图谱(图1-4)可以看到,岩石主要矿物成分为石英(Q)、长石(An)、伊利石(白云母)(I)和绿泥石(C)。

侯方浩等(1984)、刘文均等(1993)深入地研究了右江盆地二叠纪和三叠纪的火山岩及火山碎屑岩的地球化学特征及构造环境,指出三叠纪玄武岩具岛弧型特征;火山岩分布受北西及北东向两组地壳断裂的直接控制。火山岩主要分布在大新一西大明山古隆起以南,古隆起北三叠纪浊流沉积岩系中夹的主要是火山碎屑岩(岩屑晶屑凝灰岩、凝灰质砂岩和凝灰质页岩等),这些均不是本次研究工作的主要对象。

三叠纪岩相古地理轮廓(方道年,1991)、晚二叠世合山组煤层上覆地层(主要为三叠系)厚度等值线图(吴江等,1993)、中三叠世岩层砂/泥岩比等值线图(张锦泉等,1994)、中三叠世安尼期浊积微相空间展布(杨成奎,1993)等,都反映出右江三叠纪陆源浊积岩盆地形状是近东西向延伸的,与其南侧的大新一西大明山隆起是同级、同方位伴生的隆拗构造,是整个右江盆地演化历程中分解而成的。盆地内部沉积厚度、岩相变化,受到基底断裂、物源和区域构造背景的制约。所以,沉积过程本身就是一个地球动力学过程。

第二章 极低级变质作用

一、极低级变质作用研究现状

按照 Frey(1987)的意见,所谓极(甚)低级变质作用(very low-grade metamorphism)是指由 Coombs(1961)和 Turner(1948,1968)所确定的变质作用最低级部分,止于 Winkler(1979)的绿片岩相或低级变质作用(low-grade metamorphism)开始。但是,对极低级变质作用的理解以及它与成岩作用(diagenesis)和低级变质作用之间界线的认识,学者之间存在重大分歧。Frey(1987)认为极低级变质作用包括晚期成岩作用(late diagenesis)和埋藏变质作用(burial metamorphism)。Weaver(1960)将低级变质作用划分为成岩作用、初始变质作用、初始-很弱变质作用、弱变质作用和变质作用五部分。Kubler(1967)利用板岩和页岩中伊利石结晶度(illite crystallinity)划分出成岩带(diagenetic zone)($t < 200^{\circ}\text{C}$)、浅层(近)变质带(anchizone)($t = 200 \sim 370^{\circ}\text{C}$)和浅变质带(epizone)($t > 370^{\circ}\text{C}$),并以此建立了低级变质作用尺度框架,其中浅层(近)变质带的下、上边界伊利石结晶度分别为 $0.42^{\circ} \triangle 2\theta$ 和 $0.25^{\circ} \triangle 2\theta$ 。许多地质工作者(Kisch,1991;Arkai,1991;Wang 等,1996)一般把极低级变质作用的范围与 Kubler 的浅层(近)变质带以及 Weaver 的初始变质作用(incipient metamorphism)等同看待、相互代用。但 Kubler(1967)明确指出,Weaver(1960)的初始变质作用、初始-很弱变质作用及弱变质作用均属于极低级变质作用。

埋藏变质作用一词最初由 Coombs(1961)提出,用来表示新西兰南岛中生代巨厚岩系(约 10 km 厚)的沸石相变质作用(zeolite-facies metamorphism)。Coombs 认识到与一般的区域变质作用不同,埋藏变质作用程度与岩层在地层柱中所处位置有关,缺少透入性构造。同时,埋藏变质作用与地热梯度降低有关,沉积厚度最大、沉积速度最快位置,地热梯度最小。Kisch(1983)指出埋藏变质作用构成成岩变质作用和变质作用的转换带,与初始变质作用同义。赵孟为(1995)对划分成岩变质作用与埋藏变质作用指标及界线进行了评述,认为埋藏变质作用是区域变质作用的一种类型,是衔接成岩作用和变质作用的桥梁。他总结出的划分成岩作用与埋藏变质作用的指标及其界线(表 2-1),具有重要参考价值。

还有其它与极低级变质作用相当或部分相当的术语,如深埋后生作用(catagenesis)、后生作用(epigenesis)、沉积变质作用(metagenesis)、后生成岩作用(epigenetic diagenesis)和次绿片岩相(sub-greenschist facies)变质作用等。石油地质学家、煤岩地质学家、矿床地质学家、沉积学及岩石学家等,还分别使用其它一些术语,来描述与极低级变质作用类同的地质-热事件。

作者的研究实践体会到,为了准确理解极低级变质作用概念,便于交流和使用,应当将与变质程度及变质成因相关的术语区别开来。例如,成岩变质—浅层(近)变质—浅变质是反映变质程度的序列,极低级变质作用狭义上与浅层(近)变质作用相当。在使用过

程中，我们将成岩作用的高级部分也包含在极低级变质作用之内（索书田，1995）。以伊利石结晶度为基础，不同类型变质作用（程度）界线及对应的变质温度如表 2-2 所示。埋藏变质作用属于变质成因术语序列，与 Coombs (1961) 最初对埋藏变质作用的理解，也有很大改变（Robinson，1987；Warr 等，1991）。

表 2-1 划分成岩作用与埋藏变质作用的指标及其界线

Table 2-1 Indicators and their limits dividing diagenesis and burial metamorphism																							
指 标	阶 段 划 分	成 岩 作 用										甚低级变质作用 (埋藏变质作用)				低级变质作用 (绿片岩相)							
		早 期		中 期				晚 期															
温度/℃		90~140		200				250~280				360											
		100		200				250				350											
镜质体反 射率/%		0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.6 2.8 3.0 3.2 3.4 3.6 3.8 4.0																					
煤 阶		泥炭	褐煤	长焰煤	气焰煤	气煤	肥 煤	焦 煤	瘦煤	无 烟 煤				变质无烟煤									
伊 利 石 结 晶	W. I.	<2.3										2.3				12.1							
	K. I. 2θ/(°)	>0.42										0.42				0.25							
	K. I. 2θ/(°)	>0.28										0.28				0.17							
油气生成带		未成熟		石 油		湿 气		干 气				过 成 熟											
泥 质 岩	———蒙脱石																						
	-----R=0 型 I/S 层																						
	-----R=1 型 I/S 层																						
	-----R=3 型 I/S 层																						
岩	-----伊利石																						
	-----高岭石																						
火 山 碎 屑 岩	-----浊沸石																						
	葡萄石-----																						
	-----绿纤石																						
	———片沸石																						
		———方沸石																					

(据赵孟为，1995)

表 2-2 划分低级变质作用的结晶度指数

Table 2-2 Illite crystallinity scales for low-grade metamorphism

变质作用		成岩作用	边界限	浅层变质作用	边界限	浅变质作用
变质相		沸石相		葡萄石-绿纤石相		绿片岩相
温度范围		<200℃		200~350℃		>350℃
伊 利 石 结 晶 度 指 数	K		0.400△°2θ		0.215△°2θ	
	Hb		278		149	
	W		5.1		14.6	
极低级变质作用		-----	-----	-----		

K—Kubler 指数；Hb—Weber 指数；W—Weaver 指数