

中国攀西裂谷文集

2

张云湘 刘秉光 主编

地质出版社

中国攀西裂谷文集

2

张云湘 刘秉光 主编

*

责任编辑：汪辑安

地质出版社出版

(北京西四)

妙峰山印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：12⁷/₈ 字数：304,000
1987年2月北京第一版·1987年2月北京第一次印刷
印数：1—1200册 国内定价：3.35元
统一书号：13038·新339

前 言

本文集系继“中国攀西裂谷文集第1辑”(1985)之后,全面概括与反映了攀西地区地质研究近年来的进展与成果。本书汇集了有关课题研究论文共18篇。主要内容有:前震旦纪变质岩系的岩石学、地层年代学以及变质作用诸方面的研究,对裂谷形成前的区域地质背景进行了分析论述。在广泛研究区域地质构造与新构造特征的基础上,论证了裂谷区地质构造格局的历史继承性、不同发展阶段的特殊性以及全区的构造演化历史;同时通过物理模拟与数学模拟的方法结合地球物理等方面研究资料,进一步从地球动力学探讨了裂谷形成、发展、衰亡的机理和历史演化过程。花岗岩类的研究、拉拉多金属矿成因的新认识以及层状基性岩体中晶体熔浆包裹体的实验研究,对于确立岩浆活动的温压条件和成因模式、矿产资源远景预测以及裂谷发育时期地质特点的深入了解提供了丰富的证据。大地热流测量和地温场的研究成果,反映了现代热场特征,同时提供了论证古裂谷的地热场信息并与世界若干典型古裂谷的基本特征进行了对比。古地磁的研究论证了裂谷发育阶段裂谷区磁极位置的变迁,对裂谷在其演化阶段的时空变化特点提供了可信的信息。

攀西地区的地质研究程度是较高的,近年来,又进行了较多的地球物理工作。通过多学科的和综合性的研究,开创了我国大陆古裂谷系统研究的先例,对于解决地学领域的一些理论问题和生产实际问题,相信会起到重要的推动作用。

本着有利于学术争鸣、推动科学发展的精神,本文集力求保持论文作者在文中的基本学术观点、研究结论以至科学术语、行文风格的原始特点。文集中出现的某些在观点上或结论上不完全一致之处,留待读者去分析判别。

由于编辑水平的有限和时间的仓促,无疑会使本文集存在一些不足与错误,诚恳寄希望于读者的批评指正。

目 录

1.四川盐边前寒武纪变质岩系的前进区域变质作用	张儒瑗、从柏林 (1)
2.川西地区早震旦世建造和大地构造演化	吴根耀 (15)
3.四川康定群变质作用特征	姜应星、张洪洲 (31)
4.攀西裂谷前震旦变质岩中一些变质反应不平衡的理论分析	蓝心俨 (45)
5.康滇地轴基底时代的初步轮廓	袁海华等 (51)
6.四川冕宁地区渡口杂岩热史的探讨	王松山等 (61)
7.攀西地区花岗岩类微量元素地球化学	陆德复、杨瑞瑛等 (66)
8.攀西拉拉多金属成矿带的地球化学特征及矿床成因探讨	余祖成、张元熙 (77)
9.攀西地区基性岩侵入体的晶质熔浆包裹体	张光弟、顾光先 (88)
10.攀西裂谷区域地质构造与构造演化	李兴唐、黄鼎成 (102)
11.攀西裂谷新构造特征	许学汉 (120)
12.试论攀西地区无根构造的成因	赵中岩等 (136)
13.大陆裂谷演化的动力学模型	韩贝传 (142)
14.攀西裂谷演化的数学模拟及其构造应力场和位移 场的分析	孙惠文、张菊明 (152)
15.攀西古大陆裂谷形成与演化的模拟实验研究	单家增等 (165)
16.攀西裂谷的三维地壳结构和裂谷演化的动力学 模型	赵永贵、张凡 (176)
17.攀西古裂谷大地热流	汪集旻、黄少鹏等 (185)
18.攀西及其邻区二叠纪晚期峨眉山玄武岩组的 古地磁学研究	刘椿等 (194)

CONTENTS

1. Progressive Regional Metamorphism of Precambrian Metamorphic Rock Series from Yanbian, Sichuan Province
.....Zhang Ruyuan and Cong Bolin (13)
2. Formation and Tectonic Evolution of West Sichuan During Earlier Sinian..... Wu Genyao (29)
3. The Characteristics of Regional Metamorphism and Migmatization of Kangding Group in Western Sichuan
.....Jiang Yingxing and Zhang Hongzhou (42)
4. Theoretical Analysis on Some Imbalanced Metamorphic Reactions in Panxi Pre-Sinian Metamorphic Assemblages.....Lan Xinyan (50)
5. The Preliminary Outline of the Age of "Kangdian Shield" Basement.....Yuan Haihua et al. (59)
6. The Study on Thermal History of Dukou Complex in Mianning Area, Sichuan Province, China.....Wang Songshan et al. (65)
7. Trace Element Geochemistry of Granitoid in Panxi Area
.....Lu Defu, Yang Ruiying et al. (75)
8. The Genesis and Geochemical Characteristics of Lala Mine
.....Yu Zucheng and Zhang Yuanxi (87)
9. The Crystalline Melt Inclusion in Basic Intrusive Bodies in Panzhuhua-Xichang Area.....Zhang Guangdi and Gu Guangxian (99)
10. Regional Tectonics of Panxi Rift and Its Evolution
.....Li Xingtang and Huang Dingcheng (118)
11. Neo-tectonic Characteristics of Panxi Rift.....Xu Xuchan (135)
12. Development of Rootless Structures in Panxi District
.....Zhao Zhongyan et al. (140)
13. The Dynamic Model of a Continental Rift and the Development History of Panxi Paleorift.....Han Beichuan (150)
14. Mathematical Simulation of the Evolution of Panxi Rift Zone and Analyses of Its Tectonic Stress and Displacement Fields.
.....Sun Huiwen and Zhang Juming (163)
15. Experimental Simulation of the Formation and Evolution of Pan-Xi Continental Rift.....Shan Jiazeng et al. (172)
16. Three-Dimensional Structure of the Crust Beneath Panxi Rift Zone and Dynamic Model of Development of the Rift.....

-Zhao Yonggui and Zhang Fan (184)
17. Terrestrial Heat Flow in Panzihua-Xichang Paleorift Zone,
Southwestern China.....Wang Jiyang, Huang Shaopeng et al. (193)
18. Paleomagnetism of Late-Permian Emeishan Basalts from Panxi
and Its Neighbouring Area.....Liu Chun et al. (200)

四川盐边前寒武纪变质岩系 的前进区域变质作用

张儒瑗 从柏林

(中国科学院地质研究所)

盐边位于渡口西北约40km处,在大地构造位置上属扬子断块西侧。本文着重讨论原盐边群的下段Pty¹,即从原“同德岩体”北界至田坝之间的结晶片岩系。对原盐边群中上部地层仅作一般性讨论。该套结晶片岩系,长春地质学院^①将其从原盐边群分出划入早元古代康定杂岩中段冷水箐组中。本文提供二个新的年龄数据(一由作者一由刘秉光提供),二个斜长角闪岩或黑云角闪片岩的Rb-Sr等时线年龄值分别为1033.4Ma[(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_{初始} = 0.70625, $r = 0.999$]和1044.6Ma[(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_{初始} = 0.70254, $r = 0.996$]。由于地球经过长期的壳-幔分异,我们假定研究区之下的地幔为亏损的地幔,并且Rb/Sr = 0.025,则距今1000Ma前,直接来源于该地幔源区的原始岩浆的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)初始值理论上应为0.70260 ± 0.00005。上述⁸⁷Sr/⁸⁶Sr初始值基本上落在该亏损地幔的Sr同位素演化线上,这表明上述年龄应为其生成年龄。故本文将该套地层定为晚中元古代。

关于岩石的命名,主要由长石、石英和云母组成的岩石原则上采用温克勒(Winkler, 1976)^[13]的命名方案。方案中的18区为片麻岩,但本区与18区相当的岩石矿物结晶粒度不够大,采用原命名(片麻岩)不合适,故改为片岩。主要由斜长石和角闪石组成的岩石采用Frantzsch(1967)^[6]的命名方案。

本文列出的矿物成分均为电子探针分析,全铁表示为<FeO>。对于石榴石的结构式以O₁₂为基础进行计算。对于白云母和角闪石分别以O₁₁和O₂₃进行计算。表中列出的Fe₂O₃和FeO含量的分配是按理想配比进行的。假设Fe³⁺的实际离子数为 x ,那么对于石榴石和白云母 x 分别为 $3R^+ - 2R^-$ 和 $3.143R^+ - 2R^-$ 。这里, R^+ 为实际阳离子总和, R^- 为换算前的实际阴离子总和。当 x 为负数时表示没有Fe³⁺,当 x 为正数时表示应有 x 个实际的Fe³⁺离子。 $Fe_2O_3 wt\% = 159.69x/2$ 。换算后的 $FeO wt\% = (\Sigma Fe - x) \times 71.85$ 。对于角闪石按下述原则进行,即除K, Na和Ca外,其余阳离子总和在结构式中等于13。假设Fe³⁺的实际阳离子数为 x ,那么 $x = 3.538R^+ - 2R^-$ 。这里 R^+ 表示(K + Na + Ca)除外的实际阳离子总和, R^- 为换算前的实际阴离子总和。同样, $Fe_2O_3 wt\% = 159.69x/2$ 。换算后的 $FeO wt\% = (\Sigma Fe - x) \times 71.85$ 。

本文使用的矿物缩写符号为: Pl, 斜长石。Mic, 微斜长石。Qz, 石英。Bi, 黑云母。Mu, 白云母。Chl, 绿泥石。Sta, 十字石。Gt, 石榴石。Sil, 矽线石。And, 红柱石。Ep, 绿帘石。Z, 黝帘石。Hb, 角闪石。Alm, 铁铝榴石。Kfs, 钾长石。

①据陈琦1984年资料。

一、结晶片岩系

研究表明,结晶片岩系的原岩是形成于岛弧环境的沉积岩和火山岩。多种恢复原岩的结果表明副变质岩的原岩主要是杂砂岩,长石质砂岩及含泥质胶结物的砂岩。少部分为钙质砂岩。正变质岩的原岩为非碱性玄武岩-安山岩-流纹岩系。玄武质岩石大多为橄榄拉斑玄武岩,个别为石英拉斑玄武岩和橄榄玄武岩。变镁铁质岩石在岩石化学上类似岛弧拉斑玄武岩系。原盐边群中上部为优地槽火山-沉积建造。

(一) 岩石组合和矿物分带

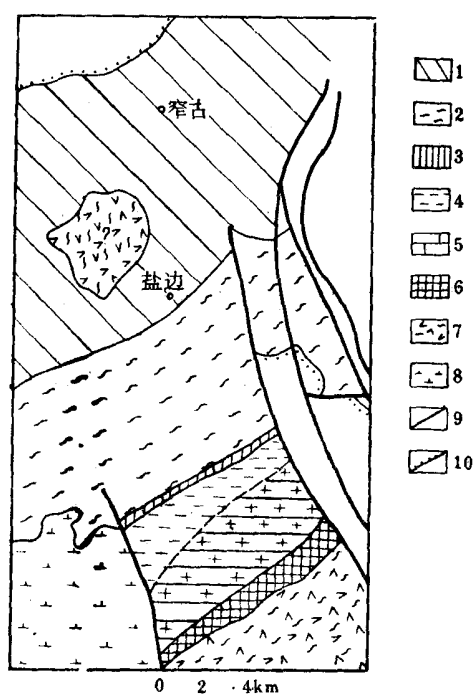


图 1 盐边前进区域变质作用分带

Fig. 1 Zones of progressive regional metamorphism in the Yanbian area

1. 很低级变质; 2. 绿片岩相; 3. 绿泥石带; 4. 石榴石带; 5. 十字石带; 6. 砂线石带; 7. 角闪岩相; 8. 冷水箐基性、超基性岩体; 9. 断层; 10. 不整合界线

由北向南,大致可分为四个岩性段。从上至下为: 1. 白云母和绿泥石长石石英片岩段。

主要岩石类型有白云母石英片岩,长石石英白云母片岩,绿泥石白云母片岩(原名为白云母绿泥石片麻岩),半片岩,碎裂化绿帘石长石石英变粒岩。岩石结构以鳞片花岗变晶结构为主,有时可见变余砂状结构,片状构造; 2. 二云母长石石英片岩段。主要岩石类型有二云母长石石英片岩,含石榴石或石榴石加十字石。白云母长石石英片岩,含石榴石。在此段岩石中夹有少量斜长角闪片岩; 3. 斜长角闪片岩夹石墨片岩段; 4. 黑云母石英片岩(有时含石榴石)夹黑云斜长角闪岩段。根据矿物组合和标型矿物的首次出现,可将此区的变泥砂质岩分为四个矿物带(图1)。

1. 绿泥石带。此带的特征是有原生绿泥石存在和无黑云母出现。主要岩石类型有白云母石英片岩,矿物组合为 $Mu + Qz \pm Chl + Ep$ 。白云母绿泥石片岩,矿物组合为 $Pl + MiC + Qz + Mu + Chl$ 。此带代表性岩石是表1中的 Y_{04} 和 Y_{08} 。

2. 石榴石带。以石榴石的首次出现为标志。主要岩石类型有长石石英二云母片岩,矿物组合为 $Pl + Qz + Bi + Mu \pm Gt \pm Ep$ 。黑云母长石石英片岩(原名为片麻岩)矿物组合为 $Pl + Qz + Bi + Gt$ 。白云母长石石英片岩,矿物组合为 $Fss(长石) + Gt + Mu + Qz$ 。相应的岩石有黑云母片岩($Bi + Hb + Qz + Pl$)和奥长角闪片岩。岩石常含有少量磁铁矿,磷灰石,榍石,偶有钛铁矿和碳酸盐矿物出现。岩石以鳞片花岗变晶结构为主,片状构造或条带状构造。

3. 十字石带。以十字石首次出现为标志。可能的反应是 $Chl + Mu + Alm \rightleftharpoons Sta + Bi + Qz + H_2O$ 。主要岩石类型为含石榴石和十字石的长石石英黑云母片岩(照片1),矿物组

合为 $Pl + Alm + Bi + Qz + Sta$ 。另外在此岩石中有极微量的白云母和绿泥石。一部分绿泥石交代黑云母，是次生的。也有微量未消耗完的原生绿泥石。二云母石英长石片岩，矿物组合为 $Pl + Qz + Bi \pm Mu \pm Alm$ 。与此相应的镁铁质岩石有中长石角闪岩，矿物组合为 $Pl + Hb \pm Bi$ 。

4 矽线石带。矽线石在该带分布不均。主要岩石类型有矽线石二云母石英片岩和含矽线石的石榴石黑云母片岩。前者矿物组合为 $Si1 + Alm + Mu + Qz$ 。在后一种岩石中存在两个共生组合（照片 2、3）。A 组， $Pl + Bi + Alm + Qz \pm Mu$ ；B 组， $Pl + Si1 + Qz + And$ 。与此带相应的变镁铁质岩石是中长石角闪岩，矿物组合为 $Pl + Hb + Bi + Qz$ 。

（二）、矿物化学及有关特征

1 绿泥石。除绿泥石带外，其他矿物带也有微量分布。绿泥石带中的绿泥石呈叶片状沿片理面分布。淡绿色，且具多色性，浅绿—浅黄。化学成分见表 1。石榴石带的绿泥石零星分布，具明显的多色性，绿色至亮黄。十字石带绿泥石为淡黄绿色，微显多色性。有的呈不规则状交代黑云母，有的为叶片状或叶片束状。矽线石带中偶尔也可见极微量的绿泥石，颜色极浅，多色性不明显。随变质温度的升高，绿泥石中的叶蛇纹石含量 P （Miyashiro 和 Shido, 1985）逐渐减小，从绿泥石带至矽线石带 P 值从 0.57 降至 0.32。

2 白云母。白云母在各个矿物带均存在，但在十字石和矽线石带中很少。Guidotti 和 Sassi (1976) 指出在 $Mu + Pl$ 组合中白云母的 $Na/(Na + K)$ 是变质级的函数。在低级和中级变质岩中，随 T 增加，白云母变得更富 Na 。各带白云母的 $Na/(Na + K)$ 列于表 2。从此表可以看出，除绿泥石带以外，随变质温度增加，从石榴石带到矽线石带，白云母的 $Na/(Na + K)$ 值逐渐增大。绿泥石带白云母的该比值为何比石榴石带的白云母高，其原因不甚清楚，也许和原岩成分有关。另外，矽线石带、十字石带较石榴石带有低得多的 ΣFeO 和高得多的 Al_2O_3 （图 2）。各矿物带的白云母分别落在绿泥石、黑云母和铁铝榴石带域以及十字石和矽线石带域内。随变质作用的增强，白云母中的绿磷石含量 t 逐渐减小，从绿泥石带的 0.15 减到矽线石带的 0.02。

3 黑云母。除绿泥石带外各带均有，其化学成分见表 1。在变泥砂质岩石中，黑云母的颜色随变质程度加深由茶色、茶褐色变为红褐色。 TiO_2 1.40—2.63%，据其化学成分大致属铁质黑云母。此外，在某些斜长角闪片岩中也有少量黑云母， TiO_2 为 1.8%±。

4 石榴石。除绿泥石带外其余各带均有。化学成分见表 1。在刚进入石榴石带时，石榴石呈不规则状，和周围矿物未达到化学平衡，尚未形成晶形完美的变晶（照片 4）。 MnO 含量高（表 3）。在上部石榴石带和其他变质级更高的带中，石榴石多为圆粒状（照片 5）。 MnO 含量随前进变质作用而降低。除 G₂-7 以锰铝榴石端员组分占优势外，其余石榴石均以铁铝

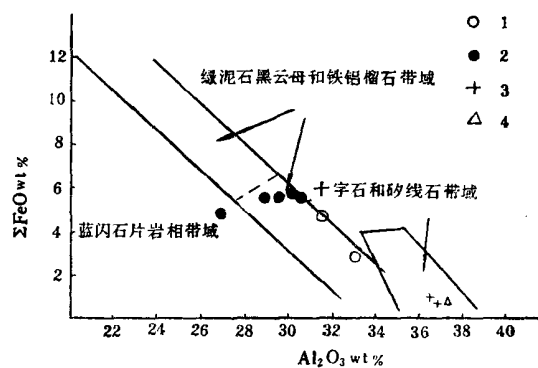


图 2 变泥质岩白云母的成分

〔据 Miyashiro (1973) 原图 7B-2 简化〕

Fig. 2 Composition of muscovite from metapelites

1. 绿泥石带； 2. 石榴石带； 3 十字石带； 4. 矽线石带

表 1 矿物的电子探针分析

Table 1 Microprobe analyses of minerals

样品号	Y04		Y06		G12-7										G12-11			
	白云母石英片岩		长石石英白云母片岩		Or	Ab	Or	Mu	Mu	Gt	Bi	Chl	Chl		二 云 母 变 粒 岩			
	Mu	Chl	Ab	Mu														
SiO ₂	47.43	30.25	67.20	45.89	45.20	65.92	65.34	67.61	64.99	47.11	46.07	37.26	34.66	25.19	26.06	65.96	37.03	48.38
TiO ₂	0.02	0.01	0.06	0.72	0.41	0.02	0.00	0.00	0.00	0.58	0.58	0.06	2.08	0.02	0.04	0.01	1.72	1.53
Al ₂ O ₃	33.02	18.07	21.07	31.47	31.48	18.95	19.18	19.98	19.23	30.69	29.47	20.68	16.39	19.71	19.73	19.75	16.64	27.03
Cr ₂ O ₃	0.00	0.03	0.03	0.01	0.24	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.65	0.11	0.02	0.02	0.41
Fe ₂ O ₃	0.59			0.50						2.74	3.78	0.45						
FeO	2.38	16.80	0.00	4.40	5.18	0.01	0.00	0.00	0.06	3.25	2.08	12.12	17.93	23.39	23.98	0.02	16.23	4.77
MnO	0.03	0.37	0.01	0.03	0.10	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.08	19.52	0.41	0.64	0.67	0.05	0.48	0.06
MgO	1.79	18.53	0.04	1.28	1.83	0.04	0.02	0.03	0.04	1.89	1.39	1.47	11.06	15.03	15.32	0.04	13.54	2.23
CaO	0.02	0.07	0.24	0.03	0.02	0.02	0.00	0.57	0.00	0.03	0.02	7.66	0.01	0.23	0.03	0.00	0.01	0.00
Na ₂ O	0.43	0.03	11.95	0.28	0.13	0.64	0.49	12.26	0.74	0.25	0.28	0.05	0.12	0.14	0.11	0.07	0.11	0.23
K ₂ O	10.20	0.83	0.06	9.81	5.68	15.66	14.81	0.05	14.94	10.18	10.56	0.00	9.73	0.09	0.07	14.54	9.22	10.31
总 计	95.91	84.99	100.66	94.42	90.27	101.36	99.84	100.52	99.10	96.94	94.35	99.27	92.42	85.29	86.12	100.46	95.00	94.95

Si	3.151	6.269	2.926	3.131	3.150	2.993	2.995	2.954	2.992	3.139	3.161	3.005	2.731	5.459	5.578	2.993	2.785	3.295
Ti	0.001	0.002	0.002	0.037	0.021	0.001	0.000	0.000	0.000	0.029	0.030	0.004	0.123	0.003	0.006	0.000	0.097	0.078
Al	2.586	4.413	1.081	2.530	2.585	1.014	1.036	1.029	1.043	2.425	2.383	1.966	1.522	5.034	4.977	1.056	1.475	2.170
Cr	0.000	0.005	0.001	0.001	0.013	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.146	0.019	0.001	0.001	0.022
Fe ³⁺	0.029			0.026						0.137	0.195	0.027						
Fe ²⁺	0.132	2.911	0.000	0.251	0.302	0.000	0.000	0.000	0.002	0.181	0.119	0.817	1.181	4.239	4.292	0.001	1.021	0.272
Mn	0.002	0.065	0.000	0.002	0.006	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.005	1.333	0.027	0.117	0.121	0.002	0.031	0.003
Mg	0.177	5.724	0.003	0.130	0.190	0.003	0.001	0.002	0.003	0.188	0.142	0.177	1.299	4.855	4.887	0.003	1.518	0.226
Ca	0.001	0.016	0.011	0.002	0.001	0.001	0.000	0.027	0.000	0.002	0.001	0.662	0.001	0.053	0.007	0.000	0.001	0.000
Na	0.055	0.012	1.009	0.037	0.018	0.056	0.044	1.038	0.066	0.032	0.037	0.008	0.018	0.059	0.046	0.006	0.016	0.030
K	0.864	0.219	0.003	0.854	0.505	0.907	0.866	0.003	0.825	0.865	0.924	0.000	0.978	0.025	0.019	0.841	0.885	0.896
合 计	7.000	19.636	5.037	7.000	6.791	4.979	4.942	5.053	4.931	7.000	7.000	7.999	7.882	19.990	19.951	4.903	7.830	6.993

续表 1

样品号	LG2-6			Y13-2			Y16		Y25		K-27				
	石英片岩			石榴石长石英二云母片岩			奥长角闪片岩		钠长角闪片岩		二云母石英长石片岩				
	Bi	Mu	Mu	Pl	Bi	Mu	Pl	Amph	Amph	Ab	Amph	Pl	Pl	Mu	Bi
SiO ₂	36.81	47.97	46.72	66.71	35.67	46.41	62.05	48.65	47.27	66.87	45.63	57.62	58.49	45.97	34.10
TiO ₂	1.89	0.90	0.72	0.00	2.63	0.69	0.03	0.24	0.35	0.00	0.82	0.00	0.00	1.13	1.60
Al ₂ O ₃	16.78	31.94	29.82	19.69	15.67	30.56	23.57	10.18	10.24	21.01	11.04	26.86	25.95	36.78	20.48
Cr ₂ O ₃	0.12	0.00	0.01	0.10	0.00	0.35	0.03	0.01	0.03	0.13	0.08	0.00	0.00	0.05	0.40
Fe ₂ O ₃						1.70	10.88	8.43		4.24					
FeO	21.48	5.27	5.54	0.13	22.71	3.91	0.16	1.28	3.18	0.25	12.55	0.08	0.08	0.84	18.07
MnO	0.48	0.00	0.03	0.01	0.61	0.03	0.00	0.23	0.20	0.04	0.24	0.00	0.00	0.03	0.21
MgO	10.51	1.19	1.16	0.03	8.30	1.44	0.04	15.70	15.46	0.04	10.38	0.04	0.05	0.74	12.08
CaO	0.00	0.01	0.02	1.29	0.02	0.03	4.17	10.35	10.77	0.39	11.64	6.64	6.41	0.03	1.18
Na ₂ O	0.11	0.24	0.24	10.85	0.12	0.27	8.91	2.01	2.35	10.79	1.30	7.98	8.18	0.34	0.14
K ₂ O	9.29	10.26	9.88	0.11	9.83	10.05	0.03	0.14	0.09	0.07	0.14	0.00	0.12	9.48	6.06
总计	97.47	97.78	94.14	98.92	95.56	95.44	98.99	99.67	98.37	99.59	98.06	99.22	99.28	95.39	94.32

Si	2.767	3.165	3.208	2.957	2.777	3.144	2.771	6.752	6.893	2.935	6.690	2.594	2.631	3.029	2.572
Ti	0.107	0.045	0.037	0.000	0.154	0.035	0.001	0.025	0.037	0.000	0.090	0.000	0.000	0.056	0.091
Al	1.487	2.483	2.413	1.029	1.438	2.440	1.240	1.865	1.709	1.087	1.908	1.425	1.376	2.856	1.875
Cr	0.007	0.000	0.001	0.004	0.000	0.019	0.001	0.001	0.003	0.005	0.009	0.000	0.000	0.003	0.024
Fe ³⁺						0.087	1.134	0.896			0.467				
Fe ²⁺	1.350	0.291	0.318	0.005	1.479	0.222	0.006	0.149	0.376	0.009	1.539	0.003	0.003	0.046	1.116
Mn	0.031	0.000	0.002	0.000	0.040	0.002	0.000	0.027	0.024	0.001	0.030	0.000	0.000	0.002	0.013
Mg	1.178	0.117	0.119	0.002	0.963	0.145	0.003	3.248	3.262	0.003	2.268	0.003	0.003	0.073	1.358
Ca	0.000	0.001	0.001	0.061	0.002	0.002	0.199	1.539	1.634	0.018	1.828	0.320	0.309	0.002	0.095
Na	0.016	0.031	0.032	0.932	0.018	0.035	0.771	0.541	0.645	0.918	0.370	0.696	0.713	0.043	0.020
K	0.891	0.863	0.865	0.006	0.976	0.869	0.002	0.025	0.016	0.004	0.026	0.000	0.007	0.797	0.583
合计	7.833	6.996	6.996	4.996	7.847	7.000	4.994	15.105	15.296	4.980	15.225	5.042	5.042	6.906	7.717

续表 1

样品号	Gj2-3											K-31			
	十字石二云母长石英片岩											石榴石长石黑云母片岩			
	P1	Bi	Mu	Gt	Sta	Chl	P1	Bi	P1	Bi	Gt	P1	Bi	Gt	
SiO ₂	60.46	56.64	37.71	36.33	47.99	38.50	27.25	25.82	59.06	58.26	36.01	36.38	35.92	36.45	36.45
TiO ₂	0.0	0.0	1.60	1.40	0.22	0.02	0.34	0.04	0.0	0.0	1.70	1.45	0.06	0.04	0.08
Al ₂ O ₃	25.05	27.22	20.89	20.43	36.43	20.54	55.37	21.84	26.27	26.45	20.84	20.77	22.52	22.25	21.26
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0	0.08	0.00	0.11	0.00	0.03	0.09	0.0	0.00	0.09	0.12	0.00	0.05	0.07
Fe ₂ O ₃															
FeO	0.07	0.31	14.94	17.89	1.00	31.82	11.82	21.30	0.00	0.00	15.71	15.71	29.02	29.97	29.28
MnO	0.01	0.02	0.07	0.06	0.03	5.12	0.24	0.16	0.00	0.00	0.14	0.11	6.15	5.21	6.28
MgO	0.05	0.08	11.41	10.98	0.72	3.39	1.68	17.39	0.03	0.03	11.17	11.20	3.53	3.70	3.48
CaO	6.54	8.95	0.03	0.01	0.02	2.04	0.02	0.04	6.41	6.68	0.02	0.02	0.97	1.21	1.28
Na ₂ O	7.43	6.91	0.16	0.12	1.12	0.04	0.01	0.04	8.49	8.29	0.31	0.33	0.05	0.05	0.04
K ₂ O	006	0.64	8.87	8.88	9.73	0.01	0.01	0.05	0.05	0.08	9.07	9.02	0.00	0.00	0.00
总计	99.67	100.47	95.76	96.10	97.37	101.48	96.77	86.77	100.31	99.82	95.06	95.11	99.29	100.42	99.64

Si	2.693	2.544	2.761	2.699	3.104	3.048	1.975	5.379	2.629	2.610	2.685	2.707	2.897	2.909	2.942
Ti	0.000	0.000	0.088	0.078	0.011	0.001	0.019	0.006	0.000	0.000	0.095	0.081	0.004	0.002	0.005
Al	1.315	1.441	1.802	1.789	2.777	1.916	4.730	5.362	1.378	1.396	1.831	1.822	2.141	2.093	2.022
Cr	0.000	0.000	0.005	0.000	0.006	0.000	0.002	0.015	0.000	0.000	0.005	0.007	0.000	0.003	0.004
Fe ³⁺	0.000	0.000													
Fe ²⁺	0.003	0.012	0.915	1.111	0.054	2.107	0.716	3.711	0.000	0.001	0.979	0.978	0.065	0.089	0.085
Mn	0.000	0.001	0.004	0.004	0.002	0.343	0.015	0.028	0.000	0.000	0.009	0.007	0.420	0.352	0.429
Mg	0.003	0.005	1.245	1.216	0.069	0.400	0.181	5.400	0.002	0.002	1.241	1.242	0.424	0.440	0.419
Ca	0.312	0.431	0.002	0.001	0.001	0.173	0.002	0.009	0.306	0.321	0.002	0.002	0.084	0.103	0.111
Na	0.842	0.602	0.023	0.017	0.140	0.006	0.001	0.016	0.733	0.720	0.045	0.048	0.008	0.008	0.006
K	0.003	0.002	0.808	0.842	0.803	0.001	0.001	0.013	0.003	0.005	0.863	0.856	0.000	0.000	0.000
合计	4.972	5.037	7.673	7.757	6.966	7.996	7.642	19.940	5.050	5.054	7.755	7.749	8.000	8.000	8.000

续表1

样品号		K-31					Y29					K-36					LG6-2				
岩石		长石云母片岩					黑云母片岩					黑云斜长角闪岩					斜长角闪岩				
矿物		Mu	And	Chl	Ab	Or	Bi	Bi	Amph	Pl	Bi	Amph	Amph	Amph	Bi	Cpx					
SiO ₂		40.13	36.00	25.86	67.83	64.34	37.96	37.29	50.16	56.65	37.46	46.55	40.19	41.30	37.38	51.72					
TiO ₃		0.81	0.02	0.04	0.00	0.00	1.56	0.45	0.26	0.00	1.73	0.56	1.05	1.03	1.81	0.20					
Al ₂ O ₃		37.18	68.12	23.52	20.44	18.63	16.71	19.80	0.52	27.97	17.67	10.19	13.13	12.69	16.61	1.87					
Cr ₂ O ₃		0.05	0.03	0.02	0.05	0.02	0.26	0.87	0.11	0.03	0.00	0.01	0.10	0.06	0.00	0.03					
Fe ₂ O ₃		0.00	0.00	0.00					3.40			8.78	3.33	6.08							
FeO		0.81	0.33	21.66	0.21	0.10	15.64	13.80	9.31	0.08	17.94	7.74	13.45	10.52	16.81	9.04					
MnO		0.00	0.00	0.23	0.00	0.03	0.28	0.24	0.56	0.01	0.13	0.33	0.49	0.51	0.28	0.63					
MgO		0.63	0.11	17.31	0.02	0.03	12.78	12.96	13.92	0.06	11.94	11.83	9.40	9.81	12.83	11.21					
CaO		0.03	0.02	0.01	0.41	0.02	0.07	0.05	11.68	0.46	0.02	10.91	11.78	12.02	0.03	24.06					
Na ₂ O		1.32	0.02	0.01	11.52	0.81	0.20	0.66	0.67	5.62	0.15	1.14	1.80	1.69	0.14	0.56					
K ₂ O		9.10	0.01	0.00	0.05	14.50	8.65	8.62	0.46	0.04	8.24	0.23	1.22	1.11	10.13	0.01					
总 计		96.06	100.56	88.66	100.53	98.48	94.11	94.74	97.05	99.92	95.28	98.42	95.94	96.82	96.02	99.33					

Si	3.021	0.992	5.266	2.954	2.995	2.855	2.761	7.271	2.538	2.801	6.729	6.168	6.226	2.799	1.956
Ti	0.040	0.000	0.006	0.000	0.000	0.088	0.025	0.028	0.000	0.097	0.061	0.121	0.117	0.102	0.006
Al	2.869	2.000	5.044	1.049	1.022	1.481	1.728	1.114	1.477	1.557	1.732	2.375	2.254	1.466	0.083
Cr	0.003	0.001	0.003	0.002	0.001	0.015	0.051	0.013	0.001	0.000	0.001	0.012	0.007	0.000	0.001
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000					0.370			0.951	0.384	0.688		0.034
Fe ²⁺	0.044	0.007	3.638	0.008	0.001	0.984	0.885	1.129	0.003	1.122	0.934	1.726	1.326	1.053	0.252
Mn	0.000	0.000	0.040	0.000	0.001	0.018	0.015	0.069	0.000	0.008	0.040	0.064	0.065	0.018	0.020
Mg	0.051	0.004	5.253	0.001	0.002	1.433	1.430	3.003	0.004	1.331	2.554	2.150	2.204	1.432	0.632
Ca	0.002	0.001	0.002	0.010	0.001	0.006	0.004	1.814	0.454	0.002	1.686	1.937	1.941	0.002	0.975
Na	0.168	0.001	0.001	0.973	0.073	0.029	0.095	0.138	0.488	0.022	0.319	8.536	0.494	0.020	0.041
K	0.760	0.000	0.000	0.003	0.861	0.830	0.814	0.085	0.002	0.786	0.042	0.239	0.213	0.968	0.000
合 计	6.968	3.007	19.906	5.003	4.960	7.738	7.779	15.089	4.968	7.726	15.049	15.712	15.536	7.860	4.000

表 2 各矿物带白云母的某些参数

Table 2 Some parameters of muscovites from various mineral zones

矿物带	绿 泥 石 带		石 榴 石 带				十 字 石 带		砂 线 石 带
样品号	Y04	Y06	Gj2-11	Gj2-7	LG2-6	Y13-2	K27	Gj2-3	K-31
Na/(Na+K)	0.059	0.041	0.032	0.035 0.038	0.035	0.038	0.051	0.148	0.182
ΣFeO	2.91	4.85	4.77	5.71 5.48	5.54	5.44	0.84	1.00	0.81
Al_2O_3	33.02	31.47	27.03	30.69 29.47	29.82	30.56	36.78	36.43	37.18

石榴石端员组分居首位，可命名为铁铝榴石。

5. 斜长石。它是变泥质岩和变基性岩的主要组成之一。化学成分见表 1。斜长石的 An 与变质级有关。绿泥石带，斜长石为钠长石 (An_{1.1})。石榴石带的斜长石仍为钠长石 (An_{2.5}—6.1)。十字石带和砂线石带的斜长石分别是 An_{30.6}—41.6 和 An_{30.7}。在变基性岩中可分出钠长角闪片岩，奥长角闪片岩和中长角闪片岩。它们的斜长石分别为 An_{1.9}，An_{20.5} 和 An_{48.1}。从上述成分变化来看，在该区中、低级变质作用中，斜长石的成分存在着间断。即 An₇—20，An₂₁—30。关于这种间断也得到其他学者的证实。比如 Crawford (1966)^[3]，Cooper (1972)^[2] 确认低级变质岩中存在 An₃—25 的晕长石间隔。Wenk, E 和 Wenk, H.R (1977)^[14] 指出在中阿尔卑斯下部角闪岩相泥质岩、角闪岩和钙质岩石中缺乏 An₀—20 的斜长石以及存在 An₂₅—28，48—62，75—85 的成分间隔。

表 3 石榴石的 MnO 含量和端员组分

Table 3 MnO wt% and endmember molecules% of garnets

矿物带	样品号	MnO	钙铁榴石	镁铝榴石	锰铝榴石	钙铝榴石	铁铝榴石	铁榴石
砂线石	K-31	5.2—6.3	3.0—3.8	14.3—15.1	12.1—15.6	0.3—0.7	67—69.7	/
十字石	Gj2-3	5.12	/	13.5	11.6	5.8	66.1	3
石榴石	Y13-2	17.39	3.9	6.7	41.2	3.8	43.6	0.8
	Gj2-7	19.52	1.4	5.9	44.6	20.8	27.3	/

6. 角闪石。角闪石主要赋存在斜长角闪片岩和斜长角闪岩中，化学成分见表 1。如上所述。根据斜长石的成分可分为钠长、奥长和中长角闪片岩。角闪石多色性明显，蓝绿—黄绿。黑云母片岩中的角闪石 (Y₂₉)，绿至亮黄。与钠长石和中长石共生的角闪石是镁质普通角闪石。与奥长石共生的是浅闪质普通角闪石。在 K+Na 对 Ti 的变异图上 (图 3) 除 Y₂₉ (阳起石质普通角闪石) 位于上部绿片岩相处，Y₂₅，Y₂₆，Y₃₆ 均位于角闪岩相区，而 LG6—2 位于角闪岩相和麻粒岩相的交界区。

综上所述，可把盐边结晶片岩系矿物的前进变化归纳于图 4 中。

(三) 变质相和变质作用的 P - T 条件

变质相的概念最早是由艾斯科拉 (1920, 1939) [4.5] 提出来的。本文原则上采用他的方案。在变基性岩中, 绿片岩相的典型组合为绿泥石 $\pm$ 阳起石 + 绿帘石 + 钠长石 $\pm$ 石英。相应的变泥质岩也属此相。绿帘石角闪岩相, 在变基性岩中常见的组合是钠长石 + 绿帘石 + 普通角闪石。有时奥长石可取代钠长石, 石英可加入此组合 (Miyashiro, 1973)。角闪岩相在变基性岩中显示中长石 + 普通角闪石的组合。艾斯科拉 (Eskola, 1939) [5] 用奥长石—中长石代替钠长石的首次出现来定义角闪岩相的开始。而温克勒 (Winkler, 1976) [13] 使用白云母和石英存在时硬绿泥石和贫镁绿泥石的消失以及在变泥质岩和变质硬砂岩中十字石和堇青石的首次出现来定义角闪岩相的开始。本文将综合考虑上述标准。

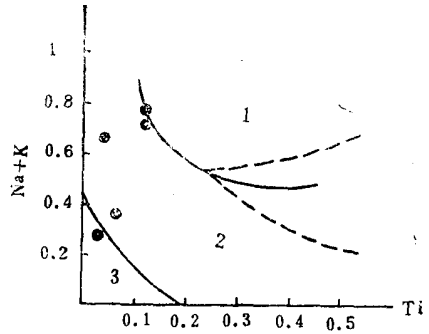


图 3 角闪石 $Na+K$ 对 Ti 变异图
(据 Закрытин, 1968) [15]

Fig.3 Plot of $Na+K$ versus Ti for amphibolite
1. 麻粒岩相; 2. 角闪岩相和绿帘石角闪岩相; 3. 绿片岩相

	变质相	绿片岩相	绿帘石— 角闪岩相	角闪岩相	
	矿物分带	绿泥石	石榴石	十字石	矽线石
变 泥 质 岩	绿泥石	——	——		
	白云母	——			
	黑云母		——		
	绿帘石	——	——		
	铁铝榴石		——		
	十字石			——	
	矽线石				——
	红柱石				——
	钠长石	——	——		
	奥长石		——	——	
	中长石			——	——
	钾长石		——	——	——
变 基 性 岩	石英	——			
	钠长石	——	——		
	奥长石		——	——	
	中长石			——	——
	绿帘石	——	——		
	阳起石	——	——		
	普通角闪石		——	——	——
	黑云母		——		
岩	榍石		——		
	单斜辉石				——

图 4 盐边地区前进矿物变化

Fig.4 Progressive mineral changes in the Yanbian area

据上述准则，绿泥石带属绿片岩相。此带很窄。石榴石带中的变基性岩，其矿物组合为钠长石（有时为奥长石）+ 镁质普通角闪石 + 榍石 + 磁铁矿。变砂泥质岩的代表性组合为： $Pl + Bi + Mu + Alm + Qz \pm Eq$ 。可划为绿帘石角闪岩相。由于十字石的出现是岩石进入角闪岩相的标志，故属角闪岩相。此带中的斜长石为中长石。矿物组合为 $Pl + Bi \pm Mu + Sta + Alm + Qz$ 。

绿片岩相的温度，可用绿泥石和白云母平衡结晶的温度来代表，用 Kоров (1975)^[16] 的方法测定，为 $400^{\circ}\text{C} \pm$ ，白云母的平均 b_0 值（5 个样）为 9.016，暗示了中低压的趋势。绿帘石角闪岩相的变质温度可用斜长石 - 角闪石以及黑云母和石榴石的平衡温度来估算，估算结果见表 4 与表 5。斜长石和角闪石平衡温度为 $470\text{—}527^{\circ}\text{C}$ ，石榴石和黑云母平衡温度为 $500^{\circ}\text{C} \pm$ 。角闪岩相的变质温度仅从有限的资料获得。十字石带里的一对石榴石和黑云母的平衡温度为 520°C 。十字石是在石榴石带之后出现的，加上前述绿帘石角闪岩相斜长石和角闪石的平衡温度可达 527°C ，因此十字石出现的温度要更高些。由于在十字石带存在着 $Gt + Chl + Mu \rightleftharpoons Sta + Bi + Qz$ 的反应，根据 Hess (1969)^[8] 十字石 - 堇青石组合的岩石成因格子的 P-T 图解，相对于上述反应的单变曲线，与 $560\text{—}575^{\circ}\text{C}$ 相对应的压力为 $3.3\text{—}5 \times 10^8 \text{Pa}$ 。矽线石带无疑是在更高的温度下形成的。众所周知，铝硅酸盐三相不变点的温度为 620°C 左右，矽线石在高温侧出现，因此其形成温度必定大于 620°C 。由于与矽线石共存的是低压变质带的特征矿物红柱石而非蓝晶石，因此它们形成的压力

表 4 斜长石和角闪石的平衡温度（据 Spear, 1980 方法）^[12]
Table 4 Equilibrium temperature of plagioclase and amphibole

变 质 相	绿 帘 石 角 闪 岩 相			角 闪 岩 相
样 品 号	Y ₁₆	Y ₂₅	Y ₂₉	K-36
$\ln(X_{Ab}/Y_{An})_{Pl}$	-1.352	-3.930	-3.941	-0.072
$\ln(Ca, M_4/Na, M_4)_{Hb}$	1.205	2.363	2.777	1.680
T ^{°C}	527	470	475	720

表 5 黑云母和石榴石的平衡温度（据 Перчук 1967 方法）^[17]

Table 5 Equilibrium temperature of biolite and garnet

矿 物 带	石 榴 石 带	十 字 石 带	矽 线 石 带
样 品 号	Y ₁₈₋₂	Gj ₂₋₃	K-31
$\frac{Mg}{(Mg + Fe + Mn)}_{Gt}$	0.072	0.140	0.152
$\frac{Mg}{(Mg + Fe + Mn)}_{Bi}$	0.484	0.669	0.534
T ^{°C}	500	520	560

小于 $5 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。另外，此带中的斜长角闪岩，其斜长石和角闪石的平衡温度为 720°C 。

二、盐边群浅变质岩系

盐边群主要出露于磨盘山断裂以西，金河-箐河断裂之东南。从田坝向北延伸到新坪。为典型的优地槽岩石组合。除下部发育玄武质枕状熔岩外，主要为一套由浊流沉积的复理石建造，总厚达5 000余米（李继亮，1984）^{〔1〕}。据王平的资料，从下至上可分为五个组，即田坝组、荒田组、渔门组、小坪组和榨古组。田坝组由砂板岩夹绿片岩和变辉长岩组成。荒田组下部由绿片岩，硅质板岩和千枚岩组成。上部为变玄武岩夹硅质板岩和凝灰质板岩。渔门组为深灰色砂板岩，粉砂岩。小坪组下部为细砂岩，砂岩，黄色—灰绿色砂质泥岩，上部砂岩和砂质板岩互层。榨古组由含砾砂岩，粉砂岩和青灰色粉砂质泥板岩，复成分砾岩组成。

盐边群变质程度很低，重结晶程度差。板理、劈理发育，以区域动力变质作用为主。总体上由南向北变质程度愈来愈弱。盐边群下部的变基性岩中出现了典型的绿片岩相矿物组合，即绿泥石+阳起石+绿帘石+钠长石组合。另外在绢云母石英片岩（千枚岩）中有下列矿物组合：白云母+石英+黝帘石+黑云母（微量）。重结晶较好，石英颗粒边界平直（照片6）。黝帘石的出现标志着变质作用已进入低级变质作用，因此盐边群的下部可划为下部绿片岩相。盐边群中部，岩石具有丝绢光泽，在岩石中已出现定向排列的绢云母和绿泥石。盐边群上部变质更浅，甚至有未重结晶的带存在。因此盐边群中上部仅经历过很低级的变质作用。

盐边群变质作用的 P - T 条件只能大致估测。如上所述，除少部分达绿片岩相外，大多只经历过很低级的变质作用。根据有关的相图表明（Winkler, 1976, 原图7-1）^{〔13〕}，在 $5 \times 10^8 \text{ Pa}$ 下，绿片岩相的温度范围为 340 — 550°C ，即 400°C 左右。很低级变质作用约为 250°C 左右。关于压力的估测，只能从白云母 b_0 值的测定获得一些信息。这种方法的前提是假设钾质白云母的成分主要受温度、压力和总成分的影响，如果研究等热和等化学的变质岩，那么 b_0 值的差异就可能与不同的压力有关（Sassi和Scolari, 1974）^{〔11〕}。盐边群仅测了6个白云母的 b_0 值，范围 8.993 — 9.034 ，平均 9.021 ， $s = 0.014$ 。其平均值和中压型（ 9.020 — 9.025 ）相同，但测定的样品数量太少，准确的结论有待今后进一步研究。

综上所述 可得出以下几点结论。原盐边群下部为结晶片岩系。副变质岩的原岩为砂岩、杂砂岩和泥质砂岩。正变质岩的原岩为岛弧拉斑玄武岩。生成时代为晚中元古代。与原盐边群中上部浅变质岩系为断层接触。浅变质岩系的原岩为拉斑玄武岩和复理石沉积。生成时代为晚元古代；盐边变质地体是一个典型的前进变质作用地体。由北向南，从下部绿片岩相变为上部角闪岩相。变泥砂质岩石的矿物分带十分明显，从绿泥石带、石榴石带经十字石带到矽线石带。矿物化学成分随变质温度增加而有规律的变化。变基性岩同样显示了矿物分带和前进变化。即从钠长石角闪岩经奥长石角闪岩到中长石角闪岩；以绿泥石带、石榴石带、十字石带和矽线石带为序，各带的变质温度约为 $400^\circ\text{C} \pm 500^\circ\text{C} \pm 30$ ， 560°C 左右， 630 — 720°C 。浅变质岩系可能属中压型变质作用，结晶片岩系为中低压型变质作用。

本文列出的矿物探针分析数据由我所韩秀伶和李家驹同志测定，白云母 b_0 值由张振禹