

田振东,冷成彪,张兴春,等. 青藏高原义敦岩浆弧前寒武系变质岩绿泥石矿物学特征及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(1):36-48.

TIAN Zhen-dong, LENG Cheng-biao, ZHANG Xing-chun, et al. Mineralogical Characteristics of Chlorites from Precambrian Metamorphic Rocks in Yidun Magmatic Arc of Qinghai-Tibet Plateau and Their Geological Implications[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(1):36-48.

青藏高原义敦岩浆弧前寒武系变质岩 绿泥石矿物学特征及其地质意义

田振东^{1,2}, 冷成彪^{1*}, 张兴春¹, 尹崇军³, 张伟¹, 郭剑衡^{1,2}, 田丰^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 贵州中地大热能科技有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要:义敦岩浆弧位于青藏高原东南缘,由甘孜—理塘古特提斯洋在晚三叠世向西俯冲形成。由于缺乏对区内前寒武系变质岩石的研究,制约了对该岩浆弧构造演化过程和大地构造属性的深入认识。义敦岩浆弧前寒武系变质岩中发育大量的绿泥石,通过详细的镜下鉴定工作,并利用电子探针对该套变质岩中的绿泥石进行矿物化学成分分析。结果表明:该套变质岩中的绿泥石均为富铁种属的蠕绿泥石,其化学成分主要受泥质岩类控制,暗示其形成于相对还原的环境;绿泥石四面体位置置换类型为Al^{IV}对Si的替换,八面体位置置换类型以Fe对Mg的置换为主,以Al^{VI}对Mg的置换为辅,反映其形成于相对酸性的环境;绿泥石具有较低的Si含量,较高的Fe、Mg和Al^{IV}含量,且成分中Al^{IV}与Al^{VI}含量相近,说明该绿泥石为变质成因,主要由黑云母发生水解作用形成;绿泥石温度计估算其形成的温度范围为352℃~443℃,平均值为404℃,与其共生的多硅白云母指示其形成压力为0.57~0.90 GPa,平均值为0.73 GPa,说明义敦岩浆弧变质基底经历了中压型变质作用。综合前人研究成果,义敦岩浆弧具有扬子地块的亲缘性。

关键词:矿物学;岩浆弧;绿泥石;电子探针;前寒武系;变质岩;温压条件;青藏高原

中图分类号:P612 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2018)01-0036-13

Mineralogical Characteristics of Chlorites from Precambrian Metamorphic Rocks in Yidun Magmatic Arc of Qinghai-Tibet Plateau and Their Geological Implications

TIAN Zhen-dong^{1,2}, LENG Cheng-biao^{1*}, ZHANG Xing-chun¹, YIN Chong-jun³,
ZHANG Wei¹, GUO Jian-heng^{1,2}, TIAN Feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guizhou Zhongdida Thermal Energy Technology Co. LTD., Guiyang 550000, Guizhou, China)

Abstract: Yidun magmatic arc, which is located in the southeastern margin of Qinghai-Tibet

收稿日期:2017-10-13;修回日期:2017-12-18 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(B类)项目(XDB18000000);

中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目(SKLOGD-ZY125-03);国家自然科学基金项目(41373051)

作者简介:田振东(1992-),男,山西长治人,中国科学院大学理学博士研究生,E-mail:tianzhendong@mail.gyig.ac.cn.

*通讯作者:冷成彪(1982-),男,山东临沂人,副研究员,理学博士,E-mail:lengchengbiao@vip.gyig.ac.cn.

Plateau, is formed in Late Triassic by the westward subduction of Ganzi-Litang Paleo-Tethyan ocean. The study on Precambrian metamorphic rocks is lacking, which restricts better understanding of tectonic evolution progress and tectonic affinity in Yidun magmatic arc. Chlorites from Precambrian metamorphic rocks in Yidun magmatic arc are widespread developed. The detailed microscope observations and the analysis of mineral chemical compositions of the chlorites using electron microprobe were studied. The results show that all the chlorites belong to prochlorite, and their chemical compositions are controlled by pelites, suggesting they are formed in a relative reduced environment; the replacement of Si by Al^{IV} is the main substitution in the tetrahedral site, while in the octahedral site, Mg is predominately replaced by Fe, followed by Al^{VI} , indicating the chlorites are formed in the relative acid environment; the chlorites have lower Si contents, higher Fe, Mg and Al^{IV} contents, meanwhile Al^{IV} content is approximately equal to Al^{VI} content, implying the chlorites are metamorphic origin and the result of the hydrolysis of biotites; the forming temperature estimated by the chlorites thermometer ranges from 352 °C to 443 °C (average at 404 °C), and the pressure ranges from 0.57 to 0.90 GPa (average at 0.73 GPa) inferred from the phengites intergrowth with the chlorites, suggesting the metamorphic basement of Yidun magmatic arc undergoes medium-pressure type metamorphisms. Together with previous studies, Yidun magmatic arc has an affinity of Yangtze Block.

Key words: mineralogy; magmatic arc; chlorite; electron microprobe; Precambrian; metamorphic rock; temperature-pressure condition; Qinghai-Tibet Plateau

0 引言

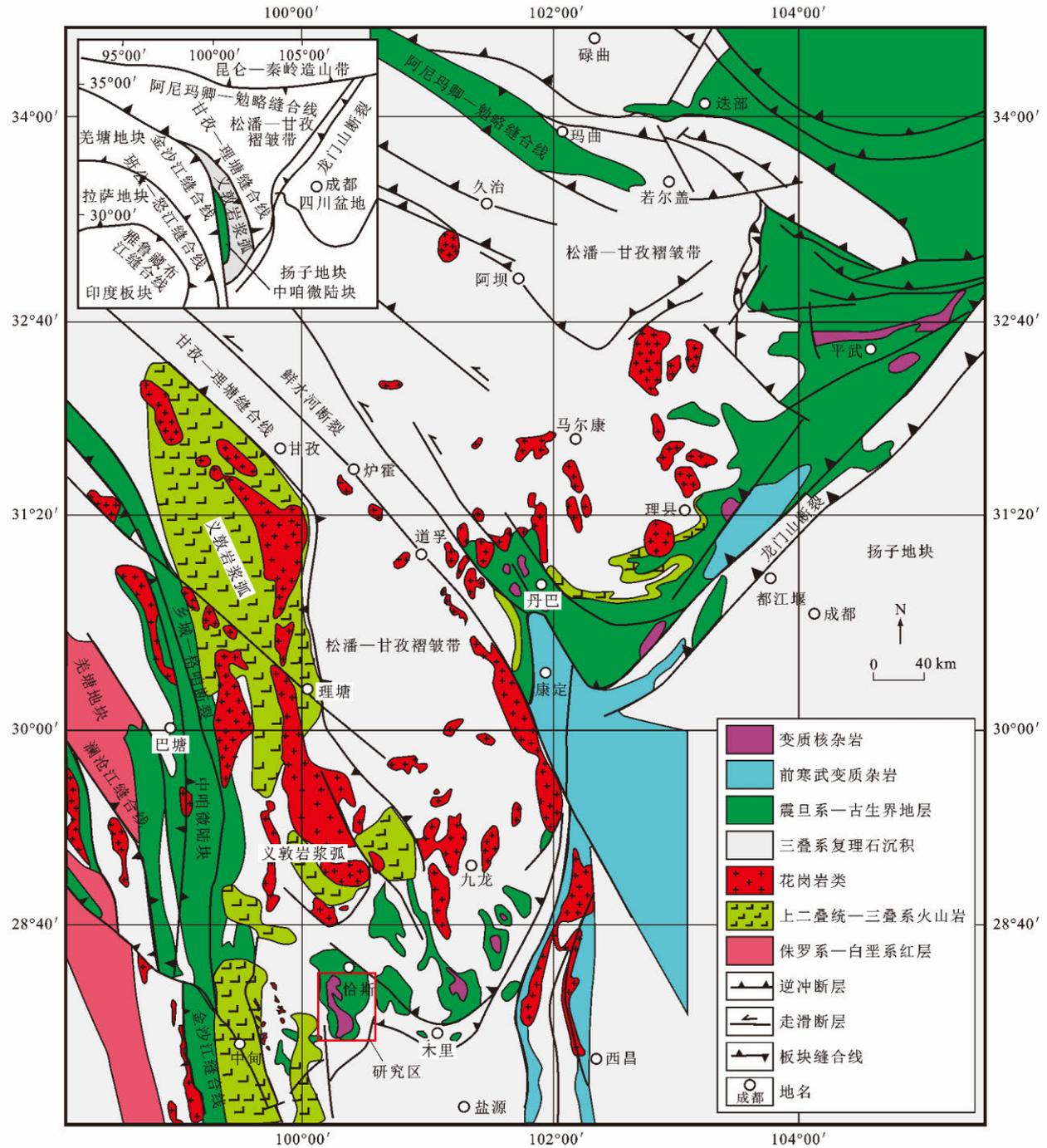
绿泥石是自然界分布较为广泛的矿物之一,存在于沉积岩、中低级变质岩和热液蚀变岩当中^[1-2]。其晶体化学式为 $(R_x^{2+}R_y^{3+}\square_{6-x-y})_6^{VI}(Si_zR_z^{3+})_4^{IV}O_{18}(OH)_8$, R^{2+} 代表 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 等二价阳离子, R^{3+} 代表 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 、 V^{3+} 等三价阳离子, \square 代表八面体空位,有时 Li^+ 占据八面体位置形成锂绿泥石^[3]。其中, x 、 y 、 z 为对应离子数。在不同地质环境中,绿泥石的成分具有较大的变化范围^[4],其化学成分与寄主岩的化学成分、形成时的温压条件、水溶液 pH 值、流体成分、氧逸度、硫逸度、 CO_2 逸度和古盐度等因素密切相关^[1,5-6]。由于绿泥石的结构特征和化学成分与成矿、成岩时的物理化学条件密切相关,所以被广泛应用于反演沉积盆地古地温史、矿床成因、找矿勘探、中低级变质岩温压条件估算、古气候和储层预测等方面研究中^[1,5,7-12]。

义敦岩浆弧位于青藏高原东南缘,呈豆荚状夹持于羌塘地块和松潘—甘孜褶皱带之间,是三江构造—岩浆—成矿带的重要组成部分,由甘孜—理塘古特提斯洋在晚三叠世向西(现今方向)俯冲形成^[13-14]。其独特的地理位置对研究青藏高原和古特提斯洋的形成与演化具有十分重要的意义。近年

来,国内外学者对区内出露的岩浆岩及相关矿产资源开展了大量的研究工作^[13-17],取得了丰硕的研究成果。然而,由于缺乏对义敦岩浆弧基底变质岩石的研究,制约了对该岩浆弧构造演化过程和大地构造属性的深入认识,从而出现了两种不同的观点:一部分学者认为该岩浆弧具有扬子地块的亲缘性^[18-19];另一部分学者则认为具有祁连—柴达木地块的亲缘性^[20]。由于以往研究程度较低,对区内出露的前寒武系变质岩的原岩类型、形成时代、变质温压条件、变质时代和形成环境仍不清楚。本文以这套变质岩中的绿泥石为重点研究对象,对绿泥石的成因机制、形成的温压条件进行了讨论,并对义敦岩浆弧的大地构造属性进行了约束。

1 区域地质背景

青藏高原义敦岩浆弧是三江地区规模最大、保存最完整的古岩浆弧^[14,17,21]。以金沙江缝合线为界,其西为羌塘地块;以甘孜—理塘缝合线为界,其东为称为“地质百慕大”的松潘—甘孜褶皱带^[22](图 1)。由于经历了印支期洋壳俯冲(207~237 Ma)、燕山早期弧陆碰撞(138~207 Ma)、燕山晚期板内伸展(75~135 Ma)和喜山期陆内汇聚(15~64 Ma)4 个演化阶段,区内岩浆活动广泛,变形变质作用强烈,形成了一系列直立褶皱和走滑断裂^[17,23]。大致以乡



图件引自文献[24]和[25],有所修改

图1 青藏高原义敦岩浆弧及邻区地质简图

Fig. 1 Simplified Geological Map of Yidun Magmatic Arc in Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Regions

城—格咱断裂为界,义敦岩浆弧可分为东、西两个部分:西部又叫中咱微陆块,主要由古生代的碎屑岩、碳酸盐岩组成,局部含中基性火山岩夹层;东部则主要由三叠纪的复理石沉积、中酸性侵入岩和火山岩组成,在其南段四川省木里县水洛乡、宁朗乡和稻城县各瓦乡恰斯等地零星出露前寒武系变质岩,该变质岩主要由一套浅变质的火山岩、碎屑岩夹碳酸盐

岩组成^[26]。

2 样品描述和分析方法

青藏高原义敦岩浆弧前寒武系变质岩中的绿泥石云母片岩呈灰绿—墨绿色,作为砂岩中的夹层产出[图2(a)、(b)],主要由黑云母、白云母、绿泥石、斜长石和石英组成[图2(c)~(f)],副矿物见锆石、

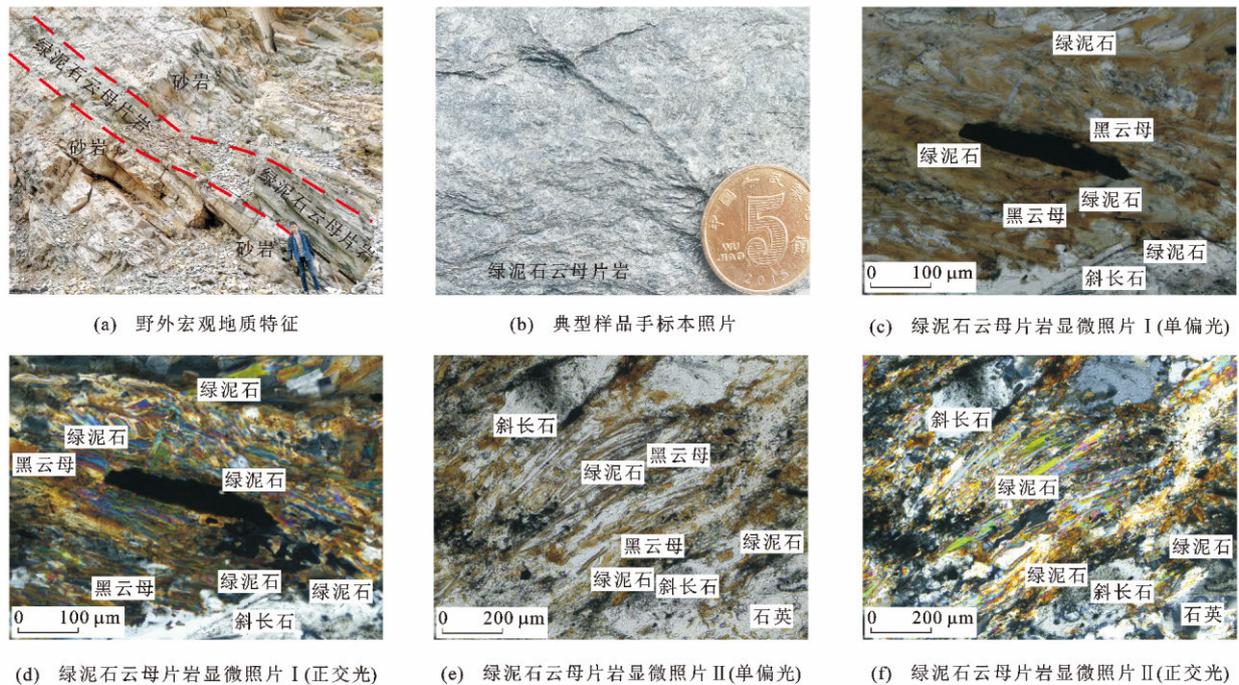


图 2 绿泥石野外照片和显微照片

Fig. 2 Field and Microscopical Photographs of Chlorites

钛铁矿和磷灰石,具鳞片变晶结构、片状构造。变斑晶主要由斜长石组成,部分斜长石已发生蚀变,形成筛状结构。基质矿物组成主要为黑云母、白云母和石英。绿泥石在镜下呈鳞片状,单偏光下呈浅黄绿色—浅绿色,正交偏光下为一级蓝绿干涉色,部分颗粒呈现异常蓝干涉色[图 2 (d)、(f)],与黑云母、白云母共生密切。

通过详细的镜下鉴定工作,圈定代表性的绿泥石、多硅白云母颗粒为研究对象,其电子探针成分分析在中国冶金地质总局山东局测试中心完成,仪器型号为 JXA8230,分析精度优于 5%。白云母分析的测试电压为 15 kV,工作电流为 2×10^{-8} A,束斑大小为 $2 \mu\text{m}$ 或 $10 \mu\text{m}$ 。绿泥石分析的测试电压为 15 kV,工作电流为 2×10^{-8} A,根据绿泥石矿物颗粒的大小,选择束斑大小为 $4 \mu\text{m}$ 或 $8 \mu\text{m}$ 。由于绿泥石在低温条件下常与蒙脱石、伊利石、皂石和蛭石等黏土矿物互层产出,因此,在做电子探针分析测试时这些黏土矿物会对绿泥石的化学成分造成影响^[1]。根据 Foster 提出的标准, $w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{CaO}) < 0.5\%$ 为未受到混染的测点^[27]。剔除混染测点后的绿泥石分析结果见表 1。

3 绿泥石化学成分特征

青藏高原义敦岩浆弧前寒武系变质岩中绿泥石的化学成分具有如下特征: SiO_2 和 Al_2O_3 质量分数

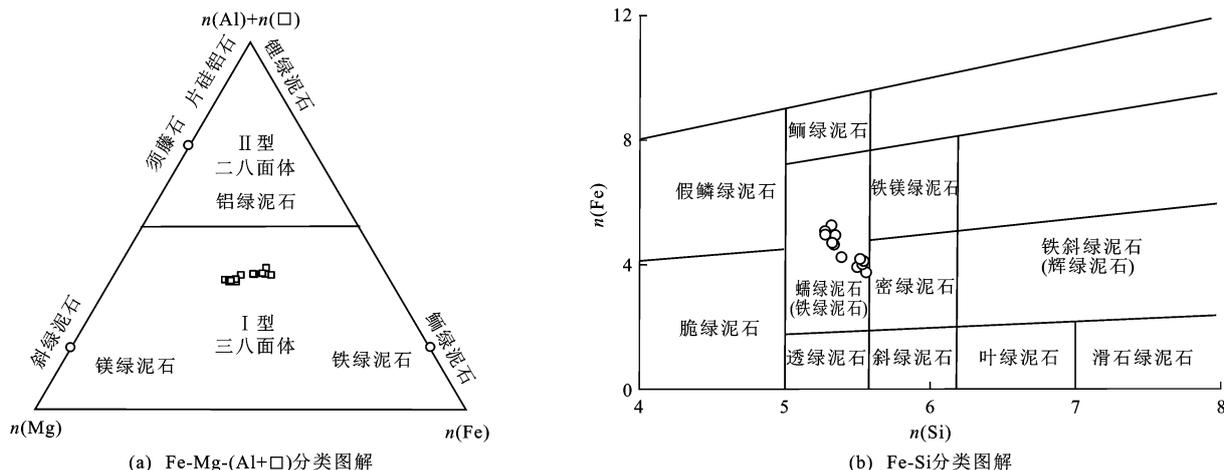
具有较小的变化范围,分别为 24.26%~26.92% 和 20.12%~22.20%,其平均值分别为 25.53% 和 20.90%; FeO 和 MgO 质量分数变化范围较大,分别为 21.74%~28.85% 和 11.96%~17.56%,其平均值分别为 25.01% 和 14.85% (表 1); 此外,绿泥石的 FeO 和 MgO 质量分数呈现此消彼长的相关关系,说明两者在绿泥石结构中置换非常普遍^[10]。

3.1 种属划分

绿泥石是自然界常见的含水层状硅酸盐矿物^[1]。根据不同的分类标准,不同学者对绿泥石提出了多种分类方案,本文采用常用的 Fe-Mg-(Al+□) 和 Fe-Si 分类方案对样品中绿泥石进行了种属划分。在 Fe-Mg-(Al+□) 分类图解中,所有分析测试数据落在 I 型三八面体绿泥石范围之内[图 3 (a)]; 在 Fe-Si 分类图解中,所有分析测试数据落入富铁种属的蠕绿泥石范围之内[图 3 (b)]。Inoue 认为富镁种属的绿泥石(包括透绿泥石、斜绿泥石和叶绿泥石)形成于低氧逸度(相对氧化)和低酸碱度的环境,而富铁种属的绿泥石(包括蠕绿泥石、鳞绿泥石、鲕绿泥石、铁绿泥石)形成于相对还原的环境中^[28]。样品中的绿泥石均为富铁种属的蠕绿泥石,指示其形成于相对还原的环境。

3.2 原岩类型

Laird 提出绿泥石的 $n(\text{Al}) / (n(\text{Al}) + n(\text{Fe}) + n(\text{Mg}))$ 值和 $n(\text{Mg}) / (n(\text{Fe}) + n(\text{Mg}))$ 值可用于分



图件引自文献[29]和[30],有所修改

图3 绿泥石分类图解

Fig. 3 Classification Diagrams of Chlorites

析绿泥石与其母岩的关系^[31]。通常,由泥质岩类转 有较高的 $n(Al)/(n(Al)+n(Fe)+n(Mg))$ 值(大于
变而成的绿泥石比镁铁质岩类蚀变而成的绿泥石具 0.35),产于基性岩中的绿泥石具有较高的 $n(Mg)/$

表1 绿泥石、多硅白云母电子探针分析结果

Tab. 1 Electron Microprobe Analysis Results of Chlorites and Phengites

样品编号	DC15-12-1	DC15-12-2	DC15-14-1	DC15-14-2	DC15-14-3	DC15-14-4	DC15-21-1	DC15-21-2	DC15-21-3	DC15-21-4
矿物名称	绿泥石									
$w(SiO_2)/\%$	24.90	25.16	24.89	24.59	24.26	24.43	26.92	26.38	26.57	26.19
$w(TiO_2)/\%$	0.02	0.08	0.23	0.07	0.02	0.07	0.10	0.13	0.14	0.08
$w(Al_2O_3)/\%$	21.34	21.51	22.20	21.08	21.28	20.78	20.66	20.67	20.56	20.17
$w(FeO)/\%$	26.31	26.16	28.02	27.20	27.91	28.85	21.74	22.48	22.75	22.76
$w(MnO)/\%$	0.36	0.37	0.31	0.21	0.29	0.24	0.21	0.19	0.20	0.20
$w(MgO)/\%$	13.85	14.00	12.33	12.67	12.47	11.96	17.56	17.06	17.23	16.50
$w(CaO)/\%$	0.01	0.03	0.09	0.02	0.02	0.05	0.01	0.00	0.04	0.02
$w(Na_2O)/\%$	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.11	0.04	0.02	0.05	0.03
$w(K_2O)/\%$	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00
$w_{total}/\%$	86.85	87.31	88.11	85.83	86.26	86.52	87.25	86.93	87.53	85.95
$n(Si)$	2.67	2.68	2.64	2.68	2.64	2.67	2.79	2.76	2.76	2.77
$n(Ti)$	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$n(Al^{IV})$	1.33	1.32	1.36	1.32	1.36	1.33	1.21	1.24	1.24	1.23
$n(Al^{VI})$	1.37	1.37	1.42	1.39	1.38	1.34	1.31	1.30	1.28	1.29
$n(Fe)$	2.36	2.33	2.49	2.48	2.54	2.63	1.88	1.96	1.98	2.02
$n(Mn)$	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
$n(Mg)$	2.21	2.22	1.95	2.06	2.03	1.95	2.71	2.66	2.67	2.61
$n(Ca)$	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
$n(Na)$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01
$n(K)$	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
$n(Fe)/(n(Fe)+\dots+n(Mg))$	0.52	0.51	0.56	0.55	0.56	0.58	0.41	0.43	0.43	0.44

续表 1

样品编号	DC15-21-5	DC15-21-6	DC15-21-7	DC15-12-3	DC15-12-4	DC15-14-5	DC15-14-6	DC15-14-7	DC15-21-8
矿物名称	绿泥石	绿泥石	绿泥石	多硅白云母	多硅白云母	多硅白云母	多硅白云母	多硅白云母	多硅白云母
$w(\text{SiO}_2)/\%$	26.07	26.14	25.43	48.56	49.51	48.23	51.91	50.84	51.89
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.07	0.08	0.10	0.27	0.23	0.26	0.26	0.25	0.31
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	20.15	20.12	21.20	30.70	29.82	31.39	30.22	30.61	33.23
$w(\text{FeO})/\%$	23.20	23.76	23.95	2.78	2.41	2.02	2.47	2.01	2.37
$w(\text{MnO})/\%$	0.17	0.25	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$w(\text{MgO})/\%$	15.94	16.13	15.32	1.75	2.20	1.51	2.21	2.02	1.69
$w(\text{CaO})/\%$	0.02	0.03	0.04	0.03	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	0.03	0.04	0.07	0.57	0.43	0.39	0.36	0.25	0.38
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	0.06	0.06	0.01	9.63	10.38	10.80	10.44	10.57	9.59
$w_{\text{total}}/\%$	85.70	86.60	86.29	94.30	94.98	94.64	97.86	96.54	99.45
$n(\text{Si})$	2.78	2.77	2.70	3.27	3.31	3.24	3.36	3.33	3.28
$n(\text{Ti})$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$n(\text{Al}^{\text{IV}})$	1.22	1.23	1.30	0.73	0.69	0.76	0.64	0.67	0.72
$n(\text{Al}^{\text{VI}})$	1.31	1.28	1.36	1.70	1.66	1.73	1.66	1.70	1.76
$n(\text{Fe})$	2.07	2.10	2.13	0.16	0.14	0.11	0.13	0.11	0.13
$n(\text{Mn})$	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$n(\text{Mg})$	2.53	2.54	2.43	0.18	0.22	0.15	0.21	0.20	0.16
$n(\text{Ca})$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$n(\text{Na})$	0.01	0.01	0.01	0.07	0.06	0.05	0.05	0.03	0.05
$n(\text{K})$	0.01	0.01	0.00	0.83	0.89	0.93	0.86	0.88	0.77
$n(\text{Fe})/(n(\text{Fe})+\dots+n(\text{Mg}))$	0.45	0.45	0.47						

注: $w(\cdot)$ 为元素或化合物质量分数; w_{total} 为主量元素总质量分数; $n(\cdot)$ 为元素原子数; Al^{IV} 为四次配位 Al; Al^{VI} 为六次配位 Al;绿泥石和多硅白云母阳离子数计算分别以 14 个氧原子和 11 个氧原子为基准。

$(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))$ 值,而产于含铁建造中的绿泥石具有较低的 $n(\text{Mg})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))$ 值。样品中绿泥石 $n(\text{Al})/(n(\text{Al})+n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))$ 值均等于或大于 0.35,平均值为 0.36,说明其母岩可能主要为泥质岩类,且有部分镁铁质岩类的加入。而 $n(\text{Mg})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))$ 值较高,为 0.43~0.59,平均值为 0.51,说明绿泥石的形成可能和基性岩有关。在 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mg})-\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 图解(图 4)中,两者呈现明显的负相关关系,其线性方程为 $n(\text{Al})/(n(\text{Al})+n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))=-0.1659 \cdot n(\text{Mg})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))+0.4491$ (判定系数为 0.7678),说明研究区绿泥石主要来源于泥质岩类,部分来自于镁铁质岩类(或镁铁质流体),其负相关关系体现了两者混合比例的变化^[10,32]。

3.3 离子间置换反应

绿泥石的晶体化学式为 $(\text{R}_x^{2+}\text{R}_y^{3+}[\text{KG}-40\text{x}]\square_{6-x-y})_6^{\text{VI}}(\text{Si}_z\text{R}_{4-z}^{\text{IV}})_4^{\text{IV}}\text{O}_{18}(\text{OH})_8$ ^[3]。绿泥石中存在

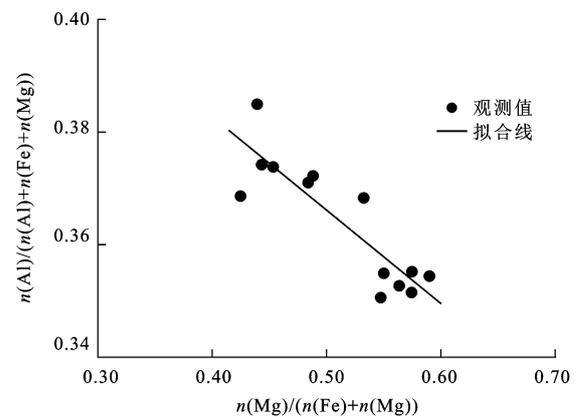


图 4 绿泥石 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mg})-\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 图解
Fig. 4 Diagram of $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mg})-\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ for Chlorites

3 种不同的离子替换方式:① $\text{Fe}^{2+} \Leftrightarrow \text{Mg}^{2+}$; ② $\text{Al}^{\text{IV}} \text{Al}^{\text{VI}} \Leftrightarrow \text{Si}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})$; ③ $3(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}) \Leftrightarrow \square + 2\text{Al}^{\text{VI}}$, 从而导致其成分的多样性^[4]。为了探讨离子间置换方式对绿泥石成分的影响,对其中所含的主要阳离

子做了相关关系分析(图5)。

Al通常置换四面体配位上的Si和八面体位置上的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} ,分别形成四次配位 Al^{IV} 和六次配位 Al^{VI} 。在 Al^{IV} -Si图解[图5(a)]中,两者呈现明显的负相关关系($n(Al^{IV}) = -1.0n(Si) + 4$,判定系数为1.0),说明在绿泥石中存在大量 Al^{IV} 对Si的置换。在 Al^{VI} - Al^{IV} 图解[图5(b)]中,两者呈现一定的正相关关系($n(Al^{VI}) = 0.7576n(Al^{IV}) + 0.3651$,判定系数为0.7964),说明在 Al^{IV} 对Si发生置换的同时,也伴随着八面体位置上 Al^{VI} 对Fe或Mg的置换。当四面体位置的Si、Al置换类型为钙镁闪石型置换时, Al^{IV} 与 Al^{VI} 原子数之间的线性关系应接近1:1^[2]。因此,所测样品中的绿泥石Si与Al的置换不属于纯钙镁闪石型替换。

在Fe-Mg图解[图5(c)]中,两者呈现显著的负相关关系($n(Fe) = -0.8625n(Mg) + 4.256$,判定系数为0.9785),说明除 Al^{IV} 对Si、 Al^{VI} 对Fe或Mg发生置换外,Fe与Mg之间的离子替换也是研究区绿泥石重要的置换反应。在 Al^{IV} -Fe/(Fe+Mg)图解[图5(d)]中,两者呈现出明显的正相关关系,说明Fe与Mg替换的过程中,由于绿泥石结构的调整,使得更多的 Al^{IV} 替代Si^[2,33]。Fe、 Al^{VI} 原子数之和与Mg原子数呈明显的负相关关系[图5(e)],说明绿泥石八面体位置上主要被Fe、Mg、Al等元素占据,主要发生 $Al^{VI} + Fe$ 对Mg的置换。再结合 Al^{VI} -Fe和 Al^{VI} -Mg图解[图5(f)、(g)],得知绿泥石八面体位置上的置换反应应以Fe对Mg的置换为主,以 Al^{VI} 对Mg的置换为辅。

通常认为,绿泥石中Fe对Mg的置换表明其形成于相对酸性的环境,而Mg对Fe的置换表明其可能形成于相对碱性的环境^[34]。样品中的绿泥石主要发生Fe对Mg的替换,说明其可能形成于相对酸性的环境之中。在一次变质作用中形成的绿泥石,其主要阳离子与 Mg^{2+} 之间会呈现良好的线性关系^[2]。在Fe-Mg、 $Al^{VI} + Fe$ -Mg、 Al^{VI} -Mg和Si-Mg图解[图5(c)、(e)、(g)、(h)]中可以发现,研究区绿泥石中 Mg^{2+} 与主要阳离子之间呈现较好的线性关系,说明其主要形成于一次变质作用,后期的变质事件对其影响较弱。

4 绿泥石成因机制、形成的温压条件及其地质意义

4.1 成因机制

绿泥石是沉积岩、中低级变质岩和热液蚀变岩

中的常见矿物^[35-36]。De Caritat等研究发现,不同成因的绿泥石在结构和成分上会有一些的差异^[37-38]。由成岩作用形成的绿泥石结构多型通常为1b型,且具有较高的Si含量,较低的Fe、Mg含量和八面体位置离子占位数^[1,38]。与成岩绿泥石相比,义敦岩浆弧前寒武系变质岩中绿泥石具有较低的Si含量,较高的Fe、Mg和 Al^{IV} 含量,且 Al^{IV} 与 Al^{VI} 含量相近,这些化学成分特征与变质成因绿泥石相吻合^[11,27,37],且在绿泥石Fe-Mg-Al成因分类图解^[39](图6)中,所有样品落入变质成因绿泥石范围,说明样品中绿泥石为变质成因。关于绿泥石的成因,主要有以下3种^[40]:①蒙脱石在富Fe、Mg的碱性条件下转化为绿泥石;②随着温度的升高,岩石中富Fe、Mg的矿物(如黑云母)和岩屑发生水解作用释放出Fe和Mg形成绿泥石;③成岩过程中,泥岩层向相邻砂岩层释放出富含Fe、Mg的流体,交代原来的层状硅酸盐矿物形成绿泥石。在研究区绿泥石云母片岩中,未发现蒙脱石、伊利石等黏土矿物,且在绿泥石中主要发生Fe对Mg的替换,表征其形成于酸性环境,排除了蒙脱石在碱性条件下向绿泥石转化的可能性。由图2(a)可知,绿泥石云母片岩作为夹层产于围岩砂岩之中,也排除了第三种成因的可能性。张伟等研究认为,I型绿泥石多由黑云母和角闪石等富含Fe、Mg的矿物转变而成^[41]。通过镜下观察发现,样品中绿泥石的产出和黑云母密切相关[图2(c)~(f)],因此,绿泥石主要由第二种方式形成,在变质作用过程中,岩石发生脱水作用,释放出流体萃取黑云母中的Fe、Mg等元素,达到饱和后在有利部位沉淀形成绿泥石。

4.2 形成的温压条件

由于绿泥石分布于多种地质环境中,且化学成分、晶体结构与其形成温度、压力、全岩成分等因素密切相关,历来受到地质学家的高度关注,作为常用的地质温度计,已被广泛应用于反演沉积盆地古地温史、矿床成因、找矿勘探、古气候和储层预测研究中^[1,5,7-12]。其地质温度计可分为经验温度计、半经验温度计和热力学温度计^[42]。自Cathelineau等在墨西哥Los Azufres地热系统基于绿泥石中 Al^{IV} 含量与温度的关系初次拟合出绿泥石的经验温度计^[43]后,由于其简单易行、计算过程简单而备受地质学家青睐。但是,到目前为止,仍无一款绿泥石温度计可以应用到所有的地质环境中^[1],因此,本文选用多种绿泥石地质温度计对样品中的绿泥石进行了温度估算,其计算结果见表2。

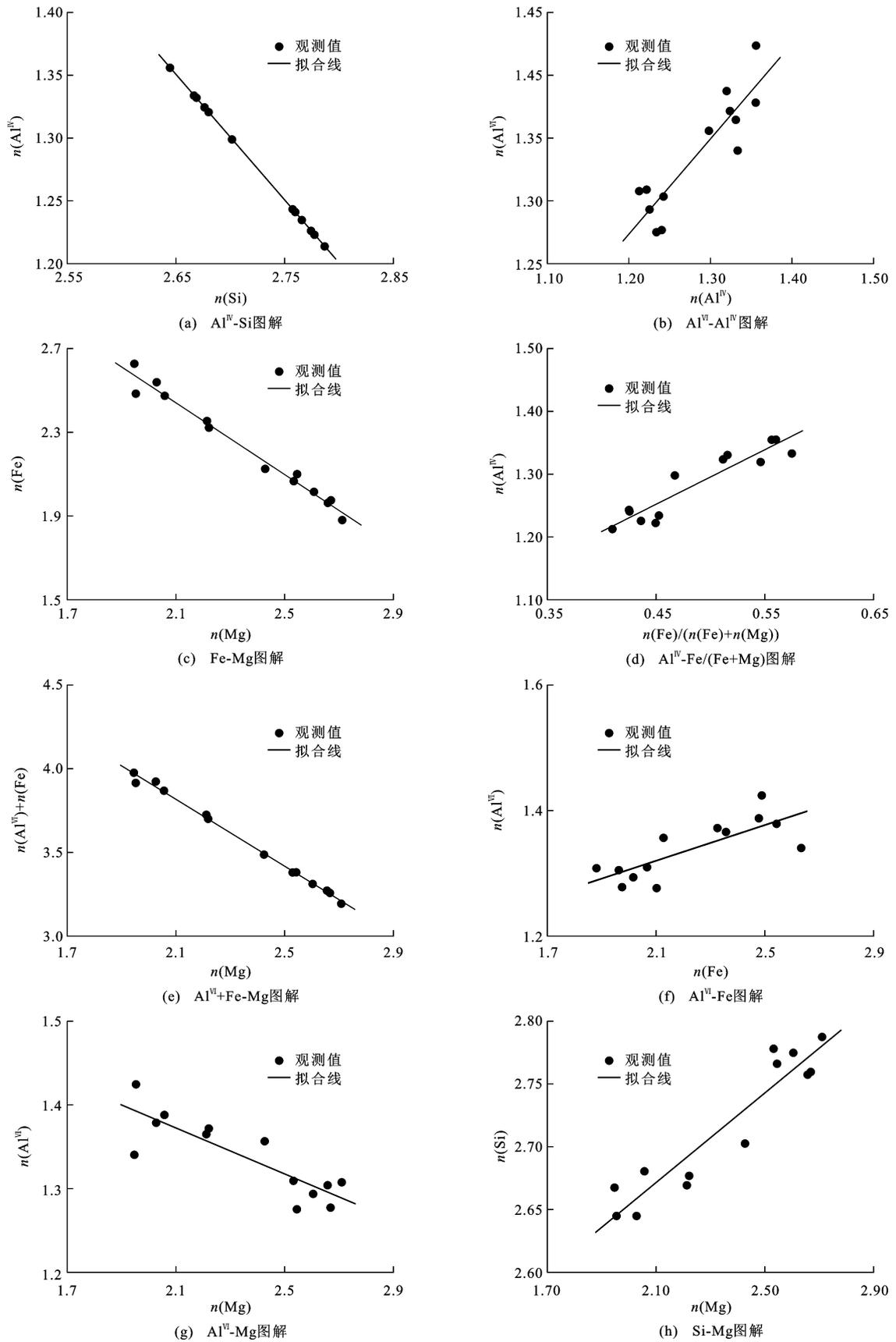


图 5 绿泥石中主要阳离子之间的相关关系
Fig. 5 Correlations of Main Cations in Chlorites

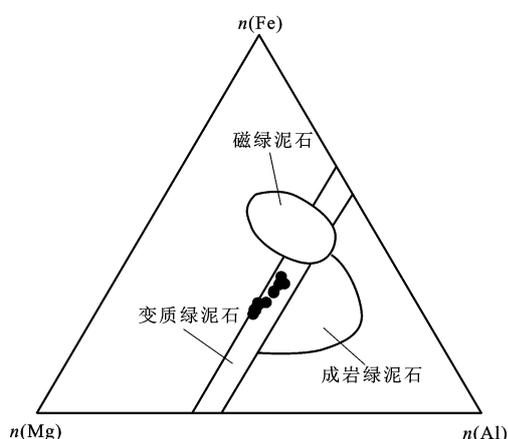
表2 绿泥石形成温度计算结果

Tab. 2 Calculated Results of Temperatures for Chlorites

℃

公式编号	公式 1	公式 2	公式 3	公式 4	公式 5	公式 6	公式 7	公式 8	公式 9	公式 10
样品 DC15-12-1	300	338	367	304	372	339	425	284	278	282
样品 DC15-12-2	299	337	364	300	370	335	420	283	278	281
样品 DC15-14-1	305	347	375	319	381	351	443	285	267	285
样品 DC15-14-2	298	338	363	298	369	333	417	279	262	278
样品 DC15-14-3	305	347	374	318	381	351	443	285	269	285
样品 DC15-14-4	301	343	367	305	375	340	427	279	254	280
样品 DC15-21-1	275	306	329	242	331	280	336	269	286	262
样品 DC15-21-2	281	313	338	256	341	295	358	273	289	268
样品 DC15-21-3	281	312	337	255	340	294	357	273	288	268
样品 DC15-21-4	278	310	333	248	336	286	345	269	279	264
样品 DC15-21-5	277	310	332	246	335	285	343	267	272	262
样品 DC15-21-6	280	313	335	252	339	291	352	269	274	265
样品 DC15-21-7	293	328	356	286	360	323	400	281	289	278
最小值	275	306	329	242	331	280	336	267	254	262
最大值	305	347	375	319	381	351	443	285	289	285
平均值	290	326	352	279	356	316	390	276	275	274
参考文献	[43]	[44]	[45]	[33]	[46]	[37]	[1]	[47]	[2]	[48]

注:公式 1 为 $T=212n(\text{Al}^{\text{IV}})+18$;公式 2 为 $T=212[n(\text{Al}^{\text{IV}})+0.35n(\text{Fe})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))]+18$;公式 3 为 $T=-61.92+321.98 \cdot n(\text{Al}^{\text{IV}})$;公式 4 为 $T=4833.946-2817.776n(\text{Si}^{\text{IV}})+419.858n^2(\text{Si}^{\text{IV}})$;公式 5 为 $T=319[n(\text{Al}^{\text{IV}})+0.1n(\text{Fe})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))]-69$;公式 6 为 $T=(2n(\text{Al}^{\text{IV}})-1.303546)/0.004007$;公式 7 为 $T=-[n(\text{Si}^{\text{IV}})-3.233]/0.001327$;公式 8 为 $T=106.2\{2n(\text{Al}^{\text{IV}})+0.88[n(\text{Fe})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))-0.34]\}+17.5$;公式 9 为 $T=321.98\{n(\text{Al}^{\text{IV}})-1.33[n(\text{Fe})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))-0.31]\}-61.92$;公式 10 为 $T=212.4\{n(\text{Al}^{\text{IV}})-0.24[n(\text{Fe})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))-0.163]\}+17.5$; T 为温度。



图件引自文献[39],有所修改

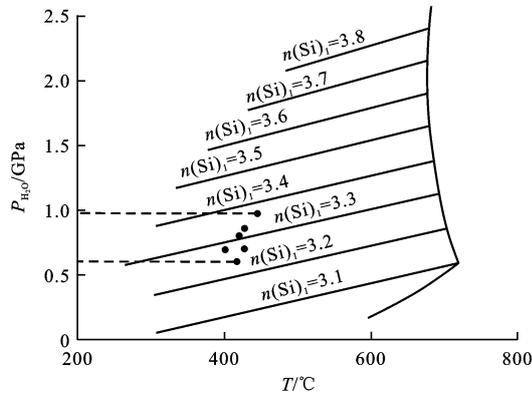
图6 绿泥石 Fe-Mg-Al 成因分类图解

Fig. 6 Genetic Classification Diagram of Fe-Mg-Al for Chlorites

由表 2 可知,选择不同的温度计,其计算的温度结果相差很大。造成上述差异的原因可能有以下 3 个方面:①有些温度计只考虑了四次配位 Al^{IV} 与温度的关系,而未将 $n(\text{Fe})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))$ 值对温度的影响考虑在内^[43,45];②样品中绿泥石已超出某

些绿泥石温度计的适用范围^[37,46];③许多绿泥石温度计的提出都是基于成岩过程、地热系统和热液蚀变系统,可能不适用于变质过程中温压条件的估算^[33,43-44,46-48]。研究区样品的矿物组成主要为黑云母、白云母、斜长石、绿泥石和石英,为一套典型的低绿片岩相矿物组合。王勇生等研究认为,变质岩中新生黑云母的出现指示其形成温度范围为 $350\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[49]。因此,上述绝大多数绿泥石温度计对样品中绿泥石的计算结果偏低,只有 De Caritat 等拟合的温度计^[1]、Cathelineau 拟合的温度计^[45]和 Jowett 拟合的温度计^[46]计算结果在该温度范围内。但 Cathelineau 拟合的温度计^[45]未考虑 $n(\text{Fe})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))$ 值对温度的影响,而样品中绿泥石 $n(\text{Fe})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))$ 值与 Al^{IV} 原子数具有很好的相关性,因此,必须考虑 $n(\text{Fe})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))$ 值对温度的影响。Jowett 拟合的温度计^[46]适用于 $n(\text{Fe})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))$ 值低于 0.6、温度范围为 $150\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 325\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地质条件,虽然样品中绿泥石的 $n(\text{Fe})/(n(\text{Fe})+n(\text{Mg}))$ 值均小于 0.6,但计算的温

度范围为 331 °C~381 °C,已超过公式运用的温度范围。而 De Caritat 拟合的温度计^[1]对样品(除去 3 件估算结果偏低的样品)中绿泥石估算结果为 352 °C~443 °C,平均值为 404 °C,与矿物组合特征所指示的变质温度相符合,因此,可以代表样品中绿泥石的形成温度。通过样品中与绿泥石共生的多硅白云母估算了其形成压力范围为 0.57~0.90 GPa,平均值为 0.73 GPa(图 7)。



$n(\text{Si})_1$ 为与绿泥石共生的多硅白云母中 Si 原子数; $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水压;图件引自文献[50],有所修改

图 7 多硅白云母压力估算

Fig. 7 Pressure Estimation Diagram of Phengite

4.3 地质意义

绿泥石的成分及其共生的矿物组合可以反映其变质程度,绿泥石云母片岩中矿物组合为黑云母、白云母、斜长石、绿泥石和石英,为典型的低绿片岩相矿物组合特征^[51]。其形成温度范围为 352 °C~443 °C,压力范围为 0.57~0.90 GPa,说明研究区岩石经历了绿片岩相变质作用。其变质温压条件与邻区松潘—甘孜褶皱带相似,均经历了中压型巴罗式变质作用,说明两者可能经历了相似的构造演化过程^[52]。Song 等研究发现,义敦岩浆弧、松潘—甘孜褶皱带和扬子地块西缘在三叠纪之前具有非常相似的沉积地层单元和古生物沉积面貌,据此推测义敦岩浆弧具有扬子地块的亲缘性^[18]。Ding 等通过碎屑锆石研究发现,义敦岩浆弧晚三叠世砂岩中存在 1 420~1 470 Ma 的碎屑锆石,但华南陆块侏罗纪之前的地层中不发育该年龄段锆石,而在祁连—柴达木地块中广泛分布,从而认为义敦岩浆弧具有祁连—柴达木地块的亲缘性^[20]。但是,李献华等对华南陆块沉积岩中超过 6 800 个碎屑锆石进行了统计分析,结果显示在扬子地块西缘和华夏陆块前寒武纪—古生代地层中存在大量的 1 430 Ma 碎屑锆石^[53];此外,在华南陆块中还存在 1 430 Ma 花岗闪

长岩^[54]。因此,华南陆块中约 1.4 Ga 花岗闪长岩以及含 1.4 Ga 碎屑锆石的地层再循环可以为义敦岩浆弧晚三叠世砂岩提供物源。而且,在义敦岩浆弧与邻区松潘—甘孜褶皱带晚三叠世岩浆岩中发现大量 2.3~2.5 Ga、1.7~1.9 Ga 和 0.7~0.9 Ga 的继承锆石,可与扬子地块的锆石年龄谱峰相对应^[13,55]。因此,义敦岩浆弧和邻区松潘—甘孜褶皱带基底相似,都具有扬子地块的亲缘性。

5 结 语

(1)青藏高原义敦岩浆弧前寒武系变质岩中绿泥石均为富铁种属的蠕绿泥石,指示其形成于相对还原的环境,其化学成分主要受泥质岩类控制。

(2)样品中绿泥石四面体位置发生 Al^{IV} 对 Si 的替换,八面体位置替换类型以 Fe 对 Mg 的置换为主,以 Al^{VI} 对 Mg 的置换为辅,反映其形成于相对酸性的环境。

(3)样品中绿泥石 Al^{VI} 与 Al^{IV} 含量相近,具有较低的 Si 含量,较高的 Fe、Mg 和 Al^{IV} 含量,说明该绿泥石为变质成因,主要由黑云母发生水解作用形成。

(4)样品中绿泥石形成的温度范围为 352 °C~443 °C,与其共生的多硅白云母指示其形成压力范围为 0.57~0.90 GPa,结合样品中矿物组合特征,说明其经历了绿片岩相变质作用。

(5)义敦岩浆弧变质基底与邻区松潘—甘孜褶皱带均经历了中压型巴罗式变质作用,说明其经历了相似的构造演化过程。结合前人研究成果,认为义敦岩浆弧具有扬子地块的亲缘性。

参 考 文 献 :

References :

- [1] DE CARITAT P, HUTCHEON I, WALSHE J L. Chlorite Geothermometry: A Review[J]. Clays and Clay Minerals, 1993, 41(2): 219-239.
- [2] XIE X G, BYERLY G R, FERRELL R E. IIb Trioctahedral Chlorite from the Barberton Greenstone Belt: Crystal Structure and Rock Composition Constraints with Implications to Geothermometry[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1997, 126(3): 275-291.
- [3] YAVUZ F, KUMRAL M, KARAKAYA N, et al. A Windows Program for Chlorite Calculation and Classification[J]. Computers and Geosciences, 2015, 81: 101-113.
- [4] BOURDELLE F, PARRA T, CHOPIN C, et al. A New Chlorite Geothermometer for Diagenetic to Low-grade

- Metamorphic Conditions[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, 165(4): 723-735.
- [5] 赵明, 季峻峰, 陈小明, 等. 古盐度对塔北隆起泥岩中黏土矿物组合和绿泥石成分的影响[J]. *高校地质学报*, 2015, 21(3): 365-375.
ZHAO Ming, JI Jun-feng, CHEN Xiao-ming, et al. Effects of Paleosalinity on Clay Mineral Assemblages and Chlorite Composition in Mudstone of Tabei Uplift, Xinjiang, China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2015, 21(3): 365-375.
- [6] INOUE A, MEUNIER A, PATRIER-MAS P, et al. Application of Chemical Geothermometry to Low-temperature Trioctahedral Chlorites [J]. *Clays and Clay Minerals*, 2009, 57(3): 371-382.
- [7] BEAUFORT D, RIGAULT C, BILLON S, et al. Chlorite and Chloritization Processes Through Mixed-layer Mineral Series in Low-temperature Geological Systems: A Review[J]. *Clay Minerals*, 2015, 50(4): 497-523.
- [8] WILKINSON J J, CHANG Z S, COOKE D R, et al. The Chlorite Proximitor: A New Tool for Detecting Porphyry Ore Deposits [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 152: 10-26.
- [9] XIAO B, CHEN H Y, WANG Y F, et al. Chlorite and Epidote Chemistry of the Yandong Cu Deposit, NW China: Metallogenic and Exploration Implications for Paleozoic Porphyry Cu Systems in the Eastern Tianshan[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, DOI: 10. 1016/j. oregeorev. 2017. 03. 004.
- [10] 廖震, 刘玉平, 李朝阳, 等. 都龙锡锌矿床绿泥石特征及其成矿意义[J]. *矿床地质*, 2010, 29(1): 169-176.
LIAO Zhen, LIU Yu-ping, LI Chao-yang, et al. Characteristics of Chlorites from Dulong Sn-Zn Deposit and Their Metallogenic Implications[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(1): 169-176.
- [11] 张霞, 林春明, 陈召佑. 鄂尔多斯盆地镇泾区块上三叠统延长组砂岩中绿泥石矿物特征[J]. *地质学报*, 2011, 85(10): 1659-1671.
ZHANG Xia, LIN Chun-ming, CHEN Zhao-you. Characteristics of Chlorite Minerals from Upper Triassic Yanchang Formation in the Zhenjing Area, Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(10): 1659-1671.
- [12] 赵良, 季峻峰, 陈骏, 等. 最近 13 万年来黄土高原黄土剖面中绿泥石的化学风化与古气候变迁[J]. *矿物学报*, 2003, 23(2): 163-168.
ZHAO Liang, JI Jun-feng, CHEN Jun, et al. Chemical Weathering of Chlorite in Chinese Loess-paleosol Sequences in the Last 130 ka and Climate Change[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2003, 23(2): 163-168.
- [13] LENG C B, HUANG Q Y, ZHANG X C, et al. Petrogenesis of the Late Triassic Volcanic Rocks in the Southern Yidun Arc, SW China: Constraints from the Geochronology, Geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes[J]. *Lithos*, 2014, 190/191: 363-382.
- [14] LENG C B, ZHANG X C, HU R Z, et al. Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Constraints on the Genesis of the Xuejiping Porphyry Copper Deposit in Zhongdian, Northwest Yunnan, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 60: 31-48.
- [15] KONG D X, XU J F, CHEN J L. Oxygen Isotope and Trace Element Geochemistry of Zircons from Porphyry Copper System: Implications for Late Triassic Metallogenesis Within the Yidun Terrane, Southeastern Tibetan Plateau[J]. *Chemical Geology*, 2016, 441: 148-161.
- [16] WANG B Q, ZHOU M F, CHEN W T, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Triassic Volcanic Rocks in the Northern Yidun Terrane, Eastern Tibet[J]. *Lithos*, 2013, 175/176: 285-301.
- [17] 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 等. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统[J]. *地质学报*, 2004, 78(1): 109-120.
HOU Zeng-qian, YANG Yue-qing, QU Xiao-ming, et al. Tectonic Evolution and Mineralization Systems of the Yidun Arc Orogen in Sanjiang Region, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(1): 109-120.
- [18] SONG X Y, ZHOU M F, CAO Z M, et al. Late Permian Rifting of the South China Craton Caused by the Emeishan Mantle Plume? [KG-20x][J]. *Journal of the Geological Society*, 2004, 161(5): 773-781.
- [19] XIAO L, XU Y G, XU J F, et al. Chemostratigraphy of Flood Basalts in the Garze-Litang Region and Zongza Block: Implications for Western Extension of the Emeishan Large Igneous Province, SW China[J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2004, 78(1): 61-67.
- [20] DING L, YANG D, CAI F L, et al. Provenance Analysis of the Mesozoic Hoh-Xil-Songpan-Ganzi Turbidites in Northern Tibet: Implications for the Tectonic Evolution of the Eastern Paleo-Tethys Ocean [J]. *Tectonics*, 2013, 32(1): 34-48.
- [21] REID A, WILSON C J L, SHUN L, et al. Mesozoic Plutons of the Yidun Arc, SW China: U-Pb Geochro-

- nology and Hf Isotopic Signature[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31(1/2/3/4): 88-106.
- [22] 罗志立,姚军辉,孙 玮,等. 试解“中国地质百慕大”之谜[J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(1): 1-4, 14.
LUO Zhi-li, YAO Jun-hui, SUN Wei, et al. Attempt to Explain the Enigma of “Chinese Geological Bermuda” [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(1): 1-4, 14.
- [23] 侯增谦,曲晓明,周继荣,等. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程:花岗岩记录[J]. *地质学报*, 2001, 75(4): 484-497.
HOU Zeng-qian, QU Xiao-ming, ZHOU Ji-rong, et al. Collision-orogenic Processes of the Yidun Arc in the Sanjiang Region: Record of Granites[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(4): 484-497.
- [24] 颜丹平,刘 鹤,魏国庆,等. 龙门山后山震旦系—古生界变形变质作用:松潘—甘孜造山带中生代伸展垮塌下的中地壳韧性流壳层[J]. *地学前缘*, 2008, 15(3): 186-198.
YAN Dan-ping, LIU He, WEI Guo-qing, et al. Collapse of Songpan-Garze Orogenic Belt by a Mesozoic Middle-crustal Ductile Channel Flow: Evidences from Deformation and Metamorphism Within Sinian-Paleozoic Strata in the Hinterland of Longmenshan Foreland Thrust Belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(3): 186-198.
- [25] CAI H M, ZHANG H F, XU W C. U-Pb Zircon Ages, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Compositions of Granitoids in Western Songpan-Garze Fold Belt: Petrogenesis and Implication for Tectonic Evolution [J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(4): 681-698.
- [26] 杜其良. 四川木里水洛地区前寒武纪地层的发现及其初步划分[J]. *成都地质学院学报*, 1986, 13(1): 31-49.
DU Qi-liang. The Discovery and Subdivision of Precambrian in Shuiluo Area, Muli County, Sichuan Province [J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1986, 13(1): 31-49.
- [27] FOSTER M D. Interpretation of the Composition and a Classification of the Chlorites[R]. Washington DC: United States Government Printing Office, 1962.
- [28] INOUE A. Formation of Clay Minerals in Hydrothermal Environments[C]// VELDE B. Origin and Mineralogy of Clays; Clays and the Environment. Berlin: Springer, 1995: 268-329.
- [29] ZANE A, WEISS Z. A Procedure for Classifying Rock-forming Chlorites Based on Microprobe Data[J]. *Rendiconti Lincei*, 1998, 9(1): 51-56.
- [30] DEER W A, HOWIE R A, ZUSSMAN J. Rock-forming Minerals: Sheet Silicates[M]. London: Longman, 1962.
- [31] LAIRD J. Chlorites: Metamorphic Petrology[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1988, 19(1): 405-453.
- [32] 王小雨,毛景文,程彦博,等. 粤东新寮铜多金属矿床绿泥石特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(5): 885-905.
WANG Xiao-yu, MAO Jing-wen, CHENG Yan-bo, et al. Characteristics of Chlorite from the Xinliaodong Cu Polymetallic Deposit in Eastern Guangdong Province and Their Geological Significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2014, 33(5): 885-905.
- [33] KAVALLIERIS I, WALSHE J L, HALLEY S, et al. Dome-related Gold Mineralization in the Pani Volcanic Complex, North Sulawesi, Indonesia; A Study of Geologic Relations, Fluid Inclusions, and Chlorite Compositions [J]. *Economic Geology*, 1990, 85(6): 1208-1225.
- [34] 艾永富,刘国平. 内蒙大井矿床的绿泥石研究[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 1998, 34(1): 97-105.
AI Yong-fu, LIU Guo-ping. The Study of Chlorite at Dajing Deposit in Inner Mongolia of China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekingensis*, 1998, 34(1): 97-105.
- [35] 李仁泽,刘成东,梁 良,等. 江西省桃山铀矿田大府上矿床绿泥石特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2016, 35(2): 297-305.
LI Ren-ze, LIU Cheng-dong, LIANG Liang, et al. Characteristics and Geological Significance of Chlorite from the Dafushang Uranium Deposit in Taoshan Area, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2016, 35(2): 297-305.
- [36] 夏 菲,孟 华,聂逢君,等. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床绿泥石特征及地质意义[J]. *地质学报*, 2016, 90(12): 3473-3482.
XIA Fei, MENG Hua, NIE Feng-jun, et al. Characteristics of Chlorite from the Nalinggou Uranium Deposit in the Ordos Basin and Its Geological Significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(12): 3473-3482.
- [37] HILLIER S, VELDE B. Octahedral Occupancy and the Chemical-composition of Diagenetic (Low-temperature) Chlorites[J]. *Clay Minerals*, 1991, 26(2): 149-168.
- [38] CURTIS C D, HUGHES C R, WHITEMAN J A, et al. Compositional Variation Within Some Sedimentary Chlorites and Some Comments on Their Origin[J]. *Mineralogical Magazine*, 1985, 49: 375-386.
- [39] GRIGSBY J D. Origin and Growth Mechanism of Authigenic Chlorite in Sandstones of the Lower Vicksburg Formation, South Texas[J]. *Journal of Sedimen-*

- tary Research, 2001, 71(1): 27-36.
- [40] 田建锋, 陈振林, 凡元芳, 等. 砂岩中自生绿泥石的产状、形成机制及其分布规律[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(2): 200-205.
TIAN Jian-feng, CHEN Zhen-lin, FAN Yuan-fang, et al. The Occurrence, Growth Mechanism and Distribution of Authigenic Chlorite in Sandstone[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(2): 200-205.
- [41] 张伟, 张寿庭, 曹华文, 等. 滇西小龙河锡矿床中绿泥石矿物特征及其指示意义[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2014, 41(3): 318-328.
ZHANG Wei, ZHANG Shou-ting, CAO Hua-wen, et al. Characteristics of Chlorite Minerals from Xiaolonghe Tin Deposit in West Yunnan, China and Their Geological Implications[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2014, 41(3): 318-328.
- [42] BOURDELLE F, CATHELIN M. Low-temperature Chlorite Geothermometry: A Graphical Representation Based on a $T-R^{2+}$ -Si Diagram[J]. European Journal of Mineralogy, 2015, 27(5): 617-626.
- [43] CATHELIN M, NIEVA D. A Chlorite Solid Solution Geothermometer the Los Azufres (Mexico) Geothermal System[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1985, 91(3): 235-244.
- [44] KRANIDIOTIS P, MACLEAN W H. Systematics of Chlorite Alteration at the Phelps Dodge Massive Sulfide Deposit, Matagami, Quebec[J]. Economic Geology, 1987, 82(7): 1898-1911.
- [45] CATHELIN M. Cation Site Occupancy in Chlorites and Illites as a Function of Temperature[J]. Clay Minerals, 1988, 23(4): 471-485.
- [46] JOWETT E C. Fitting Iron and Magnesium into the Hydrothermal Chlorite Geothermometer [C] // Geological Association of Canada. Joint Annual Meeting of the Geological Association of Canada and the Mineralogical Association of Canada with the Society of Economic Geologists. Toronto: Geological Association of Canada, 1991: A62.
- [47] ZANG W, FYFE W S. Chloritization of the Hydrothermally Altered Bedrock at the Igarape Bahia Gold Deposit, Carajas, Brazil[J]. Mineralium Deposita, 1995, 30(1): 30-38.
- [48] EL-SHARKAWY M F. Talc Mineralization of Ultramafic Affinity in the Eastern Desert of Egypt[J]. Mineralium Deposita, 2000, 35(4): 346-363.
- [49] 王勇生, 朱光, 王道轩, 等. 地质温度计在郯庐断裂带南段低温糜棱岩中的尝试[J]. 中国地质, 2005, 32(4): 625-633.
WANG Yong-sheng, ZHU Guang, WANG Dao-xuan, et al. An Attempt to Apply Three Geothermometers in the Interpretation of Low-temperature Mylonites in the Southern Segment of the Tanlu Fault Zone[J]. Geology in China, 2005, 32(4): 625-633.
- [50] MASSONNE H J, SCHREYER W. Phengite Geobarometry Based on the Limiting Assemblage with K-feldspar, Phlogopite, and Quartz[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 96(2): 212-224.
- [51] BUCHER K, GRAPES R. Petrogenesis of Metamorphic Rocks[M]. Berlin: Springer, 2011.
- [52] HUANG M H, BUICK I S, HOU L W. Tectonometamorphic Evolution of the Eastern Tibet Plateau: Evidence from the Central Songpan-Garze Orogenic Belt, Western China[J]. Journal of Petrology, 2003, 44(2): 255-278.
- [53] 李献华, 李武显, 何斌. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解: 观察、解释与检验[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(6): 543-559.
LI Xian-hua, LI Wu-xian, HE Bin. Building of the South China Block and Its Relevance to Assembly and Breakup of Rodinia Supercontinent: Observations, Interpretations and Tests[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(6): 543-559.
- [54] LI Z X, LI X H, ZHOU H W, et al. Grenvillian Continental Collision in South China: New SHRIMP U-Pb Zircon Results and Implications for the Configuration of Rodinia[J]. Geology, 2002, 30(2): 163-166.
- [55] PENG T P, ZHAO G C, FAN W M, et al. Zircon Geochronology and Hf Isotopes of Mesozoic Intrusive Rocks from the Yidun Terrane, Eastern Tibetan Plateau: Petrogenesis and Their Bearings with Cu Mineralization[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 80: 18-33.