

东昆仑没草沟蛇绿岩地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

王国良¹, 刘建栋¹, 杨雪松¹, 刘 荣¹, 曹锦山¹, 韩海臣², 陈丽娟¹

WANG Guoliang¹ LIU Jiandong¹ YANG Xuesong¹, LIU Rong¹,

CAO Jinshan¹, HAN Haichen², CHEN Lijuan¹

1. 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室/青海省地质调查院, 青海 西宁 810012;

2. 青海省水文地质工程环境地质调查院, 青海 西宁 810008

1. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources of Northern Tibetan Plateau / Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, Qinghai, China;

2. Qinghai Hydrogeology Engineering and Environment Geological Survey, Xining 810008, Qinghai, China

摘要: 重点介绍了没草沟蛇绿岩岩石组合、地球化学特征等, 并对该蛇绿岩构造背景进行了讨论。该蛇绿岩位于青海省格尔木市, 构造上处于东昆仑复合造山带西段, 岩石组合由变质基性玄武岩及少量辉绿岩、辉长岩、变质橄榄岩、辉橄岩等组成。岩石主量和微量元素特征显示该蛇绿岩与俯冲无关, 属正常洋中脊型玄武岩。前人开展的地质调查表明, 该蛇绿岩形成于晚奥陶世。通过对没草沟蛇绿岩中玄武岩和辉长岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 分别获得了 488.2 ± 2.1 Ma 和 500.8 ± 2.2 Ma 的年龄数据, 确定该蛇绿岩形成时代为中寒武世—早奥陶世。该同位素年龄的获得填补了该地区蛇绿岩无时代依据的空白, 同时反映古特斯洋在本区的残留。综合区域地质特征认为, 没草沟蛇绿岩早期为初始洋盆环境, 晚期有洋脊扩张中心环境的玄武岩形成。寒武纪早期是洋盆发育的全盛期, 奥陶纪晚期洋壳发生消减, 于晚志留世洋盆基本闭合, 后期伴有绿片岩相变质作用。

关键词: 没草沟蛇绿岩; 地球化学; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 构造意义

中图分类号: P597⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1675-2552(2019)04-0573-19

Wang G L, Liu J D, Yang X S, Liu R, Cao J S, Han H C, Chen L J. Geochemistry, LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the Meicaogou ophiolite in East Kunlun, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(4):573-591

Abstract: This paper mainly introduces the rock assemblage and geochemical characteristics of the Meicaogou ophiolite and attempts to discuss the tectonic background of the ophiolite which is located in Golmud City of Qinghai Province and lies in the western part of the East kunlun composite orogenic belt. The rock association is composed of metamorphic basic basalt and a small amount of diabase, gabbro, metamorphic peridotite and augite peridotite. The characteristics of main elements and trace elements indicate that the ophiolite is not related to subduction but belongs to N-MORB. In the past geological survey carried out by previous researchers, it was considered that the ophiolite was formed in Late Ordovician. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro and basalt in the Weitogou ophiolite yielded the exact age data of 488.2 ± 2 Ma and 501.1 ± 2.2 Ma. The isotope data have filled the gaps of the ophiolite data in this area, and reflected the existence of remains of the ancient ocean in this area. The comprehensive regional geological characteristics suggest that the early period of the oceanic basin was at the initial stage, but at the late stage basalt was formed in an oceanic ridge expanding center environment. The Early Cambrian period was the flourishing period of the development

收稿日期: 2018-05-18; 修订日期: 2018-10-20

资助项目: 中国地质调查局项目《青海1:5万窑洞山地区两幅区调》(编号: 1212011121192)和《青海省区域地质调查与片区总结》(编号: 12120114079701)

作者简介: 王国良(1979-), 男, 学士, 工程师, 从事区域地质调查及找矿研究。E-mail: wgl8041@163.com

of the oceanic basin, the late oceanic crust was formed in the late Ordovician period, and the late Silurian basin was basically closed together with later greenschist facies metamorphism.

Key words: Meicaogou ophiolite; geochemistry; LA-ICP-MS zircon U-Pb ages; tectonic significance

传统意义上的蛇绿岩指一种洋壳岩石组合,基本层序自下而上为超基性岩、堆晶岩、辉长辉绿岩席状岩墙群、玄武岩或含深海沉积岩夹层及透镜体的层状玄武岩、硅质岩与深海泥(页)岩等,通常被视为古大陆造山带上保存的洋壳或上地幔的物质残片^[1-4]。自法国矿物学家 Alexandre Brongniart 于 1813 年^[5]首次提出“蛇绿岩”的概念以来,蛇绿岩的定义、内涵、划分方案等随着研究的深入而不断变化,且一直是国内外地学界研究的焦点^[6-10]。Yildirim 等^[11-12]新划分方案中将蛇绿岩划分为 2 类,一类是与俯冲无关的蛇绿岩,指发育于洋盆关闭阶段的蛇绿岩,包括陆缘型蛇绿岩(CM)、洋中型蛇绿岩(MOR)和地幔柱型蛇绿岩(P);另一类是与俯冲有关的蛇绿岩,包括俯冲带上盘蛇绿岩(SSZ)、火山-弧蛇绿岩(VA)。蛇绿岩的野外调查研究对于恢复古板块运动,重塑大洋岩石圈形成-伸展-开裂等具有十分重要的意义。

青海省是中国蛇绿岩十分发育的省份之一,发育具代表性且规模巨大的蛇绿岩,如北祁连蛇绿岩、拉脊山蛇绿岩、通天河蛇绿岩等^[13-14]。东昆仑结合带所处构造位置特殊,物质组成复杂,带内蛇绿岩、花岗岩规模巨大,十分发育。前人在该地区蛇绿岩、花岗岩、构造等方面取得了一系列研究成果^[15-22],而对于没草沟蛇绿混杂岩系统研究不够。20 世纪 80 年代 1:20 万区域地质调查报告命名为哈萨山超基性岩体^①,由角闪橄榄岩、蛇纹岩、菱镁滑石片岩组成。2003 年开展 1:25 万不冻泉幅区调^②工作,根据该混杂岩中所获化石及地质体之间的接触关系,将该蛇绿岩形成时代定为奥陶纪—志留纪,但有关该蛇绿岩的形成时代,尚缺乏精确的同位素年代学证据。

中国地质调查局 2013—2015 年的 1:5 万青海省格尔木市窑洞山地区区域地质调查^③项目取得了较好的地质成果,本文是该项目成果的一部分。笔者在没草沟蛇绿混杂岩空间展布特征及相互关系研究的基础上,对该混杂岩进行系统的调查研究,在地质特征、岩石学、岩石地球化学方面取得了丰富的地质资料,并对蛇绿岩中的玄武岩、辉长岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,进一步探讨其形成

的构造背景及东昆仑造山带的早古生代演化历史。

1 地质背景

没草沟蛇绿混杂岩位于东昆仑山西段南坡,属东昆南造山带(图 1),为纳赤台蛇绿杂岩带的一部分^④。区域上纳赤台蛇绿混杂岩带自西向东沿昆仑山脊的雪鞍山、开木棋、沙松乌拉等地分布,向东至纳赤台消失,总体近北西西向或东西向带状断续出露。本文研究的没草沟蛇绿混杂岩处于该带中部,分布在老道沟、没草沟等地(图 2-a)。构造上^[23]属于昆中断裂南侧的东昆仑南坡俯冲增生杂岩带(图 2-b),北邻东昆北岩浆弧,南邻木孜塔格-布青山蛇绿混杂岩带与可可西里-松潘前陆盆地相望。该带区域上发育元古宙—中生代地层,经历了多期次的构造岩浆活动,形成相对独特的地质构造格局。区域上除岩浆岩外,地层也较发育^[24]。古元古代金水口岩群构成研究区变质结晶基底,岩石组合为黑云斜长片麻岩、混合岩化黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、变粒岩夹(条带状)大理岩等,变质程度达角闪岩相;长城纪小庙岩组为一套以稳定型石英质碎屑岩为主,夹石英岩、白云母石英片岩及大理岩的滨浅海沉积,变质程度达绿片岩相;蓟县系为海相地层序列,沉积了万保沟群,自下而上为温泉沟组和青办食宿站组。温泉沟组为一套玄武岩、玄武安山岩夹玄武质凝灰熔岩、英安岩、灰岩、大理岩及少量板岩、硅质岩,属洋岛火山岩组合特征。青办食宿站组形成于浅水环境,为一套碳酸盐岩建造组合,与温泉沟组共同组成洋岛-海山二元结构。早古生代为海相沉积,以纳赤台蛇绿混杂岩(青海省岩石地层归为纳赤台群^[24])最发育,由基性火山岩组合、碳酸盐组合、硅质岩组合、碎屑岩组合和中酸性火山岩组合构成,总体形成于扩张的深海洋盆环境。此外,寒武系沙松乌拉组零星发育,属滨浅海相沉积,为一套浅变质碎屑岩、碳酸盐岩,局部夹中-基性火山岩建造。晚古生代下泥盆统契盖苏组,为陆相碎屑岩和火山岩沉积;石炭系—二叠系浩特略洼组和哈拉郭勒组均为碎屑岩、碳酸盐岩夹火山岩沉积。中生代地层表现为早期海相碎屑岩、碳酸盐岩、火山岩沉积到晚期转化为陆相沉积体系。下三

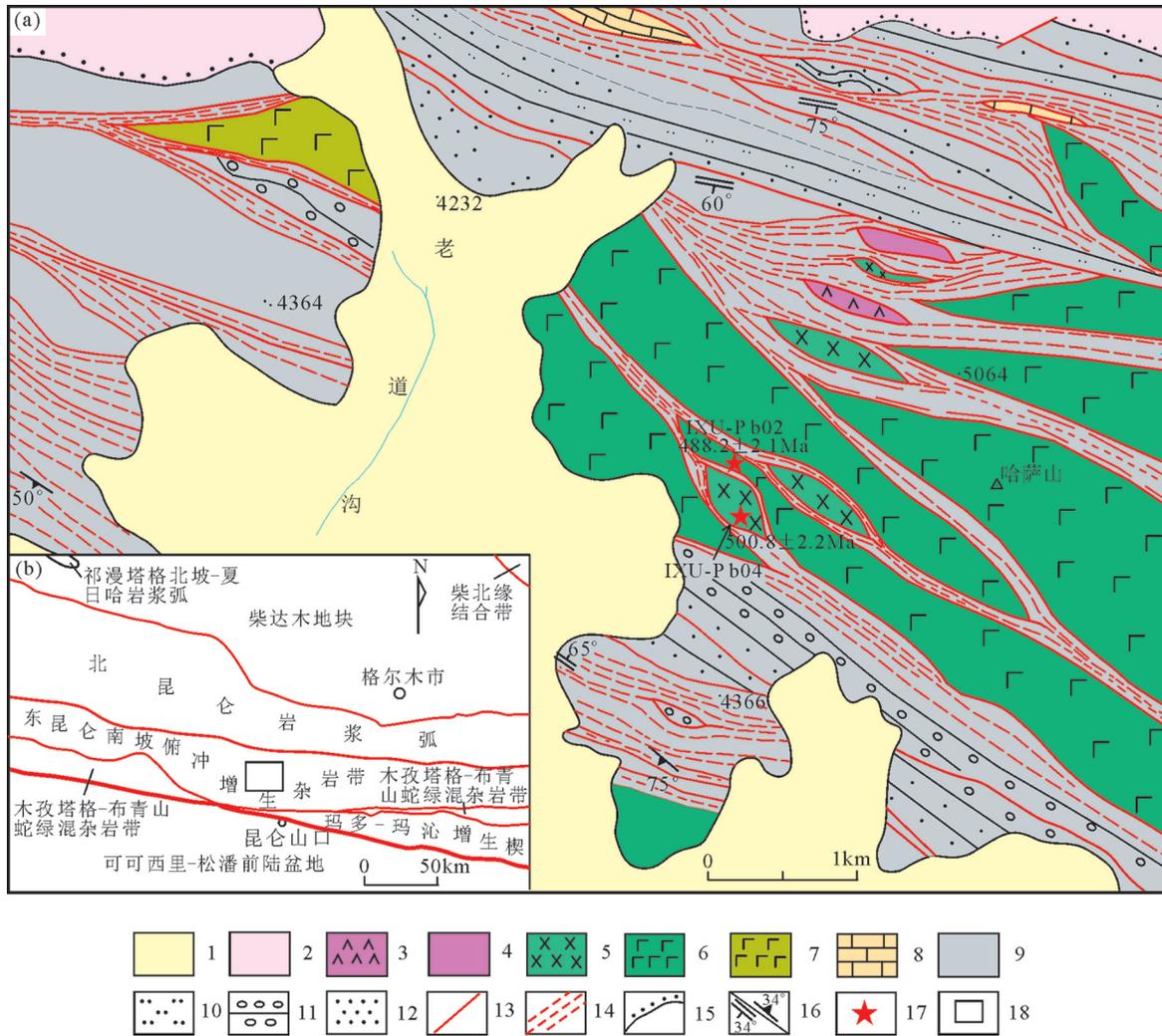


图2 没草沟一带地质简图(a)及大地构造图(b)
(a和b分别据参考文献③和[23]修改)

Fig. 2 Tectonic and geological sketch map of the Meicaogou area

1—第四系松散沉积物;2—三叠系洪水川组砂岩、砾岩、凝灰岩、玄武安山岩;3—辉橄岩;4—橄榄岩;5—辉绿岩;6—块状玄武岩;
7—枕状玄武岩;8—灰岩;9—砂岩+泥岩+千枚岩+硅质岩;10—粉砂岩;11—砾岩;12—砂岩;13—断层界线;14—韧性剪切带或糜棱岩化带;
15—角度不整合;16—面理产状及倾角、片理产状及倾角;17—同位素采样点及年龄;18—研究区

特有的“网状”结构。由于强烈的构造破坏,蛇绿岩的层序不全,岩石普遍发生绿帘石化、绿泥石化等蚀变,并不同程度地产生片理化、千枚岩化和糜棱岩化,发育多条强构造变形带。

本次对该蛇绿岩进行系统剖面测制。该剖面位于老道沟东,起点坐标为 X=0586763、Y=3979666,终点坐标为 X=0587320、Y=3980977,剖面由南向北测制,两端均被第四系覆盖,剖面上主体控制蛇绿岩组合中的变质橄榄岩、玄武岩及少量辉长岩、辉绿岩等

岩石组合,后期构造作用强烈,各个岩性层均为构造接触,总体面理产状南西倾(图3)。

寒武纪没草沟蛇绿构造混杂岩

20. 深灰绿色钠长绿帘石绿泥石片岩(顶部,第四系覆盖)

=== 断层 ===

19. 深灰绿色糜棱岩

=== 断层 ===

18. 灰绿色中细粒闪长岩

=== 断层 ===

图版 I Plate I



a. 没草沟蛇绿岩砂岩构造透镜体; b. 硅质岩与玄武岩接触关系; c. 玄武岩野外露头; d. 枕状玄武岩露头;
 e. 没草沟蛇绿岩中变形砾岩特征; f. 砾岩露头; g. 辉绿岩镜下显微特征(镜下 $10\times 10(+)$);
 h. 辉长岩镜下显微特征(镜下 $10\times 2.5(+)$); Act—阳起石; Pl—斜长石; Hb—普通角闪石

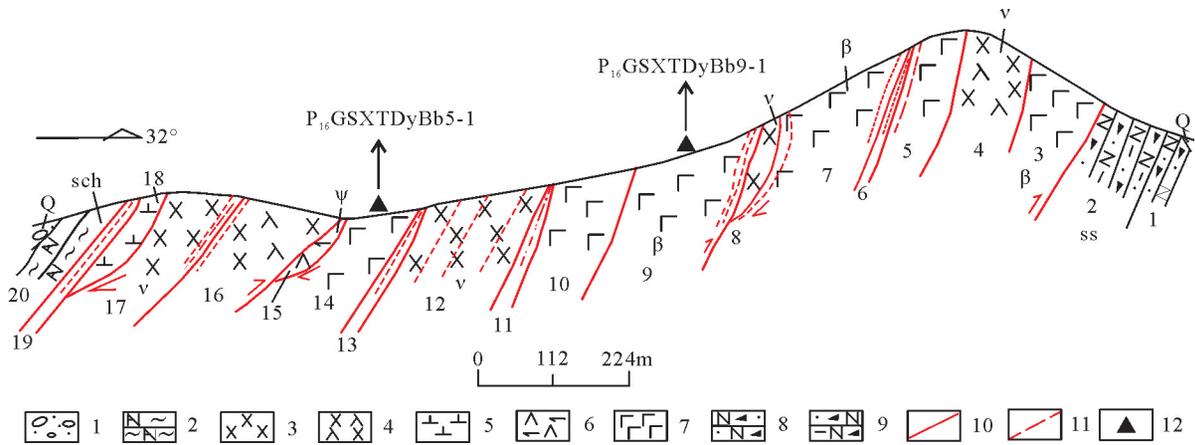


图3 青海省格尔木市老道沟没草沟蛇绿构造混杂岩实测地质剖面

Fig. 3 Measured geological section of the Meicaogou ophiolite tectonic melange in Laodaogou, Golmud City Qinghai Province

1—第四系松散砾石层; 2—钠长绿帘石绿泥石片岩; 3—辉绿岩; 4—辉绿玢岩; 5—闪长岩; 6—单斜辉橄岩;
7—玄武岩; 8—岩屑长石砂岩; 9—泥质岩屑长石砂岩; 10—断层; 11—韧性断层; 12—岩石化学样品采集位置及编号;
Sch—片岩; ss—砂岩; ψ —纯橄榄岩; v —辉长岩; β —玄武岩

17. 深灰绿色碎裂强蚀变阳起石绿帘石化细粒辉长岩

===断层===

16. 浅灰绿色辉绿玢岩

===断层===

15. 深灰绿色强蚀变单斜辉橄岩

===断层===

14. 灰绿色片理化玄武岩

===断层===

13. 深灰色糜棱岩

12. 浅灰绿色基性侵入岩质碎斑岩质糜棱岩

11. 深灰色糜棱岩

===断层===

10. 深浅灰色蚀变玄武岩

===断层===

9. 浅灰色片理化玄武岩

===断层===

8. 深灰色中细粒辉长岩

===断层===

7. 深灰绿色阳起石化玄武岩

===断层===

6. 深灰绿色糜棱岩

===断层===

5. 深灰绿色阳起石化玄武岩

===断层===

4. 深灰绿色阳起石化辉绿玢岩

===断层===

3. 深灰绿色碎裂岩化玄武岩

===断层===

2. 浅灰绿色中细粒泥质岩屑长石砂岩

1. 深灰色片理化中细粒泥质胶结长石岩屑杂砂岩(未见底, 被第四系覆盖)

2.2 岩石学特征

由上述剖面可见, 没草沟蛇绿岩以基性玄武岩为主, 此外有橄辉岩、辉橄岩、角闪橄榄岩、菱镁滑石片岩、辉长岩和席状岩墙群辉绿岩、辉绿玢岩、硅质岩等组成。与完整的蛇绿岩套层序比较^[25], 本区岩石组合较完整, 但层序混乱。

(1) 超镁铁质岩类

该类岩石稀少, 主要分布于哈萨山一带。露头规模小, 多呈构造透镜状产出, 主要为辉橄岩、橄榄岩、蛇纹岩、阳起石岩、菱镁滑石片岩等。此外, 哈萨山一带路线调查中偶见极少量的纤维状阳起石片岩。

帘阳起石岩: 黄绿色, 粒状、柱状变晶结构, 具定向构造。矿物成分为阳起石(53%)、绿帘石(30%)、钠长石(10%)、少量金属矿物等。阳起石为浅绿色, 形态呈柱状、少数呈纤维状; 绿帘石呈他形粒状晶, 分布不均匀; 钠长石呈微粒状的他形粒状晶。岩石中网状裂纹较发育, 沿裂隙充填有方解石和绿帘石的集合体。

橄榄辉岩: 灰绿色, 变余中细粒结构, 块状构造。岩石矿物以辉石(70%~85%)为主, 橄榄石(11%~23%)次之, 含少量的阳起石(2%)、不透明金

属矿物(3%~4%)等。辉石呈半自形粒状晶,均蚀变为绿泥石和阳起石,具碳酸盐化蚀变,多分布于辉石边缘;绿泥石呈隐晶状和细小鳞片状集合体;阳起石呈针状集合体;橄榄石呈不规则粒状晶,具明显的透闪石化、碳酸盐化蚀变,分布于辉石间隙;金属矿物呈半自形-自形粒状晶,多充填于辉石间隙,少数分布于辉石表面。

纤闪石化蛇纹石化辉橄岩:灰绿色,变余中粒结构、纤状变晶结构。岩石由纤维状蛇纹石(50%~65%)、纤闪石(20%~35%)组成,并含少量透闪石(约2%)及变余辉石(<10%)、磁铁矿(<3%)。蛇纹石呈淡绿色、显微纤维状;纤闪石为无色-淡绿色、纤维状-长柱状,杂乱分布,构成毡状结构;透闪石粒度多为0.22~0.55mm;变余辉石呈淡褐色;磁铁矿多呈自形-不规则状。

角闪橄橄榄岩:灰绿色,半自形粒状结构,矿物由橄榄石(56%)、普通角闪石(40%)、辉石(3%)及少量磁铁矿、铬铁矿(10%)组成。橄榄石已全部蛇纹石化;普通角闪石部分次闪石化或绿泥石化,常分布于橄榄石周围;辉石全部次闪石化。

菱镁滑石片岩:淡绿色,斑状变晶结构。变斑晶为菱镁矿,菱镁矿斑晶呈近等轴粒状,少数为半自形菱形状,含量15%~20%;基质为鳞片变晶结构,几乎全由滑石组成。滑石为显微鳞片状,含量约80%~85%。此外,岩石含有少量的磁铁矿。据该岩石岩相学特征,其原岩应为蛇纹岩。

阳起石绿泥石化含角闪石辉石岩:暗墨绿色,变余半自形柱粒状、变余中细粒半自形结构,块状构造。矿物以辉石(65%~68%)为主,含少量普通角闪石(4%)和次生蚀变矿物绿泥石(11%~18%)、阳起石(7%~21%)及不透明金属矿物(2%~3%)。辉石呈短柱状和半自形粒状晶,为单斜辉石;普通角闪石呈粒状和他形粒状,具有较强的绿泥石化、绿帘石化、阳起石化蚀变,分布于辉石之间,色泽呈浅褐色;次生矿物为绿泥石和阳起石,主要填于辉石和角闪石间隙;阳起石呈纤维状、放射状、针状集合体。不透明矿物呈自形-半自形粒状晶。

(2) 镁铁质岩类

本类岩石少量发育,仅见于老道沟北东一带,岩石类型单一。

强蚀变阳起石绿帘石化细粒辉长岩:深灰绿

色,变余辉长结构并存(图版 I-h),块状构造。矿物由单斜辉石、辉石假象和少量普通角闪石、磷灰石及不透明金属矿物组成。辉石含量为35%,呈短柱状;斜长石含量为50%,呈半自形板状和半自形粒状晶假象;普通角闪石含量为2%,呈短轴状和他形粒状晶,具绿帘石化、阳起石化蚀变,在岩石中局部分布;磷灰石呈细柱状;不透明金属矿物呈微粒状、粉末状。

(3) 席状岩墙(墙)

岩石类型为辉绿岩,见于剖面中,多呈岩块或透镜状产出。原始产状已面貌全非,据岩石岩性推断,该类型岩石很可能组成了蛇绿岩中基性岩席或岩墙。

强帘石化阳起石化辉绿岩:灰绿色,镜下呈变余辉绿结构(图版 I-g),块状构造。矿物成分为斜长石(40%)、辉石(56%)及少量金属矿物、方解石脉(4%)。斜长石呈柱状晶,几乎全部被帘石交代,保留其隐晶形态,杂乱分布;辉石全部被阳起石集合体交代。金属矿物少量。

强帘石化阳起石化辉长辉绿岩:浅灰绿色,镜下为变余辉长辉绿结构、显定向构造。岩石由辉石(60%)、斜长石(40%)及少量不透明矿物组成。辉石全部被阳起石集合体交代,呈单晶显微粒状,部分假象中含强蚀变的柱状斜长石嵌晶,显嵌晶含长结构特征;斜长石呈半自形粒状晶或柱状晶,具强帘石化、绢云母化蚀变;阳起石为斜长石假象和其变化的产物。

(4) 基性火山熔岩

以玄武岩为主,可见少量枕状玄武岩。野外露头多以黄绿色、深灰绿色、灰绿色为主。局部地段由于后期构造改造作用,呈糜棱岩化岩石,但仍显玄武岩特征。

深灰绿色枕状玄武岩:灰绿色、深灰绿色,隐晶质结构,块状构造、枕状构造(图版 I-d)。斑晶由辉石假象和橄榄石假象组成,被碳酸盐及绿泥石集合体取代,斑晶大小在0.55~1.09之间,含量约2%,基质具填间结构,成分为斜长石(62%)、辉石(1%)、橄榄石(少量)。岩石经历了较强的绿帘石化、阳起石化热液交代蚀变作用。

变拉斑玄武岩:灰绿色,变余拉斑玄武结构。矿物由斜长石(40%~45%)、阳起石(纤闪石)(5%~35%)、绿泥石(10%~15%)、绿帘石、钛磁铁矿

($<5\%$)等组成。斜长石呈板条骸晶状。阳起石(纤闪石)呈纤维状,集合体呈团块状。绿泥石呈微鳞片状-隐晶状,分散在纤闪石、斜长石晶间,部分则呈团块状、脉状。钛磁铁矿(白钛矿)多呈粉尘状,或与帘石类矿物集成细小的团块状,蚀变后形成白钛矿。

阳起石化、绿帘石化玄武岩:黄绿色,纤状、粒状变晶结构,块状构造。矿物成分为绿帘石(44%)、阳起石(30%)、斜长石(20%)、金属矿物等。绿帘石呈他形粒状变晶,分布不均匀。阳起石呈纤维状变晶,多杂乱分布在岩石中。斜长石呈柱状,具帘石化蚀变,杂乱分布在阳起石、绿帘石集合体中。

灰绿色玄武岩质糜棱岩:岩石为糜棱结构、斑状结构,定向构造,基质具填间结构。岩石由斑晶和基质两部分组成。因韧性动力变质作用的参与,岩石破碎,其结构被破坏,现由碎斑(40%)和基质(57%)及裂隙充填物(3%)组成。其中碎斑由玄武岩块组成,形态呈透镜状,少数呈眼球状,大小 $1.4\text{mm}\times 0.60\text{mm}\sim 1.68\text{mm}\times 3.20\text{mm}$,依长轴方向断续、定向排列,显糜棱岩的结构特征;基质成分为同岩块成分的碎粒物质(19%)、绿帘石(15%)、绿泥石(20%),同时伴生有次生方解石、石英等。它们的集合体在碎斑间或绕过碎斑定向分布,显示良好的流动性。

(5) 硅质岩

没草沟蛇绿混杂岩中深水-半深水沉积物单元由多个构造岩块组成,岩石组合为变质硅质岩-碎屑岩等,硅质岩代表深水环境洋壳上部的沉积。

青灰色玉髓质硅质岩:主要见于黑刺沟、老道沟一带(图版 I-b)。岩石为隐晶-纤维状结构,块状构造,由玉髓(93%)和砂屑(7%)、绢云母及白云石组成。玉髓呈隐晶-纤维状集合体,在岩石中均匀分布,其中混入少量的砂屑(石英、白云母等),砂屑形态呈次圆状。岩石中分布有细小鳞片状绢云母,略具定向性;白云石呈半自形-他形粒状晶分布于玉髓间隙。

蛋黄色含白云石玉髓质硅质岩:纤维状结构,块状构造。岩石矿物由纤维状玉髓集合体(90%)和自生石英(2%)组成,其中混入少量自形-半自形粒状的白云石(6%)。岩石中见有不规则状细石英脉分布,脉宽 $0.05\sim 0.16\text{mm}$ 。

3 样品采集及测试分析方法

本文对24件蛇绿岩样品进行了岩石地球化学研

究。其中1~7号为超镁质岩石,包括辉橄岩、蛇纹岩、橄橄岩。8~9号为辉长岩,10~13号为辉绿岩、辉绿玢岩,14~24号为玄武岩。分别采集了玄武岩块(IX02)和辉长岩(IX04)大样供LA-ICP-MS 锆石U-Pb 测年(均大于30kg的新鲜样品)。主量、微量和稀土元素含量测试均在武汉矿产资源监督检测中心完成。主量元素使用Phillips 4400X-荧光光谱仪测试,FeO用容量滴定法测定,烧失量(LOI)通过对样品加热至 1000°C 后1h称量其重量变化获得。微量和稀土元素采用等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。标样采用GSR1、GSR2和GSR3,主量元素分析误差小于5%,微量元素分析误差优于10%。

锆石挑选在河北省廊坊地质调查研究院选矿实验室完成。首先将用于测年的岩石样品经过粉碎和重选,分选出晶形较好、纯度较高的锆石,然后在双目镜下挑选出锆石样品。用环氧树脂将约250粒锆石和标样固定成圆饼状,用不同型号砂纸和磨料将锆石磨去一半并抛光、镀金。由天津地质矿产研究所进行锆石单矿物制靶,并进行反射光及阴极发光(CL)图像采集,利用激光等离子体质谱法(LA-ICP-MS)进行测试。样品测试仪器设备为NEPTUNE,在温度 22°C 、湿度38%的环境下进行测试,数据处理软件为Glitter4.4,年龄计算、制作图形软件为Isoplot3.23,置信度为95%^[26]。测定时使用国标样GJL为参考物质。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素

由表1可以看出,没草沟蛇绿岩从辉橄岩→辉长岩→基性玄武岩,岩石化学成分总体呈现有规律的变化。岩石 SiO_2 含量介于 $33.49\%\sim 51.58\%$ 之间,变化范围不大,所有样品具有明显低P、Ti的特点。 P_2O_5 含量为 $0.004\%\sim 0.28\%$,平均为 0.15% 。超镁铁质岩 TiO_2 含量相对偏低($0.003\%\sim 0.76\%$,平均 0.12%),辉长岩、辉绿岩和辉绿岩 TiO_2 含量为 $0.62\%\sim 2.46\%$,含量趋于增高趋势,玄武岩 TiO_2 含量($1.37\%\sim 2.17\%$)变化不大。各组分大部分岩石中FeO含量高于 Fe_2O_3 ,超镁铁质岩个别样品FeO低于 Fe_2O_3 , H_2O 含量普遍较高($0.84\%\sim 11.80\%$),平均含量为 4.64% ,与镜下鉴定一致,表明岩石遭受过较强的蛇纹石化、绿帘石化蚀变及变质作用。

辉橄岩 SiO_2 含量较低,在 $33.49\%\sim 43.82\%$ 之

表 1 没草沟蛇纹岩主量元素分析结果

Table 1 Analyses of major elements of the Meicaogou ophiolite

序号	岩石名称	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	CO ₂	总计	σ	TFeO/MgO
1		6402-1-3*	40.09	0.76	8.34	4.93	7.50	0.18	23.72	5.92	0.13	0.07	0.10	7.97	0.05	99.76	0.07	0.50
2		P ₁₃ Bb10-1	33.49	0.003	0.04	5.65	0.88	0.16	39.70	0.32	0.10	0.01	0.004	9.78	4.42	99.30	0.00	0.15
3	辉橄岩	P ₁₃ Bb11-1	43.11	0.008	0.42	4.20	2.48	0.10	36.63	0.14	0.13	0.03	0.004	10.79	0.13	99.11	0.01	0.17
4		P ₁₃ Bb14-1	43.82	0.014	0.05	3.27	2.15	0.10	37.96	0.06	0.12	0.01	0.007	11.68	0.09	99.63	0.00	0.13
5		P ₁₃ Bb15-1	42.60	0.005	0.17	4.85	2.72	0.10	36.88	0.05	0.13	0.02	0.005	11.80	0.04	99.37	0.01	0.19
6	蛇纹岩	I-17P ₂ GS1-1#	44.30	0.062	0.25	0.29	5.83	0.09	37.88	1.49	0.12	0.04	0.019	4.09	-	99.46	0.01	0.16
7	橄榄岩	I-17P ₂ GS3-1#	40.78	0.01	0.18	5.24	1.56	0.12	38.49	0.96	0.07	0.22	0.01	0.84	-	99.48	0.03	0.16
8	辉长岩	I-17GS1001#	46.80	1.95	12.19	6.18	10.10	0.24	5.47	11.12	2.41	0.40	0.28	0.96	-	99.10	1.62	2.86
9		IXGS04	51.33	0.62	14.57	1.86	6.05	0.16	7.19	7.90	3.61	0.30	0.10	3.23	2.90	99.82	1.48	1.07
10		P ₃ DY10-1	48.72	1.04	13.37	2.44	8.05	0.22	9.68	8.17	2.77	0.75	0.11	3.79	0.68	100.13	1.68	1.06
11	辉绿岩	P ₃ DY12-1	49.19	1.00	13.79	2.48	6.30	0.20	8.14	10.18	2.8	0.83	0.11	3.20	1.61	100.20	1.66	1.05
12		6402-3-6*	48.62	1.43	16.18	3.43	6.37	0.16	6.15	10.82	3.12	0.32	0.21	2.81	0.22	99.84	1.75	1.54
13	辉绿玢岩	I-17Gs414#	48.37	2.46	13.58	0.64	9.25	0.20	9.80	7.70	3.00	0.86	0.17	3.10	-	99.13	2.19	1.00
14		P ₃ DY1-1	48.39	1.94	12.94	2.99	8.45	0.18	4.47	10.16	1.45	0.80	0.31	3.68	3.95	100.06	0.63	2.49
15		P ₃ DY2-1	45.17	1.58	14.30	3.43	8.65	0.22	5.61	11.45	2.38	0.70	0.22	3.55	2.39	99.93	2.08	2.09
16		IXGS02	50.69	1.59	14.70	3.53	5.80	0.18	5.62	8.97	3.91	0.67	0.16	2.64	1.35	99.81	2.31	1.60
17		P ₁₆ GS5-1	45.84	1.58	16.97	3.78	7.35	0.19	6.24	12.02	1.83	0.33	0.20	3.39	0.04	99.76	1.10	1.72
18		P ₁₆ GS9-1	46.98	1.37	17.22	2.56	8.00	0.17	6.62	8.12	3.59	0.28	0.16	3.88	0.77	99.72	2.58	1.56
19	玄武岩	P ₃ GS4-1	51.58	1.70	14.91	2.41	8.60	0.17	5.29	6.03	3.62	0.68	0.25	3.55	0.99	99.78	1.83	2.04
20		I-17P ₂ GS9-1#	41.69	2.17	11.78	2.40	7.36	0.21	3.58	15.22	2.98	0.36	0.24	2.31	-	99.30	3.29	2.66
21		I-17Gs1008#	46.63	1.60	14.52	3.29	8.46	0.21	7.57	9.18	3.40	0.56	0.17	1.94	-	99.53	2.97	1.51
22		BP ₁₅ -72-1*	47.53	1.71	13.83	1.83	10.12	0.17	5.09	8.29	3.46	0.86	0.20	3.97	2.72	99.78	2.67	2.31
23		BP ₁₅ -72-2*	47.18	1.76	15.28	2.00	9.88	0.20	6.49	8.57	2.98	0.34	0.25	4.25	0.58	99.76	1.83	1.80
24		BP ₁₅ -75-2*	47.08	1.91	12.64	2.05	10.05	0.22	6.28	9.88	2.47	0.04	0.23	4.22	2.72	99.79	0.95	1.89

注: *样品据参考文献②, #样品据参考文献⑤, 其余样品为本次研究采集

间,属超基性岩。Al₂O₃含量总体偏低,为0.04%~8.34%。Fe₂O₃含量为3.27%~5.65%,FeO含量为0.88%~7.50%,MgO含量(23.72%~39.70%)相对较高,K₂O含量(0.01%~0.07%)偏低。蛇纹岩、橄榄岩SiO₂含量变化不大,为40.78%~44.30%之间,TiO₂和Al₂O₃含量均较低,分别介于0.01%~0.062%和0.18%~0.25%之间;Fe₂O₃为0.29%~5.24%,FeO为2.15%~2.72%,K₂O含量为0.04%~0.22%。在Al₂O₃-CaO-MgO图解(图4-b)中,3类岩石投点结果均显示出超镁铁质岩的特征^[27]。

变质基性岩包括辉长岩、辉绿岩、辉绿玢岩。6个样品SiO₂含量为46.80%~51.33%,平均为48.83%;Fe₂O₃含量为0.64%~6.18%,FeO含量为6.30%~10.10%;而TiO₂、Al₂O₃含量相比超镁铁质岩有所增加;MgO含量减少,分别为0.62%~2.46%、12.19%~

16.18%和5.47%~9.80%;CaO含量为7.70%~11.12%。AFM图解(图4-a)显示,岩石为拉斑玄武岩系列或钙碱性系列;在ACM图解(图4-b)中,样品点较集中,落于镁铁堆积岩区或靠近该区域,反映岩浆在岩浆房及侵入过程中存在分离结晶作用。

变质玄武岩SiO₂含量在41.69%~51.58%之间;FeO、Fe₂O₃和MgO含量较高,分别为5.80%~10.05%、1.83%~7.78%和3.58%~7.57%;Na₂O>K₂O,其中Na₂O含量变化于1.45%~3.91%之间,总体显示富Na的特征,表明与俯冲作用密切相关^[28]。K₂O含量为0.04%~0.86%,TiO₂含量介于1.37%~2.17%之间,平均1.72%,与洋脊拉斑玄武岩TiO₂含量(1.5%)接近^[29]。在AFM图解(图4-a)中,样品点集中在拉斑玄武岩系列区,少部分具有碱性玄武岩特征;在ACM图解(图4-b)中,大多数样品点落于拉

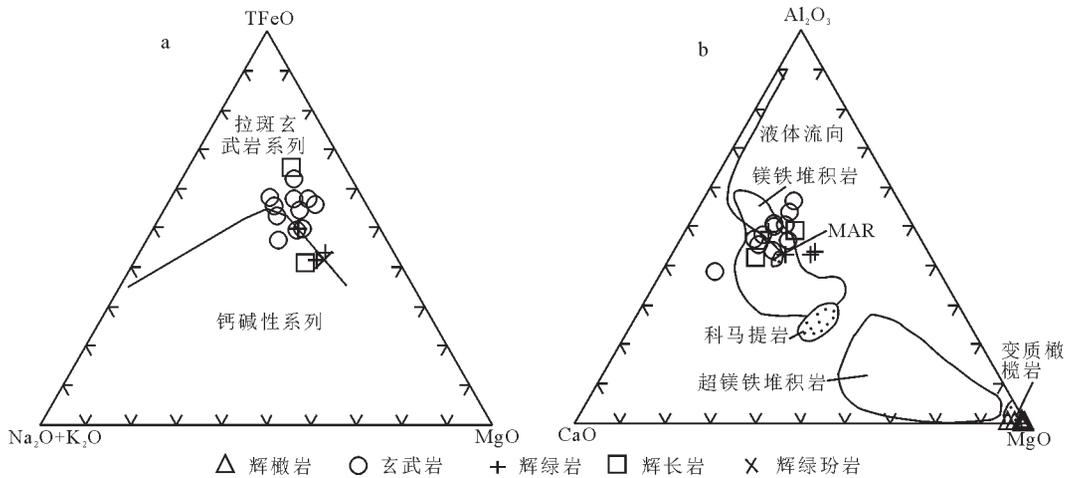


图4 没草沟蛇绿岩AFM(a)和ACM图(b)

Fig. 4 AFM(a) and ACM(b) diagrams of the Meicaogou ophiolite

斑玄武岩系列区。

以上特征及图解显示,没草沟蛇绿岩从辉橄岩、蛇纹岩、橄榄岩→辉绿岩→辉长岩→玄武岩,属同构造环境下不同岩石组合的产物,具同源演化趋势,有 SiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 、 Na_2O 含量逐渐增高, MgO 逐渐降低的特征。

4.2 稀土元素

没草沟蛇绿岩辉橄岩、蛇纹岩、橄榄岩稀土元素总量偏低(表2), $\Sigma\text{REE}=1.36\times 10^{-6}\sim 29.35\times 10^{-6}$,接近于或高于球粒陨石值 5.54×10^{-6} [30]。轻稀土元素LREE含量($1.23\times 10^{-6}\sim 20.11\times 10^{-6}$)大于重稀土元素HREE含量($0.13\times 10^{-6}\sim 9.24\times 10^{-6}$),属轻稀土元素富集。 $(\text{La}/\text{Yb})_N=0.67\sim 37.75$, δEu 为0.58~1.82,显示轻稀土元素略有富集,反映物源与地幔岩浆成分相似,且是较低或中等程度部分熔融的产物。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图5-a)中,曲线总体呈平坦型,具略右倾的轻稀土元素弱富集特征,与世界上科马提岩的稀土元素配分曲线分布型式相似[31]。

变质基性岩为辉长岩、辉绿岩和辉绿玢岩,其中辉长岩 $\Sigma\text{REE}=68.90\times 10^{-6}\sim 71.00\times 10^{-6}$,辉绿岩 $\Sigma\text{REE}=44.69\times 10^{-6}\sim 115.58\times 10^{-6}$ 。岩石LREE和HREE含量分别在 $28.26\times 10^{-6}\sim 89.67\times 10^{-6}$ 和 $12.29\times 10^{-6}\sim 25.91\times 10^{-6}$ 之间, δEu 为0.95~0.99,基本无异常, $(\text{La}/\text{Yb})_N>1$,为1.05~3.91,显示轻稀土元素略富集,反映物源与地幔岩浆的成分相似,且

为中等程度部分熔融的产物。稀土元素配分模式图总体具有与玄武岩相似的平坦富集型曲线(图5-c)。这些特征反映,当时岩浆房中岩浆作用较复杂,出露的辉长岩、辉绿岩及辉绿玢岩属岩浆房不同程度结晶分离的产物。

蛇绿岩中玄武岩稀土元素总量偏低,除P5GS5-1样品 ΣREE 较高(122.90×10^{-6}),其余样品 ΣREE 在 $72.04\times 10^{-6}\sim 108.45\times 10^{-6}$ 之间。 $(\text{La}/\text{Yb})_N=1.22\sim 1.85$,反映岩石轻稀土元素具较弱的富集,但总体分馏不明显。 δEu 在0.69~1.17之间,铕具弱负异常或基本无异常。稀土元素配分模式图中曲线呈近于平坦或略右倾的轻稀土元素富型(图5-c),分布模式与Frey等划分的正常洋中脊拉斑玄武岩的稀土元素配分型式相似[31]。

上述特征表明,没草沟蛇绿岩由变质橄榄岩(辉橄岩、蛇纹岩)向辉长岩、辉绿岩及玄武岩演化,稀土元素丰度渐次增高,反映各单元在成因上具紧密相关性。

4.3 微量元素

由表2可以看出,没草沟蛇绿岩变质辉橄岩类样品Cr、Ni含量较高,介于 $670.0\times 10^{-6}\sim 2565\times 10^{-6}$ 和 $979.0\times 10^{-6}\sim 2536\times 10^{-6}$ 之间。其中Cr含量是原始玄武质岩浆($\text{Cr}>400\times 10^{-6}$ [32])的2~5倍,其余元素含量较低。在微量元素原始地幔标准化图解(图5-b)上,总体富集Th、Ta、Zr、Hf,相对亏损Ba、Nb、K、Sr、Y,尤其亏损Nb元素,曲线总体呈近“平坦

表 2 没草沟蛇绿岩微量和稀土元素分析结果

Table 2 Content of trace elements and REE of the Meicaogou ophiolite

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
La	2.98	0.43	1.42	0.55	0.71	0.56	0.40	11.46	10.67	4.27	5.31	16.68	6.36	12.18	8.78	5.47	9.55	6.87	10.42	8.38	8.43	8.87	8.94	9.24	
Ce	7.58	2.72	4.10	2.26	3.55	0.46	0.68	26.17	23.29	10.13	12.04	36.40	15.80	29.50	21.30	13.51	25.15	19.04	24.45	24.17	15.51	21.69	21.63	22.28	
Pr	1.25	0.19	0.43	0.11	0.24	0.05	0.09	3.69	3.36	1.71	1.89	5.55	2.24	4.69	3.22	2.42	3.81	2.74	3.85	3.75	2.39	3.46	3.53	3.62	
Nd	5.90	0.93	1.68	0.34	0.94	0.08	0.35	4.06	14.91	8.48	9.30	23.61	10.84	22.77	15.95	12.63	18.27	13.51	18.71	18.19	12.52	15.43	16.59	17.20	
Sm	1.67	0.28	0.36	0.07	0.21	0.05	0.10	4.12	3.35	2.76	2.83	5.68	3.20	6.51	4.71	3.76	4.87	3.65	5.45	5.24	4.41	4.44	4.60	4.70	
Eu	0.73	0.07	0.30	0.07	0.12	0.07	0.03	1.45	1.03	0.91	0.97	1.75	1.18	1.62	1.52	1.21	1.66	1.49	1.55	1.69	1.63	1.33	1.55	1.68	
Gd	2.22	0.32	0.31	0.05	0.19	0.05	0.08	4.85	3.18	3.66	3.46	6.71	4.12	7.83	5.74	4.96	5.69	4.11	6.69	6.55	6.11	5.63	5.54	5.68	
Tb	0.39	0.06	0.07	0.05	0.08	0.03	0.08	0.01	0.86	0.57	0.67	0.63	1.13	0.72	1.39	1.06	0.92	1.14	0.80	1.17	1.19	1.13	0.98	1.02	
Dy	2.59	0.50	0.35	0.04	0.17	0.04	0.08	5.34	3.41	4.57	4.27	7.16	4.62	9.06	6.90	5.94	6.87	4.90	7.80	7.22	7.41	6.32	6.37	5.88	
Ho	0.54	0.13	0.07	0.01	0.03	0.00	0.07	1.09	0.69	1.01	0.87	1.47	0.96	1.84	1.44	1.23	1.38	0.96	1.54	1.39	1.59	1.23	1.29	1.25	
Er	1.50	0.40	0.22	0.02	0.09	0.01	0.05	3.60	2.04	2.91	2.55	4.08	2.88	5.24	4.04	3.44	4.01	2.76	4.37	4.26	4.80	3.29	3.65	3.36	
Tm	0.25	0.06	0.03	0.00	0.03	0.01	0.03	0.02	0.01	0.51	0.29	0.44	0.38	0.66	0.43	0.76	0.59	0.50	0.60	0.42	0.64	0.64	0.73	0.53	0.52
Yb	1.52	0.43	0.21	0.01	0.19	0.08	0.01	0.04	3.31	1.84	2.75	2.28	4.10	2.69	4.47	3.53	3.02	3.49	2.51	3.87	4.16	4.68	3.24	3.60	3.55
Lu	0.23	0.07	0.02	0.08	0.03	0.01	0.03	0.02	0.01	0.49	0.27	0.42	0.30	0.60	0.40	0.59	0.44	0.42	0.44	0.33	0.48	0.60	0.70	0.52	0.54
Y	12.61	3.53	2.22	0.22	0.83	0.60	1.50	26.70	18.19	24.17	22.11	33.42	23.40	44.79	35.88	32.59	35.97	26.01	39.88	47.7	56.50	33.36	30.85	30.59	
ΣREE	29.35	6.60	9.35	3.51	6.35	1.36	1.95	71.00	68.90	44.69	47.08	115.58	56.44	108.45	79.22	92.03	122.9	90.1	90.99	87.43	72.04	76.96	79.40	80.51	
LREE	20.11	4.62	8.07	3.34	5.73	1.23	1.65	50.95	56.61	28.26	32.34	89.67	39.62	77.27	55.48	39.0	69.31	47.3	64.43	61.42	44.89	55.22	56.84	58.72	
HREE	9.24	1.98	1.28	0.17	0.62	0.13	0.30	20.05	12.29	16.43	14.74	25.91	16.82	31.18	23.74	20.43	23.62	16.79	26.56	26.01	27.15	21.74	22.56	21.79	
(La/Yb) _N	1.32	0.67	4.56	19.52	5.50	37.75	6.74	2.33	3.91	1.05	1.57	2.74	1.59	1.84	1.68	1.22	1.84	1.85	1.82	1.36	1.21	1.85	1.67	1.75	
δEu	1.16	0.74	0.71	0.58	1.13	1.82	0.99	0.99	0.95	0.88	0.95	0.87	0.99	0.69	0.89	0.86	0.96	1.17	0.78	0.88	0.96	0.81	0.94	0.99	
Sr	16.00	36.86	6.61	9.56	6.17	6.00	20.00	62.04	0.19	109	169	177.0	175	253.1	285.7	274.13	17.02	37.17	4.22	58.03	34.01	55.0	270	245	
Rb	3.00	0.91	0.88	1.71	0.96	-	-	3.00	5.59	9.98	14.04	5.40	7.80	12.67	7.98	13.75	6.32	5.45	8.20	3.50	5.90	17.00	4.70	1.10	
Ba	19.00	13.31	23.80	6.91	10.13	9.02	4.00	65.0	78.0	165.2	73.12	181.3	88.00	97.7	98.06	137.61	132.94	8.51	102.31	75.9	49.1	38.00	217.08	1.00	54.00
Th	0.58	0.93	0.26	0.58	0.23	1.00	1.00	1.00	1.93	0.18	0.42	3.30	1.00	1.30	0.81	0.79	1.49	0.86	0.48	0.64	1.00	0.55	0.58	0.76	
Ta	0.14	0.03	0.04	0.12	0.06	-	-	1.40	0.50	0.62	0.50	0.72	0.50	0.93	1.27	0.42	1.29	0.81	0.79	0.50	0.60	0.24	0.32	0.65	
Nb	2.50	0.20	0.30	0.57	0.33	0.08	0.35	4.06	5.02	3.43	4.69	7.10	3.05	10.75	8.50	4.02	9.54	6.91	7.82	10.80	14.20	7.30	8.30	8.70	
Zr	125.0	4.00	4.70	3.80	5.50	26.00	10.00	116.06	4.70	68.30	74.4	259.0	90.50	199.6	147.5	113	158.11	112.9	165.6	177	159	179.0	185	216.0	
Hf	3.10	0.13	0.19	0.21	0.21	0.50	0.40	4.30	3.53	3.30	3.30	6.90	3.10	6.40	6.20	4.18	5.56	4.11	5.80	4.10	5.70	4.80	4.90	5.70	
Cr	1173	2565	2390	1494	2201	589	670	187	212.8	234.8	303.8	161.0	114	193.6	229.7	136.9	216.6	128.9	224.3	156	104	126	217	94.00	
Ni	979	2192	2306	1716	2536	-	-	53.70	72.26	71.38	112.9	55.00	93.60	76.73	73.05	53.87	66.06	114.76	138.2	404.1	406.00	81.00	81.00	58.00	

型”,显示没草沟蛇绿岩中的超基性岩代表了一种近原始到轻微富集地幔岩的特征^[33]。

辉长岩、辉绿岩及辉绿玢岩,过渡族元素中Cr、Ni含量较变质橄榄岩明显下降,分别为 $114.0 \times 10^{-6} \sim 303.8 \times 10^{-6}$ 和 $53.70 \times 10^{-6} \sim 112.9 \times 10^{-6}$,其余元素含量均有不同程度的增加,Rb、Sr、Ba的含量分别为 $3.00 \times 10^{-6} \sim 14.04 \times 10^{-6}$ 、 $40.19 \times 10^{-6} \sim 620.0 \times 10^{-6}$ 和 $78.00 \times 10^{-6} \sim 181.30 \times 10^{-6}$,放射性元素Th含量与变质橄榄岩相当,为 $0.42 \times 10^{-6} \sim 3.3 \times 10^{-6}$ 。在微量元素原始地幔标准化图解(图5-d)中,曲线总体呈

近于平坦型-轻微隆起型,与超镁铁质岩近似,Rb、Ba、Th、Nb、Sr元素富集,而La、Y、Yb等元素亏损,其蛛网曲线图特征与Holm(1985)划分的大陆拉斑玄武岩有相似性^[31]。

变质玄武岩相比其他岩石,Cr、Ni元素含量明显减少,分别为 $104.0 \times 10^{-6} \sim 229.7 \times 10^{-6}$ 和 $41.40 \times 10^{-6} \sim 114.70 \times 10^{-6}$,大离子亲石元素Rb、Sr、Ba含量渐次增加,分别为 $1.10 \times 10^{-6} \sim 17.00 \times 10^{-6}$ 、 $23.37 \times 10^{-6} \sim 334.0 \times 10^{-6}$ 和 $38.00 \times 10^{-6} \sim 217.0 \times 10^{-6}$ 。放射性元素Th含量为 $0.48 \times 10^{-6} \sim 1.49 \times 10^{-6}$ 。在原始地幔标准化

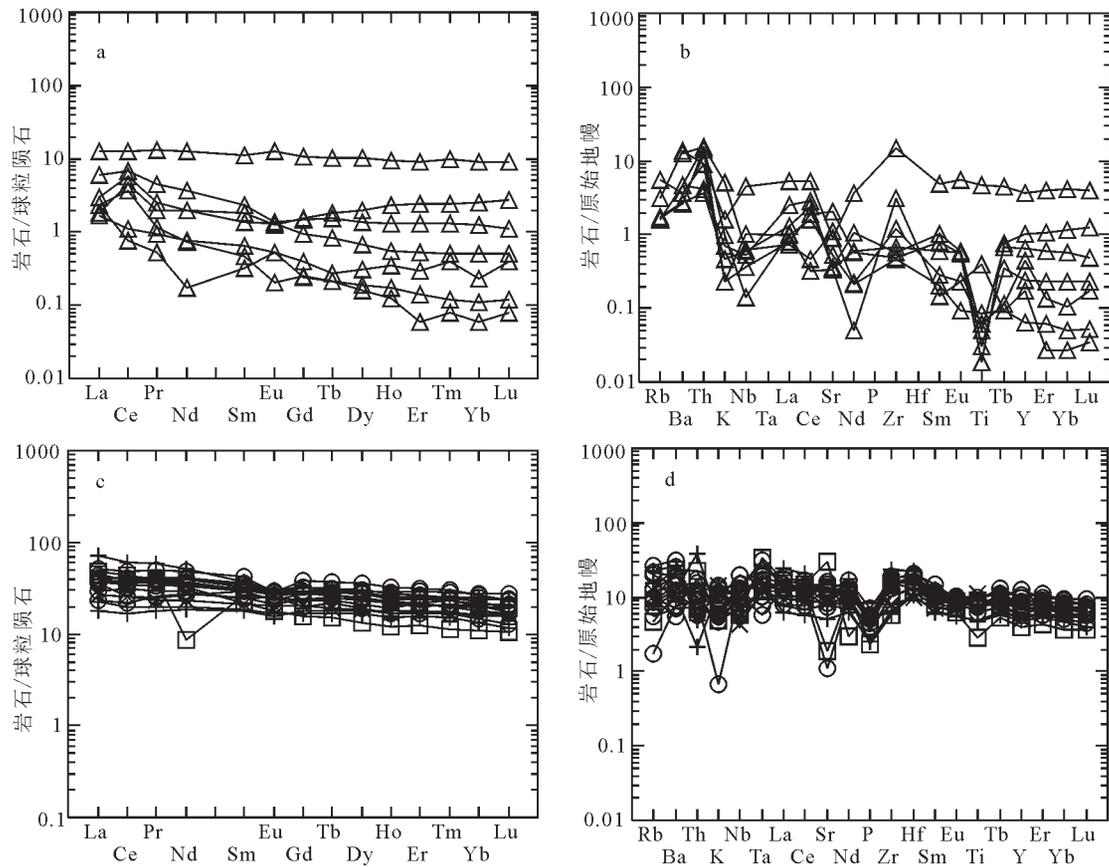


图5 没草沟蛇绿岩稀土元素配分图和微量元素蛛网图
(图例同图4)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and spidergram of trace elements of the Meicaogou ophiolite

微量元素蛛网图解(图5-d)中,所有样品表现为Rb、Th、Nb、K等元素曲线呈平坦型,具明显富集,而其他元素不同程度亏损,曲线分布特征与正常洋中脊玄武岩的微量元素特征相似^[34]。

5 蛇绿岩锆石U-Pb年龄

本次对没草沟蛇绿岩岩石组合类型、赋存状态、围岩接触关系等进行系统研究,获得了丰富而翔实的地质资料,同时为准确厘定蛇绿岩的确切形成时代,在路线调查中分别采集玄武岩(IXU-Pb02)和辉长岩(IXU-Pb04)2个样品进行精确的LA-MC-ICP-MS年龄测试,采样位置见图2。分析结果见表3。

玄武岩(IXU-Pb02)样品采于哈萨山南面,岩性为深灰绿色玄武岩,镜下见糜棱结构,定向构造,反映岩石曾经历强烈的构造作用。岩石SiO₂含量为

50.69%,属基性岩无疑。该样品共挑选25颗锆石,取得较好的同位素分析数据。从表3可以看出,样品锆石U、Pb含量不高,其中Pb含量介于 $12 \times 10^{-6} \sim 81 \times 10^{-6}$ 之间,U含量除21测点(1014×10^{-6})较高外,其余测点含量介于 $144 \times 10^{-6} \sim 532 \times 10^{-6}$ 之间。25个分析点²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄加权平均值为 488.2 ± 2.1 Ma(MSWD=0.18,置信度95%)(图6)。因此,没草沟蛇绿岩玄武岩成岩年龄为 488.2 ± 2.1 Ma。CL图像中样品锆石大部分呈短柱状、长柱状,亦有极个别呈浑圆状(测点16和20),长50~350μm,多呈灰色、淡棕色,少部分发育白色或灰白色亮边,大部分发育清楚典型的岩浆环带,具岩浆锆石成因特征^[35],少部分锆石(测点9、16和22)呈浑圆状,可能因受岩浆热液改造而成,可有云雾状分带或无分带构造等(图7)。

辉长岩(IXU-Pb04)采于哈萨山北面山脊路线。

表 3 研究区玄武岩和辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 年龄分析结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating data of basalt and gabbro of the study area

测点	含量/ 10^{-6}		同位素比值									同位素年龄/Ma						
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
玄武岩(样品 IXU-Pb02)																		
1	22	271	0.0787	0.0008	0.622	0.010	0.0573	0.0009	0.0198	0.0001	0.537	0.001	489	5	491	8	503	33
2	26	323	0.0784	0.0008	0.622	0.009	0.0575	0.0007	0.0200	0.0001	0.519	0.001	487	5	491	7	512	29
3	22	258	0.0784	0.0008	0.626	0.010	0.0580	0.0009	0.0200	0.0001	0.678	0.013	486	5	494	8	529	32
4	38	448	0.0789	0.0008	0.622	0.009	0.0572	0.0007	0.0209	0.0001	0.649	0.006	489	5	491	7	499	28
5	14	179	0.0787	0.0009	0.621	0.016	0.0572	0.0013	0.0240	0.0004	0.417	0.001	488	5	490	13	500	51
6	44	532	0.0787	0.0008	0.627	0.009	0.0577	0.0007	0.0223	0.0001	0.508	0.001	489	5	494	7	520	27
7	35	444	0.0783	0.0008	0.618	0.009	0.0572	0.0007	0.0217	0.0001	0.385	0.001	486	5	489	7	501	27
8	31	379	0.0780	0.0008	0.621	0.009	0.0577	0.0007	0.0216	0.0001	0.534	0.003	484	5	490	7	518	27
9	17	205	0.0781	0.0009	0.612	0.013	0.0568	0.0011	0.0214	0.0001	0.517	0.020	485	6	485	10	482	45
10	42	490	0.0779	0.0008	0.621	0.009	0.0578	0.0007	0.0201	0.0001	0.863	0.006	484	5	490	7	522	28
11	37	461	0.0789	0.0009	0.620	0.010	0.0569	0.0008	0.0204	0.0001	0.474	0.003	490	6	490	8	489	32
12	31	387	0.0788	0.0009	0.620	0.009	0.0571	0.0007	0.0202	0.0001	0.455	0.001	489	5	490	7	494	28
13	40	486	0.0785	0.0009	0.614	0.009	0.0567	0.0007	0.0179	0.0001	0.726	0.005	487	5	486	7	481	28
14	34	400	0.0785	0.0008	0.625	0.009	0.0578	0.0007	0.0184	0.0002	0.788	0.019	487	5	493	7	520	28
15	31	370	0.0787	0.0009	0.622	0.011	0.0573	0.0008	0.0182	0.0002	0.776	0.005	489	6	491	8	503	30
16	19	233	0.0783	0.0010	0.621	0.014	0.0575	0.0011	0.0171	0.0002	0.755	0.004	486	6	490	11	510	44
17	12	144	0.0784	0.0009	0.622	0.026	0.0575	0.0022	0.0175	0.0003	0.581	0.005	486	6	491	20	512	83
18	22	273	0.0791	0.0009	0.625	0.011	0.0573	0.0009	0.0191	0.0003	0.426	0.002	491	6	493	9	502	34
19	37	477	0.0788	0.0009	0.622	0.010	0.0572	0.0008	0.0173	0.0001	0.383	0.001	489	6	491	8	501	29
20	17	207	0.0791	0.0009	0.625	0.013	0.0573	0.0012	0.0181	0.0001	0.596	0.002	491	6	493	10	501	44
21	81	1014	0.0791	0.0009	0.622	0.009	0.0570	0.0007	0.0174	0.0001	0.513	0.004	491	5	491	7	493	25
22	18	231	0.0792	0.0011	0.626	0.016	0.0574	0.0012	0.0162	0.0002	0.502	0.003	491	7	494	12	505	45
23	20	226	0.0792	0.0009	0.622	0.012	0.0569	0.0009	0.0167	0.0001	0.978	0.015	492	6	491	9	487	37
24	31	375	0.0789	0.0009	0.623	0.010	0.0572	0.0007	0.0158	0.0001	0.838	0.002	490	6	491	8	500	29
25	31	395	0.0793	0.0008	0.623	0.009	0.0570	0.0007	0.0164	0.0001	0.476	0.001	492	5	492	7	491	28
辉长岩(样品 IXU-Pb04)																		
1	35	427	0.0808	0.0008	0.643	0.009	0.0577	0.0007	0.0226	0.0001	0.412	0.001	501	5	504	7	518	27
2	42	510	0.0808	0.0008	0.636	0.009	0.0571	0.0007	0.0226	0.0001	0.472	0.001	501	5	500	7	497	27
3	43	499	0.0806	0.0008	0.635	0.009	0.0571	0.0007	0.0200	0.0000	0.724	0.007	500	5	499	7	497	28
4	34	387	0.0808	0.0008	0.643	0.010	0.0576	0.0008	0.0214	0.0001	0.709	0.007	501	5	504	8	516	29
5	54	623	0.0810	0.0008	0.640	0.009	0.0573	0.0007	0.0209	0.0000	0.670	0.002	502	5	502	7	503	26
6	93	784	0.0808	0.0010	0.646	0.011	0.0580	0.0008	0.0213	0.0004	2.407	0.078	501	6	506	9	528	30
7	133	1523	0.0811	0.0008	0.640	0.008	0.0572	0.0006	0.0191	0.0001	0.803	0.006	503	5	502	7	500	25
8	13	169	0.0804	0.0009	0.641	0.013	0.0579	0.0011	0.0208	0.0003	0.286	0.001	498	6	503	10	524	42
9	22	266	0.0808	0.0008	0.644	0.010	0.0578	0.0008	0.0187	0.0001	0.522	0.009	501	5	505	8	523	32
10	69	794	0.0807	0.0009	0.639	0.009	0.0574	0.0007	0.0199	0.0005	0.711	0.016	501	5	502	7	506	25
11	23	275	0.0807	0.0009	0.643	0.011	0.0578	0.0009	0.0191	0.0001	0.641	0.008	501	6	504	9	521	34
12	14	171	0.0807	0.0009	0.653	0.014	0.0587	0.0011	0.0203	0.0002	0.502	0.002	500	5	510	11	558	42
13	45	540	0.0808	0.0009	0.644	0.013	0.0578	0.0010	0.0226	0.0003	0.494	0.001	501	6	504	10	521	36
14	39	470	0.0807	0.0010	0.648	0.010	0.0582	0.0008	0.0204	0.0001	0.526	0.001	500	6	507	8	537	29
15	24	282	0.0805	0.0009	0.647	0.010	0.0583	0.0008	0.0223	0.0001	0.623	0.014	499	5	507	8	539	31
16	86	1055	0.0811	0.0008	0.641	0.008	0.0573	0.0007	0.0212	0.0001	0.401	0.001	503	5	503	7	502	25
17	26	317	0.0807	0.0009	0.652	0.012	0.0585	0.0009	0.0216	0.0002	0.433	0.003	500	6	509	9	550	33
18	33	396	0.0809	0.0008	0.642	0.009	0.0576	0.0008	0.0211	0.0001	0.449	0.001	501	5	504	8	514	30
19	31	339	0.0808	0.0009	0.641	0.010	0.0575	0.0008	0.0266	0.0002	0.714	0.007	501	5	503	8	512	31
20	23	278	0.0806	0.0009	0.652	0.011	0.0586	0.0008	0.0195	0.0001	0.612	0.014	500	5	510	8	554	31
21	68	689	0.0811	0.0029	0.647	0.024	0.0578	0.0008	0.0215	0.0021	1.327	0.089	503	18	506	19	522	29
22	30	349	0.0811	0.0009	0.644	0.010	0.0575	0.0008	0.0194	0.0001	0.605	0.007	503	6	504	8	511	30
23	39	446	0.0808	0.0010	0.651	0.016	0.0585	0.0009	0.0202	0.0002	0.709	0.006	501	6	509	12	548	34
24	28	334	0.0807	0.0009	0.637	0.011	0.0572	0.0008	0.0191	0.0001	0.642	0.005	501	6	500	8	499	32
25	21	250	0.0807	0.0010	0.642	0.012	0.0577	0.0010	0.0190	0.0001	0.634	0.003	500	6	504	10	518	36

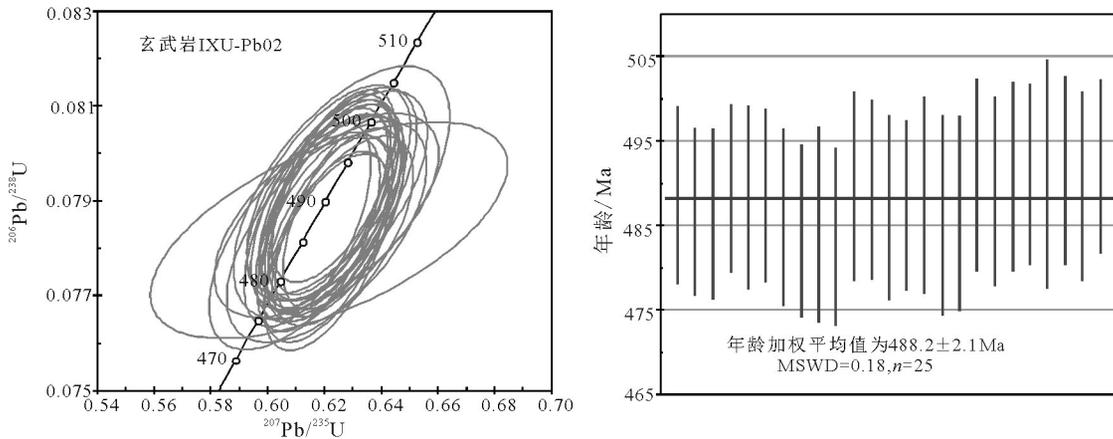


图6 研究区玄武岩(样品IXU-Pb02)LA-ICP-MS 锆石U-Pb谐和图

Fig. 6 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram of basalt (sample IXU-Pb02) in the study area

岩石较新鲜,考虑到基性岩锆石含量较少的原因,所采样品重量达30kg以上,岩性为灰绿色辉长岩,岩石SiO₂含量为51.33%,TiO₂含量为1.59%,显微镜下为碎裂结构与细粒半自形柱粒状结构并存(图版I-h),块状构造,与镜下鉴定结果基本一致,与上述玄武岩样品一样;亦取得较好的同位素分析结果,也挑选出25颗锆石,锆石(图8)以灰色、淡棕色为主,部分为白色,形态多呈长柱状、短柱状或不规则状,个别锆石为云雾状、具无分带或弱分带结构(测点11、12、21),大部分发育典型岩浆锆石的环带特征,少数锆石呈现斑杂和港湾状,可能是由于U含量过高,锆石发生蜕晶化而引起结构被破坏^[36]。单颗粒锆石U-Pb同位素年龄测试结果见表3。从表3可看出,25颗锆石取得较好的同位素数据,Pb、U含量分别介于13×10⁻⁶~

133×10⁻⁶、169×10⁻⁶~1523×10⁻⁶之间,变化范围不大,1~25号点²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄加权平均值为500.8±2.2Ma(图9),该年龄值相当于晚寒武世,代表辉长岩的成岩年龄。

6 讨论

6.1 没草沟蛇绿岩形成的构造环境

蛇绿岩通常被认为是洋中脊扩张或板块俯冲消减过程的产物^[4,12,37],是具有成因联系的几种岩石的组合,在现今地质学研究中具有特殊而重要的地位。蛇绿岩常以洋壳或上地幔残片与其他不同来源岩块(如海山/洋岛、大洋台地和外来地体等)在陆-陆和弧-陆碰撞及洋中脊-海沟相互作用或俯冲增生造山过程中拼贴至大陆边缘^[38]。玄武岩和辉

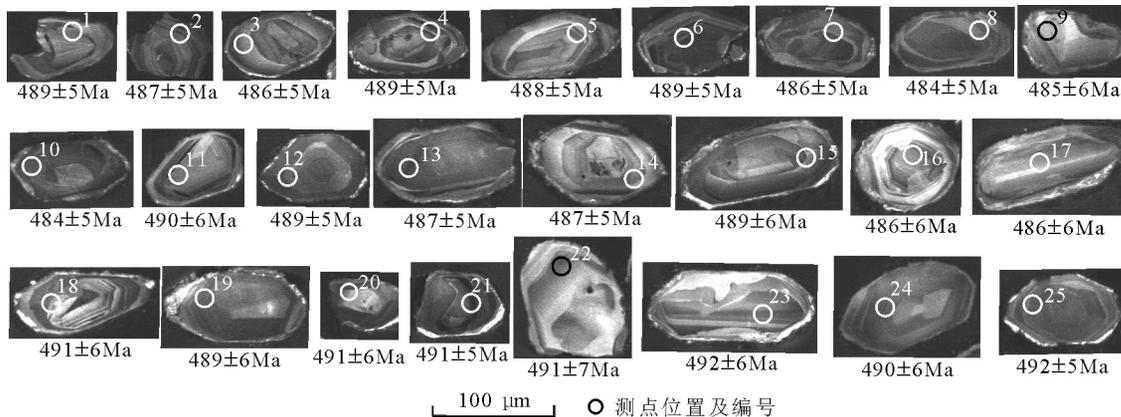


图7 研究区玄武岩(样品IXU-Pb02)锆石阴极发光图像

Fig. 7 Cathodoluminescence images of zircons in basalt (sample IXU-Pb02) of the study area

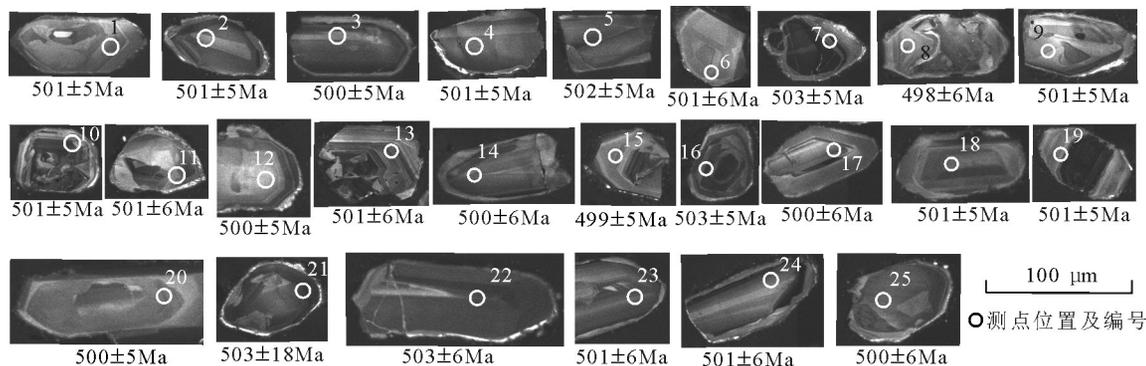


图 8 研究区辉长岩(样品 IXU-Pb04)锆石阴极发光图像

Fig. 8 Cathodoluminescence images of zircon in gabbro (sample IXU-Pb04) of the study area

绿岩是造山带蛇绿混杂岩中最常见的岩石,且形成于同一构造背景,具有相似的地球化学特征。邓晋福等^[39]研究认为,不同构造环境下的火成岩组合具有不同的岩石地球化学特征,如洋中脊扩张、洋岛、岛弧、边缘海盆、活动大陆边缘、稳定大陆和裂谷等。其中洋岛、洋中脊和岛弧拉斑玄武岩的 SiO_2 含量(分别为 45%~65%、47%~51%和 46%~76%)、 TiO_2 含量(分别为 0.2%~5.0%、0.7%~2.3%和 0.3%~2.0%)、 FeO 含量(分别为 8%~16%、6%~14%和 6%~16%)、 Na_2O 含量(分别为 0.7%~4.5%、1.7%~3.3%和 1.1%~3.6%)、 K_2O 含量为(0.06%~2.0%、0.07%~0.4%和 0.1%~2.0%)和 TFeO/MgO 值(分别为 0.5%~2.5%、0.8%~2.1%和 1%~7%)具明显差异^[6]。与上述几类特定构造环境玄武岩对比,研究区没草沟蛇绿岩玄武岩 SiO_2 、 TiO_2 、 FeO 、 Na_2O 、 K_2O

平均值分别为 47.16%、1.72%、8.43%、2.92%、0.51%, FeO/MgO 值为 1.51~2.66。具有与洋岛拉斑玄武岩和洋中脊拉斑玄武岩相似的地球化学特征,但更接近于洋中脊玄武岩地球化学特征。

前文所述本区蛇绿岩岩石组合较齐全,可与世界典型蛇绿岩套对比。虽然由于后期强烈构造混杂作用,蛇绿岩各组分呈构造透镜体或块体赋存在混杂带内,原有的层序特征基本无保留,但其特征显示具有同源岩浆演化的特征。

Dilek 等^[11]研究认为,微量元素 Ti、V、Th、Yb、Nb 在变质作用和蚀变中最不活跃,它们不仅是区分俯冲作用相关岩浆和其他类型岩浆的指标,而且在与其它地球化学和野外区域构造约束联合运用中极为可靠。在 Nb*2-Zr/4-Y 判别图解(图 10-a)中,样品点多数落于板内拉斑玄武岩,仅有个别样

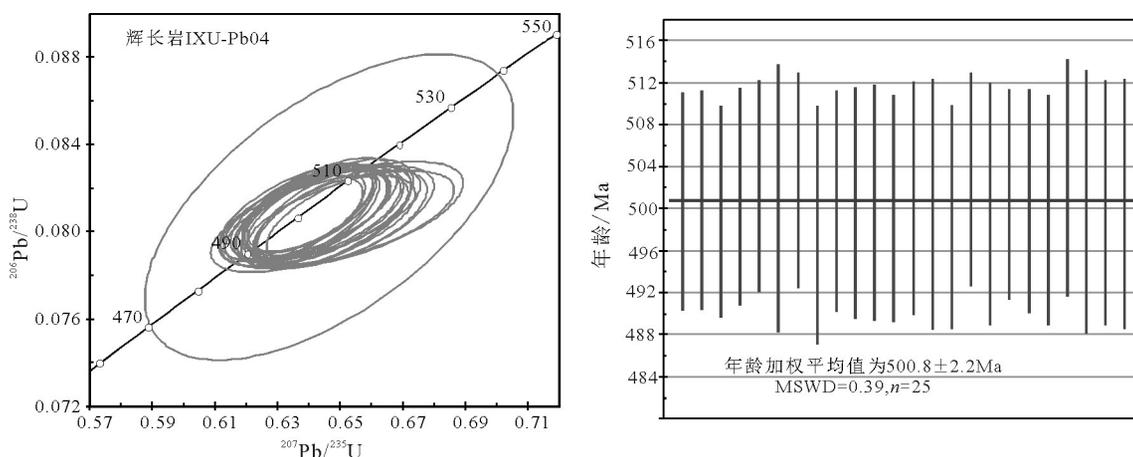


图 9 研究区辉长岩(样品 IXU-Pb04)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 9 LA-ICP-MS zircons U-Pb concordia diagrams of gabbro (sample IXU-Pb04) of the study area

品点(玄武岩、辉绿岩)落于正常洋中脊玄武岩区;在Pearce等^[40]提出的Ti/100-Zr-Y*3图解(10-b)和Ti/100-Zr-Sr/2图解(10-c)中,样品点大部分落于洋脊玄武岩,少数样品具有钙碱性玄武岩特征;在TiO₂-FeO*/MgO构造环境判别图解(图10-d)中,样品点落于洋脊拉斑玄武岩区,少部分样品显示岛弧玄武岩特征,反映没草沟混杂岩可能形成于局部拉张环境;再次将本区火山岩样品投图于TiO₂-10MnO-10P₂O₅图解(图11)中,仅个别样品点(辉长岩、辉绿岩)落在岛弧拉斑玄武岩或与钙碱性玄武岩界线附近,反映研究区蛇绿岩具有洋中脊拉斑玄武岩特征。

总之,上述构造环境判别图解均显示没草沟蛇绿岩形成于洋中脊玄武岩,代表了东昆仑地区早古生代的残留洋壳。结合本区超镁铁质岩(辉橄岩、蛇纹岩、橄榄岩)稀土元素特征为轻稀土元素弱富集型, Eu基

本无异常;辉长岩和辉绿岩均为平坦型,轻稀土元素略富集, Eu富集型;基性火山岩块具有正常洋中脊拉斑玄武岩的特征,可以判定该蛇绿岩是本区消失了的古洋壳残片(块),是洋盆扩张火山作用的产物,为本区真正的洋壳蛇绿岩的组成部分。

另外,在玄武岩Th/Yb-Nb/Yb图解和TiO₂/Yb-Nb/Yb图解(图12)中,样品点显示本区没草沟蛇绿岩并非与俯冲作用密切相关的SSZ型蛇绿岩,而属于典型的MORB(洋中脊型玄武岩)型蛇绿岩,是寒武纪原特提斯洋中的洋岛或海山的组成部分。综合考虑区域资料,研究区早古生代没草沟蛇绿混杂岩系所代表的古洋应属中国西部东特提斯洋的组成部分,向南延伸可能与三江地区原特提斯洋相连通。

6.2 形成时代及意义

区域上没草沟蛇绿混杂岩总体近东西向带状展布,岩石组合以基性玄武岩为主,此外有橄辉岩、

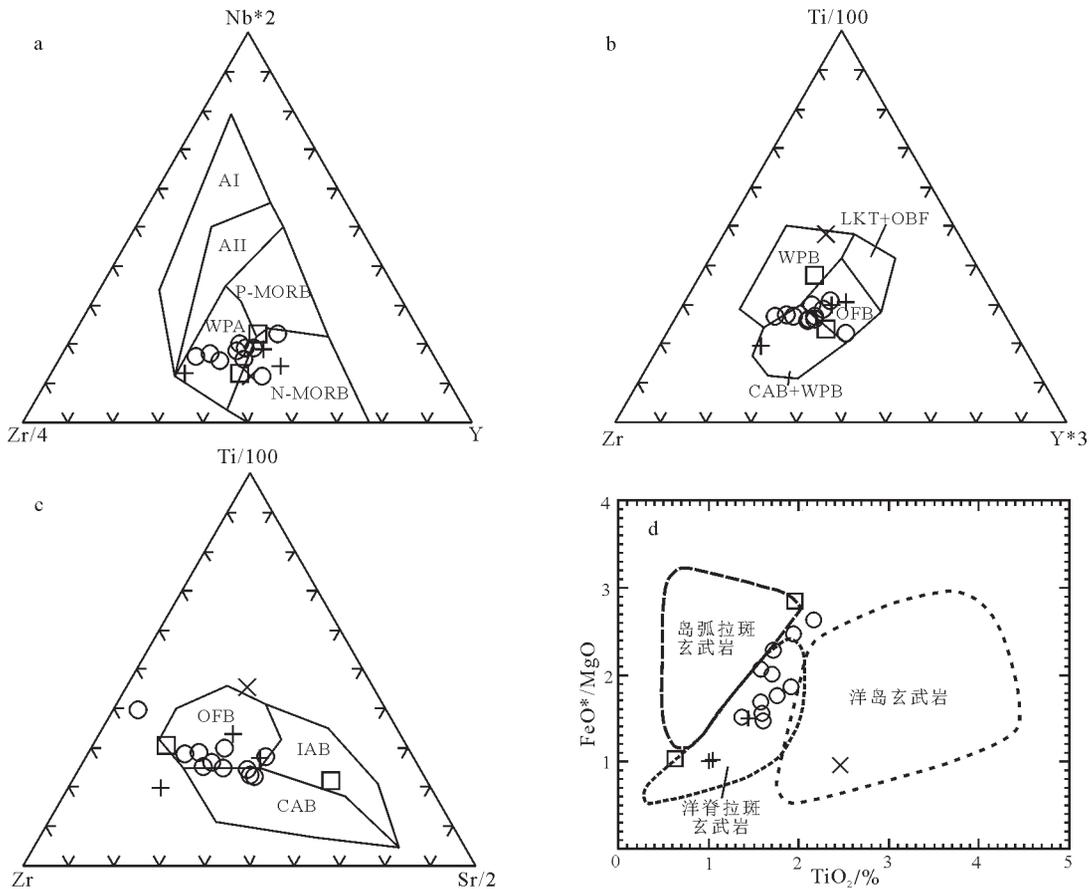


图10 没草沟蛇绿岩构造判别图解(图例同图4)

Fig. 10 Tectonic setting discrimination diagrams of diabases in the Meicaogou ophiolitic mélangé

A I—板内碱性玄武岩; A II—板内拉斑玄武岩; P-MORB—富集型洋中脊玄武岩; WPA—板内拉斑玄武岩; N-MORB—正常洋中脊玄武岩; WPB—板内玄武岩; OFB—洋脊玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩

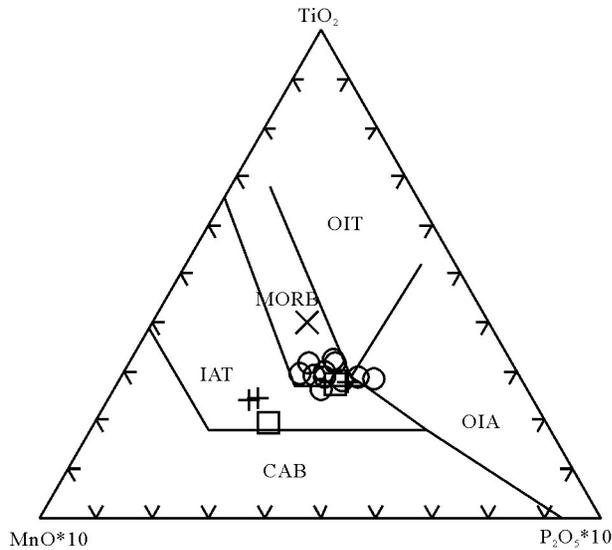


图 11 没草沟蛇绿岩 TiO_2 - $MnO*10$ - P_2O_5*10 图解 (图例同图 4)

Fig. 11 TiO_2 - $MnO*10$ - P_2O_5*10 diagram of the Meicaogou ophiolite

OIT—大洋岛屿拉斑玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; OIA—大洋岛屿碱性玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩

辉橄岩、角闪橄榄岩、菱镁滑石片岩、辉长岩和席状岩墙群辉绿岩、辉绿玢岩、硅质岩等。与周围地层均呈断层接触,三叠纪洪水川组、闹仓竖沟组角度不整合覆盖其上。1:20 万不冻泉幅区调在老道沟一带该套岩系中获得珊瑚 *Acdalopora byeviaua*; 牙形刺 *Dygodus anserinus*, *Dapsilodus striatus* 等,并根据地质体相互接触关系,将其定为晚奥陶世。本次通过

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,在没草沟蛇绿混杂岩玄武岩、辉长岩中分别获得 $488.2 \pm 2.1Ma$ 和 $500.8 \pm 2.2Ma$ 结晶年龄,显示该蛇绿岩形成时代为中寒武世—早奥陶世。表明在寒武纪,至少在中一晚寒武世 ($500.8 \pm 2.2Ma$),由于原特提期洋向北俯冲,整个东昆仑地区可能处于裂解鼎盛的主洋盆形成期,弧后盆地开始扩张发展阶段,在剪切和压扁机制下,蛇绿岩下部层位的镁铁-超镁铁岩沿构造薄弱面褶皱回返至地表,并发生绿片岩相变质作用,本文没草沟 MORB 型蛇绿岩的出现,即是该时期的物质表现。在此期间,区域上在辉特陶可一带中寒武世 ($509 \sim 515Ma$) 与俯冲有关 TTG 的花岗岩组合的发现,表明局部可能存在俯冲。中奥陶世整个昆中洋开始向北大规模俯冲,一直持续到志留纪末期,在纳赤台混杂岩带北侧(昆中断裂以北)发育大量的中奥陶世—顶志留世岩浆弧,即北昆仑岩浆弧。如克合特与俯冲有关的 TTG 组合花岗岩 ($472Ma$)、沙松乌拉-乌拉斯太 GG 组合花岗岩 ($425Ma$),均为该期俯冲的产物。早志留世东昆仑西-中段夏拉尕诺环斑花岗岩、灶火沟 ($440 \sim 430Ma$) 与碰撞有关的石榴石花岗岩 ($439Ma$) 的出现,均表明该地区已进入弧陆碰撞阶段,代表纳赤台(昆中洋)洋盆西段在早志留世已经闭合。结合区域地质背景分析,该阶段一直持续至早中泥盆世。之后早泥盆世雪水河组角度不整合,表明东昆仑地区洋陆转换完成,抬升成陆,全面进入陆内转化阶段。同时该 2 个同位素年龄成果的获得不仅填补了该蛇绿岩无确切时代的空白,而且为东昆仑地

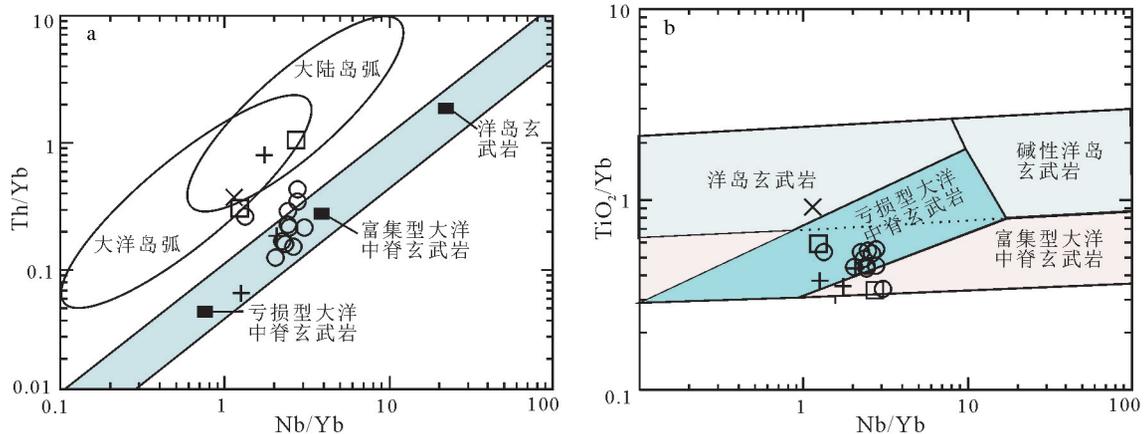


图 12 没草沟蛇绿岩 Nb/Yb - Th/Yb (a) 和 Nb/Yb - TiO_2/Yb (b) 图解 (图例同图 4)

Fig. 12 Nb/Yb - Th/Yb (a) and Nb/Yb - TiO_2/Yb (b) diagrams of the Meicaogou ophiolite

区地质构造演化提供了重要依据。

7 结论

(1)出露于东昆仑西段没草沟蛇绿混杂岩的岩石组合以变基性玄武岩为主,此外有变质橄榄岩、橄榄岩、蛇纹岩、变质辉长岩、菱镁滑石片岩、席状岩墙辉绿岩、辉绿玢岩及伴生的硅质岩、碎屑岩等,岩石组合较齐全。

(2)岩石化学表明,没草沟蛇绿岩各组分岩石化学成分总体呈现有规律的变化,从变质辉绿岩→辉长岩→辉绿岩→基性玄武岩演化,均是同一蛇绿岩套同构造环境下不同岩石组合的产物,具同源演化趋势。 SiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 、 Na_2O 、 K_2O 含量逐渐增高,而 MgO 逐渐减少,总体具低 TiO_2 、 K_2O ,富 MgO 、 Na_2O 高(FeO)的特征。稀土元素总量偏低,稀土元素配分模式呈平坦或略右倾的轻稀土元素富集型,其特征显示与正常洋中脊拉斑玄武岩稀土元素配分型式相似。微量元素富集 Rb 、 Ba 、 K 、 Th 、 Ta 等大离子亲石元素, Sr 、 Y 、 Hf 、 Sr 、 Nb 相对亏损,具有明显低 P 、 Ti 的特点。

(3)没草沟蛇绿岩为典型MORB蛇绿岩,与俯冲带蛇绿岩明显不同,分别获得玄武岩和辉长岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb 年龄为 $488.2 \pm 2.1\text{Ma}$ 、 $500.8 \pm 2.2\text{Ma}$,表明该蛇绿岩形成于中寒武世一早奥陶世,说明没草沟蛇绿混杂岩中包含有晚寒武世的洋壳。

(4)结合区域地质背景,没草沟蛇绿混杂岩可能最终定位于志留纪。俯冲增生造山作用在东昆仑地区可能持续到志留纪末期。

致谢:研究过程中广泛收集了1:25万和1:5万区域地质调查成果资料,感谢项目组同仁野外生产过程中付出的艰辛劳动,野外运行中祁生胜、常革红、史连昌及长安大学裴先治教授等亲临项目检查指导工作;岩石化学样品和同位素样品分别由武汉矿产资源监督检测中心和天津地质矿产研究所实验室测试完成;青海省地质调查院范桂兰等完成了岩石薄片的分析鉴定,在此表示衷心谢意。

参考文献

[1]张旗. 蛇绿岩的分类[J]. 地质科学, 1990, 25(1): 54-61.
 [2]王荃, 刘雪主. 中国西部的古海洋地壳及其大地构造意义[J]. 地质科学, 1976, (1): 14-24.
 [3]史仁灯. 蛇绿岩研究进展、存在问题及思考[J]. 地质论评, 2005, 51(6): 681-666.

[4]Anonymus. Penrose field conference on ophiolites[J]. Geotimes, 1972, 17: 24-25.
 [5]Brongniart A. Essai de classification mineralogique des roches melanges[J]. Journal des Mines, 1813, XXXIV: 190-199.
 [6]Miyashiro A. Classification, characteristics, and origin of ophiolites. The Journal of Geology, 1975, 83(2): 249-281
 [7]Moore E M. Origin and emplacement of Ophiolites[J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1982, 20: 735-760.
 [8]张旗, 肖序常. 中国蛇绿岩研究概述[J]. 岩石学报, 1995, 11(增刊): 1-9.
 [9]张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-182.
 [10]张进, 邓晋福, 肖庆辉, 等. 蛇绿岩研究的最新进展[J]. 地质通报, 2012, 32(1): 1-12.
 [11]Dilek Y, Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere[J]. Geological society of America Bulletin, 2011, 123: 387-411.
 [12]Pearce J A. Immobile element fingerprinting of ophiolites[J]. Elements, 2014, 10(2): 101-108.
 [13]肖序常, 陈国铭, 朱志直. 祁连山古蛇绿岩的地质构造意义[J]. 地质学报, 1978, 54(1): 287-295.
 [14]付长奎, 闫臻, 郭现轻, 等. 拉脊山口蛇绿混杂岩中辉绿岩的地球化学特征及SHRIMP 锆石U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 2014, 30(6), 1695-1706.
 [15]李荣社, 计文化, 赵振明, 等. 昆仑早古生代造山带研究进展[J]. 地质通报, 2007, 26(4): 374-382.
 [16]宋泰忠, 赵海霞, 张维宽, 等. 祁漫塔格地区十字沟蛇绿岩地质特征[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 124-133.
 [17]湛宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等. 东昆仑喀雅克登塔格杂岩体的SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(1): 25-32.
 [18]祁生胜. 青海省东昆仑造山带火成岩岩石构造组合与构造演化[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2015: 1-343.
 [19]陈隽璐, 黎敦朋, 李新林, 等. 东昆仑祁漫塔格山南缘黑山蛇绿岩的发现及其特征[J]. 陕西地质, 2004, 22(2): 35-46.
 [20]郭通珍, 刘荣, 陈发彬, 等. 青海祁漫塔格山乌兰乌球斑状正长花岗岩LA-MC-ICPMS 锆石U-Pb 定年[J]. 地质通报, 2011, 30(8): 1204-1211.
 [21]罗照华, 邓晋福, 曹永清, 等. 青海省东昆仑地区晚古生代一早中生代火山活动与区域构造演化[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 51-56.
 [22]郭正府, 邓晋福, 许志琴, 等. 青藏东昆仑晚古生代末—中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J]. 现代地质, 1998, 12(3): 344-352.
 [23]潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2002, 36(1): 1-28.
 [24]青海省地质矿产局. 青海省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
 [25]路凤香, 桑隆康, 邬金华, 等. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2002.

- [26]李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物学报, 2009, (增刊): 600-601.
- [27]邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [28]韩磊, 张立飞. K 和 Na 在深俯冲板块中的元素化学行为[J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(5): 755-766.
- [29]Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[C]//Thorpe R S. Andesites. Chichester: Wiley, 1982: 525-548.
- [30]Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[C]//Henderson P. Rare earth element geochemistry. Elsevier, 1984: 63-114.
- [31]李昌年. 微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.
- [32]Yegodainski G M, Kay R W, Volynets O N, et al. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge[J]. Geol. Soc. Amer. Bull., 1995, 107: 505-519.
- [33]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Oceanic Basins, Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-346.
- [34]Pearce J A, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins[C]//Hawkesworth C J, Norry M J. Continental basalts and mantle xenoliths. Nantwich: Shiva, 1983: 230-249.
- [35]吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [36]Nasdala L, Wenzel M, Vavra G, et al. Metamictisation of natural zircon: Accumulation versus thermal annealing of radioactivity-induced damage[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2001, 141(2): 125-144
- [37]Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[J]. Geological Society of London, Special Publications, 1984, 16(1): 74-94.
- [38]Dewey J F, Bird J M. Origin and emplacement of the ophiolite suite: Appalachian ophiolites in Newfoundland[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(14): 3179-3206
- [39]邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 392-402.
- [40]Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 19: 290-300.
- ①1:20 万不冻泉幅区域地质调查报告. 青海省区调综合地质大队, 1986.
- ②1:25 万不冻泉幅区域地质调查报告. 中国地质大学(武汉), 2003.
- ③青海省格尔木市窑洞山地区两幅 1:5 万区域地质调查报告. 青海省地质调查院, 2016.
- ④青海省区域地质调查与片区总结成果报告内部资料. 青海省地质调查院, 2017.
- ⑤1:5 万保沟幅、没草沟幅、青办食宿幅区域地质调查报告. 青海省地质调查院, 2002.