

西秦岭北缘早古生代天水—武山 构造带及其构造演化

裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 刘战庆, 李瑞保, 冯建赞, 孙雨, 张亚峰, 刘智刚, 张晓飞, 陈国超, 陈有炘

长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,

长安大学地球科学与资源学院, 西安, 710054

内容提要:西秦岭北缘早古生代天水—武山构造带位于甘肃省东部天水地区, 主要由寒武纪关子镇-武山蛇绿岩带、晚寒武世—早奥陶世李子园群浅变质活动陆缘沉积-火山岩系、奥陶纪草滩沟群岛弧型火山-沉积岩系以及加里东期岛弧型深成侵入岩体、俯冲-碰撞型花岗岩体等组成。关子镇蛇绿岩中变质基性火山岩属于 N-MORB 型玄武岩, 武山蛇绿岩中变质基性火山岩属于 E-MORB 型玄武岩, 是洋脊型蛇绿岩的重要组成部分, 形成时代大致在 534~489Ma 之间的寒武纪。李子园群火山岩主要形成于岛弧或与岛弧相关的弧前盆地构造环境, 草滩沟群火山岩形成于与俯冲作用相关的岛弧环境。关子镇流水沟和百花中基性岩浆杂岩总体形成于中晚奥陶世(471~440Ma)古岛弧构造环境, 同时发育加里东期俯冲型(450~456Ma)花岗岩类和碰撞型(438~400Ma)花岗岩类岩浆活动。西秦岭北缘早古生代古洋陆构造格局经历了从洋盆形成-洋壳俯冲消减直至陆-陆碰撞造山的板块构造演化过程。总体构造演化可划分为四个阶段:①晚寒武世古洋盆初始形成阶段;②早奥陶世洋盆初始俯冲阶段;③中晚奥陶世洋壳大规模俯冲与古岛弧发育阶段;④志留纪陆-陆或陆-弧碰撞造山阶段。

关键词:蛇绿岩;岛弧型岩浆岩;天水—武山构造带;早古生代;西秦岭

西秦岭北缘天水—武山构造带位于甘肃省东部天水地区, 地处青藏高原东北缘, 其大地构造位置处于中央造山系中段祁连造山带和北秦岭造山带的接合部位(图 1), 同时也横跨在中国中部南北向构造带上, 是古亚洲构造域、特提斯构造域和太平洋构造域复合叠加的构造部位, 也是当代中国大陆动力学研究的重要地段。已经完成的 1:250000 天水市幅区域地质调查和近年的研究表明^①(甘肃省地质矿产局, 1989; 宋志高等, 1991a, 1991b; 张维吉等, 1994; 张国伟等, 1996, 2001, 2004; 裴先治, 1997; 裴先治等, 2003, 2004a, 2004b; 2005a, 2005b, 2006, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2007e; Pei Xianzhi, et al, 2007a, 2007b; 杨军录等, 2001; 陆松年等, 2003, 2004, 2005, 2006; 丁仁平等, 2004, 2005, 2006, 2008a, 2008b; 张宏飞等, 2005, 2006; Zhang H F, et al, 2006; 胡波等, 2005; 刘会彬等, 2006; 王洪亮等, 2006, 2007; 杨钊等, 2006; 陈隽璐等, 2007, 2008a, 2008b; 董云鹏等, 2007, 2008; 李王晔等, 2007, 李王

晔, 2008; 何世平等, 2007a, 2007b; 王婧等, 2008), 现今的秦岭造山带和祁连造山带之间被巨大的长期活动的宝鸡—天水—武山(新阳-元龙)大型韧性走滑剪切构造带相分隔^②(裴先治等, 2004a, 2004b; 丁仁平等, 2008b)。以新阳-元龙韧性走滑剪切构造带为界, 南北两侧物质组成、构造变形有明显差异。北部为祁连造山带东段, 主要由古元古代陇山岩群中深变质基底岩系、志留纪葫芦河群浅变质岩系和奥陶纪红土堡组陆内裂谷-小洋盆蛇绿岩、陈家河群岛弧型中酸性火山岩-弧前盆地沉积岩系以及岛弧型深成岩体和碰撞型花岗岩类等组成, 明显受到祁连造山带与鄂尔多斯地块、阿拉善地块及其间的贺兰裂陷槽之间相互作用的影响。而南部为西秦岭造山带北带, 主要由北秦岭构造带、李子园-关子镇俯冲-碰撞杂岩构造带、中秦岭晚古生代沉积盆地构造带等组成。其中北秦岭构造带主要由古元古代秦岭岩群中深变质造山带基底岩系、中新元古代宽坪岩群变质岩系、奥陶纪草滩沟群浅变质岛弧型火山-沉积岩

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 40972136、40572121、40234041)、教育部科学技术研究重点项目(编号 104175)和中国地质调查局地质调查项目(编号 200013000154)资助的成果。

收稿日期:2009-04-22; 改回日期:2009-09-27; 责任编辑:郝梓国。

作者简介:裴先治, 1963 年生。博士, 教授。主要从事区域地质和构造地质学研究。通讯地址:710054, 西安市雁塔路南段 126 号, 长安大学资源学院; Email: peixzh@263.net。

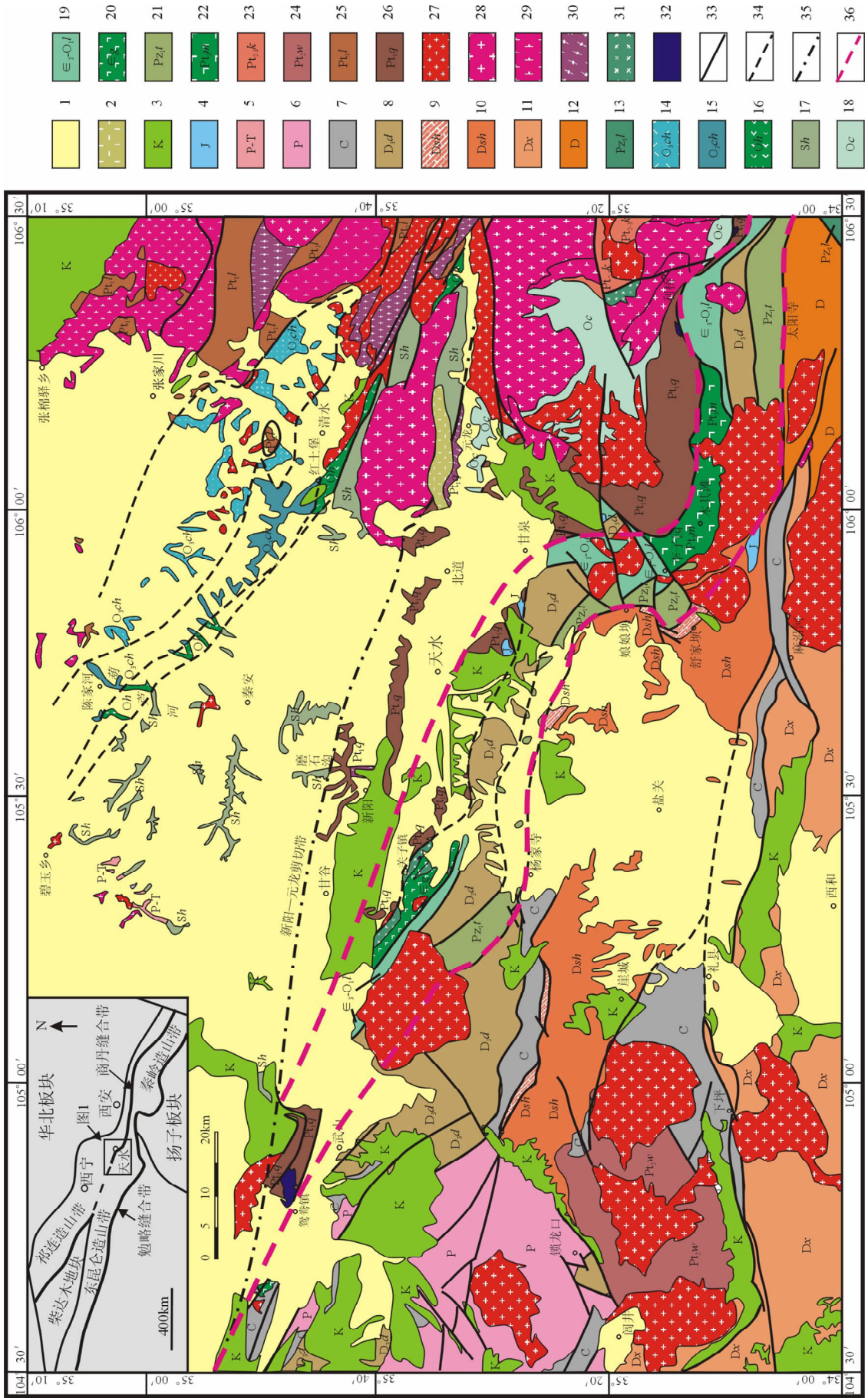


图 1 西秦岭北缘天水地区地质构造略图

Fig. 1 Sketch tectonic map of Tianshui area, Northern margin of the West Qinling

1—新生界(新近系+第四系);2—古近纪火山岩;3—白垩系;4—侏罗系;5—三叠-二叠系;6—二叠系;7—石炭系;8—泥盆纪大草滩群;9—泥盆纪舒家坝群碳酸盐岩;10—泥盆纪舒家坝群浊积岩;11—泥盆纪西汉水群;12—未分泥盆系;13—早古生代罗汉寺岩组;14—晚奥陶世陈家河群中酸性火山岩;15—晚奥陶世陈家河群变质碎屑岩;16—奥陶纪红土堡岩组基性火山岩;17—志留纪葫芦河群变质碎屑岩;18—奥陶纪草滩沟群;19—晚寒武世—早奥陶世李子园群;20—寒武纪关子镇蛇绿岩;21—早古生代太阳寺岩组;22—新元古代木其滩岩组基性火山岩;23—中新元古代宽坪岩群;24—中元古代吴家山岩群;25—古元古代陇山岩群;26—古元古代秦岭岩群;27—印支期花岗岩;28—加里东晚期花岗岩;29—加里东期闪长岩-石英闪长岩;30—新元古代变形花岗岩体;31—变形辉长岩-辉长闪长岩;32—超镁铁岩;33—断层;34—推测断层;35—新阳-元龙韧性剪切带,36—天水—武山构造带范围

1—Cenozoic;2—Eogene volcanic rock;3—Cretaceous;4—Jurassic;5—Permian-Triassic;6—Permian;7—Carboniferous;8—Devonian Dacatouan group;9—Limestone unit of Devonian Shujiaba Group;10—Turbidite unit of Devonian Shujiaba Group;11—Devonian Xihanshui Group;12—Devonian;13—Early Palaeozoic Luohansi formation;14—Intermediate-acid volcanic rock of Late Ordovician Chenjiahe Group;15—Detrital rock of Late Ordovician Chenjiahe Group;16—Basic volcanic rock of Ordovician Hongtubao formation;17—Meta-detrital rock of Siluran Huluhe Group;18—Ordovician Caotangou Group;19—Late Cambrian-Early Ordovician Liziyuan Group;20—Cambrian Guanzizhen ophiolite;21—Early Palaeozoic Taiyangsi formation;22—Neoproterozoi Muqitanformation;23—Middle-Neoproterozoic Kuanping Group;24—Middle-Proterozoic Wujiashan Group;25—Paleoproterozoic Longshan Group;26—Paleoproterozoic Qinling Group;27—Indosinian granite;28—Late Caledonian granite;29—Caledonian diorite-quarte diorite;30—Neoproterozoic deformation granite;31—deformation gabbro-gabbro-diorite;32—ultramafic rocks;33—fault;34—inferred fault;35—Xinyang-Yuanlong ductile shear zone;36—Tianshui-Wushan tectonic zone

系以及加里东期岛弧型深成岩体、俯冲-碰撞型花岗岩体等组成。李子园-关子镇俯冲-碰撞杂岩构造带主要由新元古代木其滩岩组变质基性火山岩、寒武纪关子镇蛇绿岩带、晚寒武世—早奥陶世李子园群浅变质活动陆缘沉积-火山岩系、奥陶纪草滩沟群岛弧型火山-沉积岩系、早古生代太阳寺岩组被动陆缘型沉积碎屑岩系和晚泥盆世大草滩群具磨拉石特点的河湖相粗碎屑岩系等组成。西秦岭则主要受控于秦岭造山带沿分隔华北板块与扬子板块之间的主要构造结合带——商丹构造带,历经新元古代—早古生代洋壳形成和俯冲削减、晚古生代残余海盆演化以及印支期全面碰撞造山,最终完成中国南北大陆主体拼合。同时在新阳-元龙大型韧性走滑剪切构造带南北两侧构造线具有斜截关系,南侧西秦岭造山带各构造岩石地层单位展布总体呈 NW—NWW 向,从东向西延伸均不同程度地斜接交汇于新阳-元龙大型剪切带。北侧祁连造山带各构造岩石地层单位及主要构造边界展布总体呈 NWW 走向,从西向东延伸也不同程度地交汇于新阳-元龙大型剪切带。这种平面构造几何学样式表明西秦岭与祁连造山带之间不是简单的连通对应关系,而是呈巨大的斜接交接构造关系。这种巨大的斜接交接构造关系的形成可能指示现今的两个构造单元原本不是一个构造单元,而是分属于两个构造单元,只是在印支期秦岭造山带全面俯冲-碰撞造山过程中因碰撞造山作用而通过走滑构造拼贴作用而结合在一起,形成现今的构造几何关系,之后共同经历了中生代陆内构造作用的叠加和改造。

早古生代是秦岭造山带最主要的洋陆构造演化阶段,而商丹构造带或商丹缝合带是秦岭造山带中分隔华北板块与扬子板块的最主要的构造结合带(张维吉等,1994;张国伟等,1996,2001,2004;裴先治,1997;姜春发等,2000;杨经绥等,2002;陆松年等,2003,2004,2005,2006;张宏飞等,2005,2006;Zhang H F, et al,2006;许志琴等,2006;张宗清等,2006;董云鹏等,2007,2008;李王晔等,2007,李王晔,2008)。但是商丹构造带的研究主要集中在东秦岭地区,而西秦岭地区的研究相对薄弱。因此,西秦岭北缘地区有关商丹构造带的西延研究及其构造格局、形成演化的恢复重建,对于深入探讨秦岭-祁连造山带之间构造交接关系等,具有重要的大陆动力学意义。本文在野外地质调查基础上,结合室内综合研究和前人研究成果,确定了西秦岭北缘天水地区早古生代天水—武山构造带的物质组成、洋陆构造格局以及俯冲-碰撞造山过程。

1 构造地层特征

天水—武山构造带出露地层,除古元古代秦岭岩群、中新元古代宽坪岩群以外,主要有新元古代木其滩岩组,早古生代关子镇蛇绿岩、李子园群、草滩沟群、太阳寺岩组等(图 1)。

1.1 古元古代秦岭岩群

秦岭岩群的分布西起武山响水寺,向东经天水南河川、牛头河,再向西南经甘泉、花庙河至两当张家庄,与陕西凤县殷家庄及其以东的秦岭岩群相连。该岩群总体被东西向断裂及中生代盆地分隔为若干

块体,呈不连续的反“S”形展布。在关子镇和花庙河-利桥一带秦岭岩群南与关子镇蛇绿岩或李子园群呈构造接触关系,在花庙河—利桥一带北与奥陶纪草滩沟群呈构造接触关系。秦岭岩群经历了多期变形和变质作用,层间褶皱和流动构造十分发育,而且深熔作用强烈,发育大量顺片理分布的含石榴石花岗岩脉体或条带。总体上秦岭岩群表现为层状无序,但各地段的变质岩组合相对稳定,可以连接对比。

根据研究区秦岭岩群岩石组合特征,可以划分为长英质片麻岩岩组、富铝片麻岩岩组及大理岩-钙硅酸岩岩组三个非正式构造岩石单位。宋志高等(1991a,1991b)曾在陕西凤县唐藏和甘肃天水花庙河两地秦岭岩群长英质片麻岩中分别选取锆石进行U-Pb同位素年龄测试,获得年龄分别为1531.9Ma和1010.3Ma。近年来,研究者已在东秦岭地区秦岭岩群中获得大量同位素年龄资料,其时代介于1867~2298Ma之间,表明秦岭岩群的时代主体应为古元古代(张国伟等,2001;张宗清等,2006)。

1.2 中新元古代宽坪岩群

中新元古代宽坪岩群主要为一套中深变质碎屑岩-基性火山岩-碳酸盐岩组成的层状无序岩系,是东段陕西境内宽坪岩群向西的自然延伸部分。分布于天水东南散岔以东的漫坪农场、瓦窑沟、西沟里等地带,大部分为花岗岩体所吞没而呈残片出露。区域上与北侧奥陶纪草滩沟群呈构造关系接触。根据变质岩石组合特征,研究区内宽坪岩群可划分为大理岩岩组和片麻岩岩组两个非正式构造岩石地层单位。根据近年来东秦岭地区宽坪岩群同位素年代学资料多集中在1974~813Ma之间(张国伟等,2001;张宗清等,2006),结合其变形变质特征及与相邻地层接触关系,其时代置于中新元古代。

1.3 新元古代木其滩岩组

木其滩岩组是1:250000天水市幅区调时从原划分的李子园群中分解并新厘定出的一套非正式构造岩石地层单位。主要岩性以发育变质基性火山岩为特征,现多为斜长角闪片岩,有少量强烈变形的变质辉长岩和变质硅质岩(石英片岩)呈“夹层状”出现于变质火山岩中。主要分布于天水南李子园—木其滩—花庙河夏家坪一带。北与古元古代秦岭岩群呈韧性剪切带构造接触关系,南与早古生代太阳寺岩组和李子园群呈断层接触关系或被花岗岩体侵入。

木其滩岩组变质基性火山岩的主量元素、微量元素和稀土元素地球化学特征表明岩石形成于具有

N-MORB和E-MORB特点的洋盆构造环境^①,只是由于后期构造改造而呈独立的构造岩块产出,其岩石组合特征单一、均匀,可以与东秦岭商南松树沟地区的斜长角闪片岩单位相对比。张维吉等(1994)曾在花庙河夏家坪变质基性火山岩(斜长角闪片岩)中获得Rb-Sr等时线年龄 $858 \pm 18\text{Ma}$ 。作者等在天水李子园木其滩地区获得变质基性火山岩(斜长角闪片岩)全岩Sm-Nd等时线年龄为 $932 \pm 54\text{Ma}$ (MSWD=0.34),表明其时代主体为新元古代^②。

1.4 寒武纪关子镇蛇绿岩

西秦岭北缘关子镇蛇绿岩原属前寒武系或早古生代“牛头河群”变质地层。张维吉等(1994)将分布于秦岭群南侧的中浅变质地层命名为震旦纪-早古生代“李子园群”(相当于东秦岭丹凤群),该地层中包含了本文所述的关子镇蛇绿岩。作者等在1:250000天水市幅区调中通过区域地层对比及详细的岩石学和岩石地球化学研究,从原“李子园群”中厘定出晚寒武世关子镇蛇绿岩^③(裴先治等,2004b,2007b),关子镇地区蛇绿岩及变质基性火山岩南侧以大型韧性剪切带/糜棱岩带与狭义“李子园群”相邻,北侧以片麻状变质辉长-闪长岩体与古元古代秦岭岩群相隔。在变质基性火山岩系南侧出现有蛇纹岩、变质辉石岩和变质辉长岩构造块体,它们共同组成了一个不完整的蛇绿岩组合(图2)(详见下文)。

1.5 晚寒武世—早奥陶世李子园群(狭义)

李子园群(狭义)为一套中浅变质的沉积-火山岩系。作者等在进行1:250000天水市幅区域地质调查时,依据野外调查研究和室内样品测试,将前人划分的“李子园群”进行了解体,并重新划分为5个不同的构造岩石单位^④(裴先治等,2004b,2005a,2005b,2006;丁仁平等,2004,2008b):①晚寒武世关子镇蛇绿岩;②流水沟变质中基性杂岩体(变质辉长岩-辉长闪长岩-闪长岩);③晚寒武世—早奥陶世李子园群(狭义);④早古生代太阳寺岩组和⑤泥盆纪舒家坝群灰岩岩组。分布于关子镇地区的“李子园群”解体为三部分,除分解出关子镇蛇绿岩和李子园群(狭义)外,新厘定出了流水沟变质辉长岩-辉长闪长岩体;分布于李子园—利桥—太阳寺一带的“李子园群”,原木质其滩岩组重新厘定为新元古代,原大草坝岩组大部分和黑湾里岩组部分划归为早古生代太阳寺岩组,原李家沟岩组由于仅局限分布在舒家坝—娘娘坝一带,根据区域展布和岩相对比划归中泥盆世舒家坝群上部灰岩组,所余部分仍称为李子园群(狭义)。

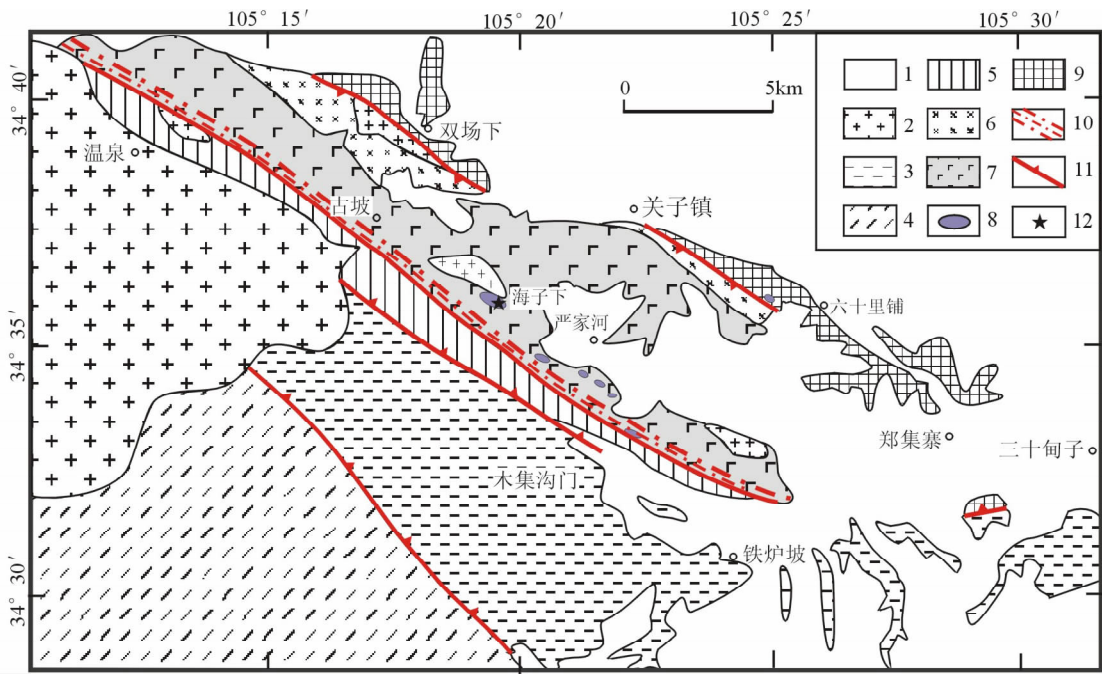


图 2 西秦岭北缘天水地区关子镇蛇绿岩地质略图

Fig. 2 Geological sketch map of Guanzizhen ophiolite in Tianshui area, Northern margin of the West Qinling

1—新生界;2—印支期花岗岩;3—上泥盆统大草滩群;4—早古生代太阳寺岩组石英片岩单位;5—早古生代李子园群火山-沉积岩系;6—流水沟变质辉长岩—辉长闪长岩体;7—8:关子镇蛇绿岩;7—变质基性火山岩/斜长角闪片岩;8—蛇纹岩、变质辉石岩及变质辉长岩;9—古元古界秦岭岩群中深变质杂岩;10—糜棱岩带;11—逆冲断层/逆冲型韧性剪切带;12—同位素年龄采样位置

1—Cenozoic;2—Indosinian granite;3—Upper Devonian Dacautan group;4—quartz schist unite of Early Palaeozoic Taiyangsi Formation;5—volcanic-sedimentary rock of Early Palaeozoic Liziyuan Group;6—Liushuigou meta-gabbro—gabbro-diorite;7~8—Guanzizhen ophiolite;7—metamorphic basic volcanic rock;8—serpentinite, pyroxenite and gabbro;9—metamorphic rock of Paleoproterozoic Qinling complex Group; 10—mylonite zone;11—thrust/thrust ductile shear zone;12—sampling location of isotopic age

该地层主要分布于天水南利桥南寇家庄—姚家坝—宽滩一带、李子园—董水沟门—分水岭一带和关子镇南火石坝—格板峪一线,空间上呈 3 个构造岩片断续展布。北侧、北东侧与古元古代秦岭岩群或关子镇蛇绿岩之间以韧性剪切带相接触,南侧、南西侧与泥盆纪大草滩群或早古生代太阳寺岩组之间以区域逆冲断层相接触。根据空间分布和岩石组合特征,李子园群可划分为三个非正式构造岩石地层单位:a 岩组:主要为黑云母石英(构造)片岩、绢云绿泥石英(构造)片岩、长英质(构造)片岩夹绿帘绿泥钠长片岩(变玄武岩、变玄武安山岩),局部夹少量结晶灰岩/大理岩、含石榴石黑云母石英片岩。b 岩组:主要为绿泥绢云母石英片岩、绢云母石英片岩、钙质绢云母石英片岩夹深灰色大理岩及不纯大理岩。c 岩组:主要为灰绿色-浅黄绿色条带状斜长角闪片岩/钙硅酸盐粒岩互层夹黑云母石英片岩、钙质片岩、条带状硅质岩及灰色-灰白色中厚层状大理岩及长英质糜棱岩。

该套变质岩系总体以变质碎屑岩夹碳酸盐岩为

主,局部夹变质中基性火山岩(变玄武岩、玄武安山岩、玻安岩)。张维吉等(1994)在娘娘坝柳林—董水沟门一带李子园群变质基性火山岩中采集同位素年龄样品,经宜昌地质矿产研究所测得全岩 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 $540 \pm 50\text{Ma}$ 。根据目前有限资料,李子园群时代暂置于晚寒武世—早奥陶世。

1.6 奥陶纪草滩沟群

草滩沟群主要分布于天水市东南部的党川石嘴—花石山—阴崖沟—秦岭沟一带和利桥东南一带,大致呈 NW 向连续展布,地层出露不甚完整,大部分被古生代花岗岩体所吞没,目前仅为残留部分。在利桥以东地带,北侧为花岗岩体,南侧与秦岭岩群呈断层接触关系。在花庙河地区,南侧也与秦岭岩群呈构造接触关系。

草滩沟群根据岩石组合特征划分为下部红花铺组和上部张家庄组。张家庄组上部主要为灰色-浅灰绿色变质英安岩、英安质凝灰岩、英安质火山角砾凝灰岩、凝灰质砂岩、凝灰质板岩夹变石英粉砂岩、粉砂质板岩,偶夹火山角砾岩及结晶灰岩;下部主要

为灰色变石英砂岩、粉砂质板岩为主夹变含砾砂岩、粉砂质灰岩透镜体。红花铺组上部主要灰绿色绿泥阳起钠长片岩及变质中基性火山碎屑岩为主;下部主要为灰色黑云母石英片岩、黑云母斜长石英片岩、二云母石英片岩、绢云母石英片岩夹绿泥绢云石英片岩及灰绿色变玄武安山岩、变安山岩或绿泥钠长片岩。杨志超等(1984)曾在东邻区陕西凤县红花铺杨家岭草滩沟群张家庄组所夹灰岩夹层或透镜体及条带状泥质粉砂岩中获得腕足类、三叶虫、腹足类及海百合茎等古生物化石。依据古生物化石组合,草滩沟群时代应属奥陶纪。

1.7 早古生代太阳寺岩组

太阳寺岩组是从原划“李子园群”中解体出来的一套构造岩石地层单位^①(丁仁平等,2004,裴先治等,2004b)。主要分布于两当太阳寺乡以北地区,呈狭长带状展布,从东到西从两当冉家院、太阳寺,过天子山和八卦山岩体经钱家坝、娘娘坝、峡门北断续延伸至杨家寺、金家河寨柯里一带被温泉岩体吞没。南北两侧均以断层与相邻地层单元接触,在太阳寺一太白一带北侧为泥盆纪大草滩群红绿砂岩岩组,南侧为泥盆系;娘娘坝一带北侧为泥盆纪大草滩群红绿砂岩岩组或晚寒武世一早奥陶世李子园群,南侧为泥盆纪舒家坝群;杨家寺-金家河寨柯里一带北侧为泥盆纪大草滩群红绿砂岩岩组,南侧为石炭系和泥盆纪大草滩群绿色砂岩岩组。它以石英(片)岩和绢云母石英片岩为主要岩性特征,原岩为成熟度较高的碎屑岩类。岩石类型主要以浅灰色-灰色中薄-中厚层状变质石英(砂)岩、石英片岩为主夹绢云母石英片岩、浅灰绿色含绿泥绢云石英片岩等,尤其向西部延伸逐渐以绢云母石英片岩为主夹石英片岩。太阳寺岩组目前尚未获得任何年龄和可靠的古生物资料,依据其岩石组合和变形变质特征其时代暂归属早古生代。

1.8 各构造岩石地层单位构造关系

各构造岩石地层单位之间多发育北倾逆冲型或逆冲-走滑型(斜冲)韧性推覆断层(加里东期)和逆冲型或逆冲-走滑型韧性逆冲推覆断层(印支期),并指示总体由 NNE 向 SSW 方向依次逆冲推覆叠置运动,并被中生代陆内走滑构造和浅层次逆冲构造所改造,且不同构造岩石地层单位的分布特征表现出东段(天水以东)逆冲和缩短幅度明显大于西段(天水以西),造成平面上各地层单位呈大型透镜体状分布或断续分布,向东延伸至高桥一带迅速构造尖灭。表明逆冲推覆作用和地壳缩短作用除受到南

北板块汇聚产生的构造作用外,还受到东北方向鄂尔多斯地块向 SW 方向的强力推挤和逆时针方向旋转构造作用的强烈影响,从而造成不同地段具有不同幅度的地壳缩短以及研究区的主要构造格架的基本型式。

2 早古生代蛇绿岩

2.1 关子镇蛇绿岩

关子镇地区蛇绿岩及变质基性火山岩南侧以大型韧性剪切带/糜棱岩带与早古生代李子园群相邻,北侧以片麻状变质辉长-闪长岩体与古元古代秦岭岩群相隔(图 1)。在变质基性火山岩系南侧还出现有蛇纹岩(变质橄榄岩)、变质辉石岩和变质辉长岩构造块体,它们组成了一个不完整的蛇绿岩组合。该蛇绿岩带向西被温泉花岗岩体吞没,至武山一带复又出现并与武山蛇绿岩相连接。

天水关子镇地区蛇绿岩出露较好(图 2),以发育大套变质基性火山岩(斜长角闪片岩)为特征。在关子沟东侧的海子下有蛇绿岩较完整剖面出露,从南到北依次出露有斜长角闪片岩(变质基性火山岩)、变中细粒辉长岩、变辉石岩(包括阳起石岩)、蛇纹岩(变质橄榄岩),其间均为断层接触关系,构成不同岩性岩片叠置体,南侧为一大型长英质糜棱岩带,北侧被印支期小型中细粒-中粒似斑状黑云母二长花岗岩侵入,大套变质基性火山岩就出露在该蛇绿岩带的北侧。因此,该蛇绿岩主体由变质基性火山岩(斜长角闪片岩)组成(裴先治等,2004b)。

天水关子镇地区蛇绿岩带内的基性火山岩属于中浅变质火山岩系(低角闪岩相)。其中蛇纹岩(变质橄榄岩)为墨绿色,块状构造,主要由蛇纹石等组成,常透闪石化、碳酸岩化;变辉石岩呈灰黑色,块状或片麻状构造,主要由辉石和少量基性斜长石组成,辉石多已变为角闪石或阳起石,但多保留辉石假象,基性斜长石常帘石化、绢云母化,发育定向组构;变辉长岩呈灰黑色,片麻状构造,中细粒-中粒变余辉长结构,主要由辉石(55%~60%)和基性斜长石(40%~45%)组成,辉石多变为角闪石,但可保留有辉石假象,普遍发育定向组构。斜长角闪片岩为暗绿-黑绿色,片状构造,细粒变晶结构,主要组成矿物为角闪石(60%~65%)、斜长石(35%~40%),少量绿帘石、阳起石等,具有强烈的定向排列。

根据裴先治等(2004b)研究,关子镇蛇绿岩中蛇纹岩的化学成分稳定、变化范围较小, SiO_2 含量为 38.82%~39.00%之间,显示富 Mg、贫 Al、Ca 和碱

特征, $Mg^\#$ 值和 $MgO/(MgO+FeO)$ 较高, 分别为 94.92~96.55 之间和 0.75~0.81 之间, 属于变质橄榄岩(阿尔卑斯型橄榄岩), 以纯橄榄岩和方辉橄榄岩为主要岩石类型。稀土总量 ΣREE 极低(为 $3.41 \times 10^{-6} \sim 5.75 \times 10^{-6}$ 之间), $(La/Yb)_N$ 介于 5.44~20.44 之间, $(La/Sm)_N$ 介于 2.70~20.66 之间, 显示出 LREE 略富集、MREE 较 HREE 亏损的下凹型分布曲线, 属于与蛇绿岩有关的超镁铁质岩。与原始地幔相比, 不相容元素 Cs、Rb、Th、U、Ta、Nb 等强烈富集, Ba、K、Sr 等强烈亏损。

变辉石岩和变辉长岩的 $Mg^\#$ 值较高(66.85~68.75 之间), 属于蛇绿岩中的镁铁质堆积岩。岩石的 ΣREE 明显高于变质橄榄岩(为 $270.55 \times 10^{-6} \sim 396.39 \times 10^{-6}$ 之间), $(La/Yb)_N$ 介于 11.50~24.29 之间, $(La/Sm)_N$ 介于 2.56~4.31 之间, 显示出 LREE 略富集、HREE 相对亏损的稀土元素分布曲线, Eu 呈弱的正异常或负异常(δEu 为 0.62~1.08)。与原始地幔相比, 富集大离子亲石元素、亏损高场强元素。LREE 和部分大离子亲石元素的富集可能与岩石邻近印支期花岗岩类侵入体引起的蚀变、花岗岩脉体的贯入和变质作用有关。

关子镇蛇绿岩中变质基性火山岩的岩石类型主要为玄武岩, 少数为玄武安山岩, 属于拉斑玄武岩系列。变质玄武岩 SiO_2 含量变化在 46.14%~51.50% 之间, 而变质玄武安山岩的 SiO_2 含量为 53.57%~56.54%。 TiO_2 含量较低, 变化范围为 0.40%~1.48% 之间(平均 0.93%)。 MgO 含量中等, 为 5.08%~8.16%, 相应的 $Mg^\#$ 变化范围为 49~61, 且 $FeO > Fe_2O_3$ 。稀土元素配分模式显示为 LREE 呈平坦型和略亏损型 REE 配分模式, 类似于 N-MORB, 具有低的 ΣREE , 变化范围为 $26.72 \times 10^{-6} \sim 61.41 \times 10^{-6}$, $LREE/HREE$ (1.10~1.92), $(La/Yb)_N$ 介于 0.54~1.31 之间(平均为 0.85), $(La/Sm)_N$ 为 0.86~1.39, 无明显的 Eu 异常或弱的正异常(δEu 为 0.90~1.16), 基本与 N-MORB 相似。变质基性火山岩的 N-MORB 标准化微量元素分布图显示出具有洋脊玄武岩和过渡型玄武岩的特征, 大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、Ta 略富集, 而其它多数高场强元素(HFSE)丰度(除 Sc、Cr 外)具有接近 1 的平坦型分布型式, 没有明显的负 Nb 异常, 各类微量元素含量和比值明显不同于 E-MORB、OIB 而与 N-MORB 接近(裴先治等, 2004b)。

上述地球化学特征表明, 关子镇蛇绿岩中的变质基性火山岩总体属于 N-MORB 型玄武岩, 是洋

脊型蛇绿岩的重要组成部分。

董云鹏等(2008)对关子镇蛇绿岩中的变玄武岩样品进行了新的地球化学研究, 认为变玄武岩可划分为 A、B 两类, 均为拉斑玄武岩系列岩石, 总体均具有 N-MORB 特征, 源于亏损地幔源区, 形成于古洋盆洋中脊构造环境。侯青叶等(2006)的研究认为关子镇蛇绿岩中的变玄武岩为 N-MORB, 关子镇蛇绿岩应形成于形成于洋中脊或者大陆裂解扩张形成的小洋盆环境, 而非与岛弧有关的环境。董云鹏等(2008)和侯青叶等(2006)等的结论与本文的研究认识基本一致。

2.2 武山蛇绿岩

武山蛇绿岩是东部关子镇蛇绿岩的西延部分, 主要分布在武山县城北侧的李家河、鲁班沟及武山县城西北的鸳鸯镇、高家河等地。主要由蛇纹岩(变质橄榄岩)、中细粒辉长岩及变质基性火山岩(变玄武岩)组成。其北侧常与古元古代秦岭岩群呈构造接触, 南侧与石炭纪灰岩呈断层接触。蛇纹岩主要在鸳鸯镇大面积出露, 高家河一带及武山县城北的李家河等地基性火山岩较多。蛇绿岩总体多呈构造残块呈北西西向断续产出(丁仁平, 2008b)(图 3)。

武山蛇绿岩中蛇纹岩的化学成分稳定、变化范围较小, SiO_2 含量为 38.02%~42.06% 之间, 显示富 Mg、贫 Al、Ca 和碱特征, $Mg^\#$ 值较高, 介于 95.51~97.44 之间, 属于变质橄榄岩(阿尔卑斯型橄榄岩), 是以纯橄榄岩和方辉橄榄岩为主要岩石类型。稀土总量 ΣREE 极低(为 $0.23 \times 10^{-6} \sim 1.95 \times 10^{-6}$ 之间), $(La/Yb)_N$ 介于 0.66~3.29 之间, $(La/Sm)_N$ 介于 0.91~3.04 之间, 显示出 LREE 略富集、MREE 较 HREE 亏损的略下凹平缓型分布曲线, 属于与蛇绿岩有关的超镁铁质岩。与原始地幔相比, 不相容元素 Cs、Rb、Th、U、Ta、Nb 等强烈富集, Ba、K、Sr 等强烈亏损。

武山蛇绿岩中辉长岩的 SiO_2 含量为 54.28%~56.18%, $Mg^\#$ 值较高(71.72~73.49), 属于蛇绿岩中的镁铁质堆积岩。岩石的 ΣREE 明显高于变质橄榄岩, ΣREE 为 $155.79 \times 10^{-6} \sim 164.68 \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N$ 为 7.72~9.17, $(La/Sm)_N$ 为 2.95~3.60, 显示出 LREE 略富集、HREE 相对亏损的右倾稀土元素分布形式, Eu 呈弱负异常(δEu 为 0.59~0.67), 与原始地幔相比, 富集大离子亲石元素、亏损高场强元素。

武山蛇绿岩中变质基性火山岩的岩石类型主要为玄武岩, 个别为玄武安山岩, 属于拉斑玄武岩系

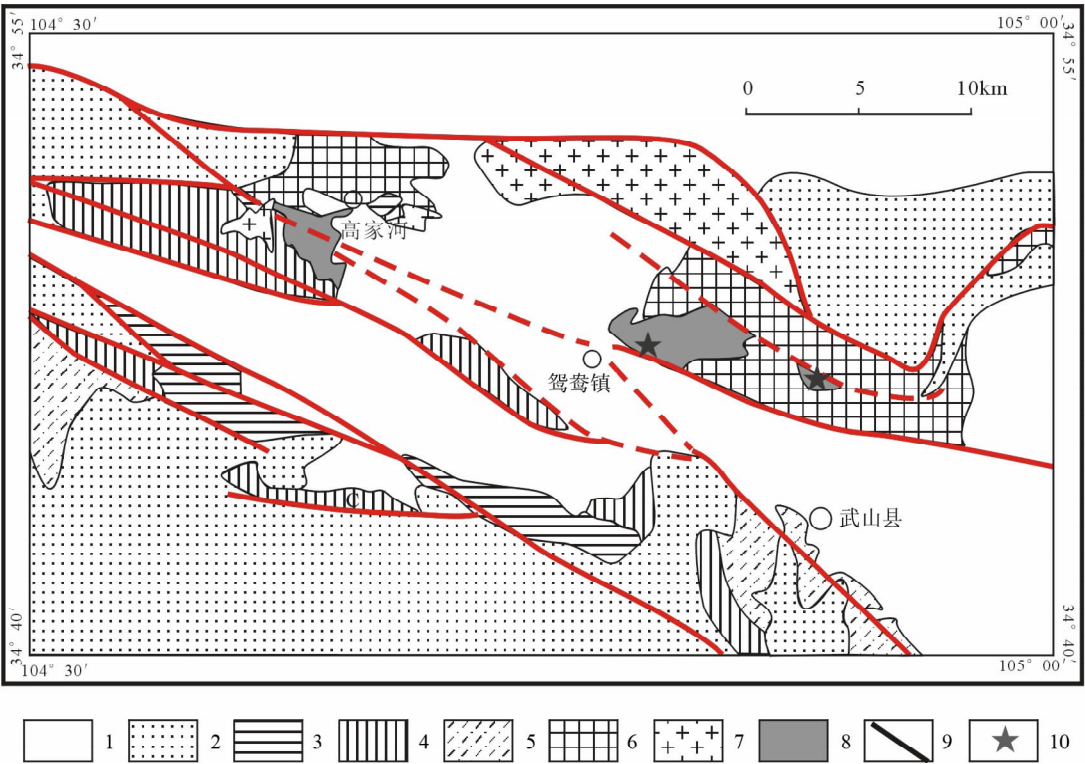


图 3 西秦岭北缘武山地区地质简图

Fig. 3 Geological sketch map of Wushan area, Northern margin of the West Qinling

1—新生界;2—白垩系;3—二叠系;4—石炭系;5—泥盆纪大草滩群;6—古元古代秦岭岩群;7—印支期花岗岩;
8—蛇绿混杂岩;9—断裂;10—采样位置

1—Cenozoic;2—Cretaceous;3—Permian;4—Carboniferous;5—Devonian Dacatou Group;6—Paleoproterozoic Qinling Group;
7—Indosinian granite;8—ophiolite melange;9—fault;10—sampling location

列。变质玄武岩 SiO_2 含量变化在 48.67% ~ 52.16% 之间,而变质玄武安山岩的 SiO_2 含量为 53.23%。 TiO_2 含量较低,变化范围为 1.58% ~ 1.95% 之间(平均 1.77%)。 MgO 含量中等,介于 4.85% ~ 7.18% 之间,相应的 $\text{Mg}^\#$ 变化范围为 49.54 ~ 61.07,且 $\text{FeO} > \text{Fe}_2\text{O}_3$ 。变质基性火山岩的稀土元素配分模式显示为 LREE 呈平坦型和略富集型 REE 配分模式,类似于 E-MORB,具有低的 ΣREE ,变化范围为 $57.48 \times 10^{-6} \sim 95.56 \times 10^{-6}$, LREE/HREE (2.70 ~ 3.68), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 1.91 ~ 3.41 之间(平均为 2.33), $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 1.22 ~ 2.00,无明显的 Eu 异常(δEu 为 0.84 ~ 1.00),基本与 E-MORB 相似。变质基性火山岩样品的 N-MORB 标准化微量元素分布图显示出具有洋脊玄武岩和过渡型玄武岩的特征,大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、Ta 略富集,而其它多数高场强元素(HFSE)丰度(除 Sc、Cr 外)具有接近 1 的平坦型分布型式,与岛弧玄武岩和板内玄武岩的微量元素分布型式不

同。同时,没有明显的 Nb、Ta 及 Ti 负异常,表明不属于岛弧玄武岩。各类微量元素含量和比值不同于岛弧拉斑玄武岩、OIB、N-MORB,而接近于 E-MORB(丁仁平,2008b)。

上述地球化学特征表明,武山蛇绿岩中的变质基性火山岩总体属于 E-MORB 型的玄武岩,是洋脊型蛇绿岩的重要组成部分。

董云鹏等(2007)分析了武山一带的李家河、鸳鸯镇、鲁班沟和高家河四个剖面的玄武岩样品地球化学数据后认为,李家河、鸳鸯镇和鲁班沟玄武岩为亚碱性系列岩石,总体具有 E-MORB 特征,推测形成于古洋盆初始裂解的洋中脊构造环境;高家河玄武岩与上述样品明显不同,具有 LREE 强烈富集、富集 LILE 和亏损 HFSE 等特征,推测其形成于岛弧环境(董云鹏等,2007; Dong Yunpeng, et al, 2007)。侯青叶等(2006)的研究认为武山蛇绿岩中的变玄武岩具有 E-MORB 特征,因此认为武山蛇绿岩形成于洋岛环境或者洋中脊环境(其地幔源区为

富集型)。

2.3 蛇绿岩的形成时代

2.3.1 关子镇蛇绿岩的形成时代

裴先治等(2007b)已对关子镇蛇绿岩采用 LA-ICP-MS 法对蛇绿岩中辉长岩的岩浆锆石进行了 U-Pb 同位素年龄测试。该辉长岩样品(HZX03)采自关子镇南的海子下,采样点地理坐标为 $N34^{\circ}35'48.7''$, $E105^{\circ}19'13.6''$ 。因其与变辉石岩、蛇纹岩(变质橄榄岩)共生,因此无疑可以代表蛇绿岩的形成年龄。锆石的 Th/U 比值变化范围较小,介于 0.50~0.98 之间,且绝大多数 Th/U 比值 >0.4 ,表明了典型岩浆成因锆石特征。18 个锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 494~505Ma 之间,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $499.7 \pm 1.8\text{Ma}$ (MSWD=2.2),为蛇绿岩所代表的洋盆扩张时代。关子镇蛇绿岩中辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明,以关子镇蛇绿岩为代表的西秦岭北缘古洋盆的扩张时代为 $499.7 \pm 1.8\text{Ma}$ 的晚寒武世期间。

杨钊等(2006)对关子镇蛇绿岩中的辉长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,但辉长岩样品采自关子镇蛇绿岩北侧的关子镇东流水沟,且未对样品进行地球化学分析测试,获得辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $471 \pm 1.4\text{Ma}$ (MSWD=1.03)。根据样品位置,本文认为该样品年龄可能代表了流水沟变质辉长岩-闪长岩体的形成年龄。

李王晔等(2007)和李王晔(2008)也对关子镇蛇绿岩以及中基性岩浆岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究,获得流水沟辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $534 \pm 9\text{Ma}$ (MSWD=1.1)、关子沟口闪长岩(斜长花岗岩)锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $517 \pm 8\text{Ma}$ (MSWD=0.83)、关子沟南海子下辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $489 \pm 10\text{Ma}$ (MSWD=0.58)。裴先治等(2005a)曾获得关子镇流水沟辉长岩 TIMS 锆石 U-Pb 年龄为 $507 \pm 3\text{Ma}$ 。李王晔等(2007)和李王晔(2008)通过岩石地球化学研究认为流水沟辉长岩-闪长岩体可能包括了古大洋和古岛弧两部分,并认为部分闪长岩为大洋斜长花岗岩。

根据已有同位素年龄资料,本文认为关子镇蛇绿岩的形成时代大致在 534~489Ma 之间的寒武纪,而流水沟辉长岩-辉长闪长岩体形成时代为 $471 \pm 1.4\text{Ma}$ 。

2.3.2 武山蛇绿岩的形成时代

杨军录等(2001)对出露于武山县鸳鸯镇—鲁班沟一带的超基性岩、变质基性侵入岩和枕状玄武岩

进行了地球化学及年代学研究,给出李家河变玄武岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $1570 \pm 54\text{Ma}$ 。但经李王晔(2008)检查发现该年龄仅为部分样品(7 件中的 4 件)原始数据拟合的结果,实际 7 件样品整体上不构成等时线,原作者也未给出舍弃 3 件样品的原因。因而,该年龄的正确性值得怀疑。

李王晔(2008)对分布于武山地区岛弧成因的桦林沟变辉长岩和鸳鸯镇变辉长闪长岩样品的锆石进行了 SHRIMP U-Pb 定年,分别获得 $440 \pm 5\text{Ma}$ (MSWD=2.2)和 $456 \pm 3\text{Ma}$ (MSWD=2.7)的岩浆结晶年龄,它们指示了武山地区洋壳的俯冲消减时代为晚奥陶世。该年龄也间接地限定了武山蛇绿岩的形成时代应在早古生代早-中期。

3 早古生代古岛弧岩浆作用

3.1 早古生代岛弧火山岩

3.1.1 李子园群变质火山岩

李子园群为一套中浅变质的沉积-火山岩系(裴先治等,2006)。其中的变质火山岩多呈夹层或构造透镜体产出,大部分已变质成为绿片岩或斜长角闪片岩。绿片岩类包括绿帘绿泥钠长片岩、绿泥绢云母石英片岩等。岩石片理均很发育,变形强烈,片状、柱状矿物均呈强烈定向排列,局部甚至糜棱岩化或发育为构造片岩。

根据裴先治等(2006)的研究,变质火山岩主要为玄武岩、玄武安山岩,属于亚碱性系列, SiO_2 含量介于 48.79%~54.64% 之间, TiO_2 含量较低(0.29%~0.88% 之间),低于 MORB 和 OIB,而与岛弧火山岩的 TiO_2 含量接近。 $\text{Mg}^\#$ 值变化大(0.54~0.74),反映了岩浆经历了一定程度的结晶分异作用的演化。全铁 FeO_T 含量变化于 8.84%~10.72% 之间,ALK ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 变化较大,为 0.50%~3.57%,且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 含量, K_2O 含量低(0.20%~0.92%),显示出富钠低钾特征。岩石的稀土元素分布型式呈 LREE 略富集型,LREE 相对 HREE 略微富集,稀土元素总量为 $\sum \text{REE} = 17.17 \times 10^{-6} \sim 103.03 \times 10^{-6}$,LREE/HREE 比值为 1.94~5.09, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.31 \sim 5.61$, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 1.34 \sim 3.16$, δEu 为 0.81~1.20,具有弱的负 Eu 异常-正 Eu 异常,与岛弧型火山岩的稀土元素分布型式相似(裴先治等,2006)。在岩石微量元素原始地幔标准化的蛛网图上,显示富集大离子亲石元素(LILE)Cs、Sr、Th、U,相对亏损 Rb、K 和高场强元素(HFSE)Nb、P、Sm、Ti 和 Y,类似于低钾岛弧拉

斑玄武岩。在岩石微量元素 MORB 标准化蛛网图上, 显示出 Th 的明显富集和不相容元素 Sr、K、Rb、Ba 的富集以及 Nb、Zr、Hf、Sm、P、Ti、Y、Yb 的亏损, 具有岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩特征(裴先治等, 2006)。特别是 Nb 的负异常反映了板块俯冲环境中火山岩的典型特征。

在李子园群变质火山岩中有玻安岩发育(裴先治等, 2006)。按照 Crawford 等(1989)对玻安岩的定义, 玻安岩系列岩石是指 $\text{SiO}_2 > 53\%$, 同时 $\text{Mg}^\# > 0.6$, 以及具有这些地球化学特征的母岩浆形成的一类火山岩。Piercey et al. (2001)总结了前人资料后认为, 玻安岩应具有以下特殊的地球化学特征: ①高 MgO 、 $\text{Mg}^\#$ 和相容元素含量(包括 Cr、Ni、Co 和 P 等), 以及高 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值; ②低的 TiO_2 含量; ③中等的(安山质) SiO_2 含量($> 53\%$); ④具有 U 型稀土元素分布模式; ⑤强烈亏损高场强元素(HFSE); (6)通常(但非总是)相对于中稀土元素的 Zr 和 Hf 富集。由于玻安岩的形成要求同时满足: ①亏损地幔橄榄岩; ②具有 C-O-H 挥发分源区; ③在相对较浅(25km)的地幔楔具有异常高的地热梯度(1360°C)这三个特殊条件(Falloon et al., 1991), 因此玻安岩的分布很稀少, 在古岛弧和现代岛弧岩浆系列中, 玻安岩的存在具有重要的构造指示意义, 普遍认为几乎所有的玻安岩都产于弧前环境并与洋内消减作用有关(Crawford et al., 1989; Piercey et al., 2001; Falloon et al., 1991; 张旗, 1990; 张旗和周国庆, 2000)。

李子园群具有玻安岩特征的岩石 SiO_2 含量中等($53.59\% \sim 59.28\%$), 在玻安岩范围内($53\% \sim 60\%$); TiO_2 含量低, 小于 0.5% ($0.24\% \sim 0.48\%$), 低于 MORB(平均为 1.5%) 和岛弧火山岩(平均 0.8%) 的 TiO_2 含量; 具有较低的 FeO_T 含量($8.11\% \sim 9.64\%$)、 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值($0.39 \sim 0.54$) 和较高的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值(大于 20, 为 $33.88 \sim 64.29$), P_2O_5 含量也很低(为 $0.03\% \sim 0.04\%$), 这与玻安岩的主元素特征基本一致。但具有相对较低的 MgO 含量($4.90\% \sim 4.96\%$), $\text{Mg}^\#$ 值中等($0.54 \sim 0.58$), Al_2O_3 含量较高($15.43\% \sim 16.26\%$), 表明它们已不是初始岩浆, 而可能是玻安岩原始岩浆演化的产物, 经历过一定程度的分馏结晶作用。玻安岩的 Zr、Yb、Y 含量较低, 分别为 $34.5 \times 10^{-6} \sim 94 \times 10^{-6}$ 、 $0.96 \times 10^{-6} \sim 1.13 \times 10^{-6}$ 和 $7.78 \times 10^{-6} \sim 9.03 \times 10^{-6}$, 均与玻安岩一致。典型玻安岩具有较低的 Ti/Zr 比值(小于 70)及 V/Zr 比值(小于 10)

和较高的 Zr/Y 比值($3 \sim 12$), 本文中的玻安岩同样具有较低的 Ti/Zr 比值($15 \sim 83$)及 V/Zr 比值($2.18 \sim 8.35$)和较高的 Zr/Y 比值($3.82 \sim 12.08$)。但难熔元素 Cr、Ni 的含量同 MgO 一样并不高, 反映它们已是玻安岩原始岩浆结晶分异的产物。在微量元素 MORB 标准化蛛网图上显示出相对富集大离子亲石元素(LILE), 特别是 Rb、Ba、Th, 而亏损高场强元素(HFSE), 如 Nb、Ta、P、Ti、Y、Yb。这是较典型的岛弧火山岩的微量元素分布型式。玻安岩的稀土元素总量较低, $\Sigma \text{REE} = 20.59 \times 10^{-6} \sim 21.25 \times 10^{-6}$, 低于 MORB 和 IAB, 同时富集 LREE, 相对亏损 HREE。在球粒陨石标准化的稀土元素分布模式上, 显示为亏损 MREE 的 U 型稀土元素分布型式, 这是典型玻安岩的稀土元素特征。同时具有中等的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值($1.78 \sim 2.18$), 也与典型玻安岩一致。目前普遍认为, 这种玻安岩的形成可解释为在俯冲消减的洋壳或陆壳板块带入的富 LILE 和 LREE 的流体参与下, 由地幔楔中亏损的地幔橄榄岩部分熔融作用形成(Crawford et al., 1989; Piercey et al., 2001; Falloon et al., 1991; 张旗, 1990; 张旗和周国庆, 2000)。

上述岩石的地球化学特征表明, 天水地区李子园群火山岩主要表现出岛弧火山岩的地球化学特征, 揭示出其总体形成于活动大陆边缘古岛弧或洋内岛弧构造环境, 是岛弧岩浆分异结晶作用的产物, 而不属于具有 N-MORB 特征的关子镇蛇绿岩的组成部分。同时, 由于李子园群中的变质中基性火山岩中存在具有玻安岩地球化学特征的岩石, 并与李子园群中的岛弧玄武岩、玄武安山岩共生。因此, 李子园群火山岩主要形成于与岛弧或与岛弧相关的弧前盆地构造环境。

3.1.2 草滩沟群变质火山岩

草滩沟群主体出露在水党川—利桥一带以及两当张家庄、凤县草凉驿—唐藏—红花铺一带。根据东邻凤县红花铺地区对草滩沟群火山岩的研究(孙民生, 1998; 王德耀, 2002), 草滩沟群火山岩包括有火山岩碎屑岩和熔岩两大类, 前者主要产于张家庄组中, 岩石类型有集块熔岩、角砾熔岩、火山角砾岩、岩屑晶屑凝灰岩及凝灰岩等, 而红花铺组中仅有少量岩屑晶屑凝灰岩、凝灰质砂岩; 后者多见于张家庄组中, 在红花铺组中常常呈夹层或透镜体产出, 岩石类型以英安岩、流纹岩为主, 次有安山岩和少量玄武岩。

闫全人等(2007a)对两当张家庄草滩沟群火山

岩的研究表明,火山岩类型主要为玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩。其中基性熔岩为拉斑玄武岩系列,而中-酸性熔岩则以钙碱性系列为主。 SiO_2 含量变化大,包含了从基性到酸性各类岩石,以中-酸性火山岩为主,中基性或基性岩较少。草滩沟群基性火山岩的稀土元素总量为 $59.06 \times 10^{-6} \sim 65.26 \times 10^{-6}$,中-酸性熔岩为 $92.65 \times 10^{-6} \sim 283.82 \times 10^{-6}$ 。基性熔岩的 LREE 中度富集, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 2.50~2.97,球粒陨石标准化稀土配分形式呈右倾形。中-酸性熔岩的 LREE 显著富集, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 4.57~10.15,稀土配分形式同样呈右倾形。N-MORB 标准化的微量元素蛛网图上,草滩沟群火山岩的大离子亲石元素(LILE,如 Sr、K、Rb、Ba 和 Th)明显富集,而相对 N-MORB 较低的高场强元素(如 Ta、Nb、Ce、P、Zr、Hf、Sm、Ti、Y 和 Yb)丰度,以及明显的 Ta、Nb 低谷,显示了典型的岛弧火山岩的特征。Sr、Nd、Pb 同位素组成综合分析表明,草滩沟群火山岩的岩浆源区为混染的富集地幔源区,表明草滩沟群火山岩是俯冲板片熔融和地壳混染的产物,进而说明草滩沟群火山岩是与俯冲作用相关的岩浆活动的产物,形成于岛弧环境。

关于草滩沟群的形成时代,杨志超等(1984)依据张家庄组火山岩中所夹的灰岩夹层或透镜体及条带状泥质粉砂岩中获得的古生物化石限定其形成时代为奥陶纪。王洪亮等(2007)在采自甘肃省两当县张家庄乡桑园村南侧的草滩沟群变质中基性火山岩中挑选锆石进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定,在获得重大意义的古老捕虏锆石年龄信息 $4078 \pm 5\text{Ma}$ 的同时,测年样品的所有 36 个测点中有 21 个测点年龄集中在 $456.4 \pm 5\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.6$),该年龄基本代表了草滩沟群火山岩的成岩年龄,即该火山岩形成时代为晚奥陶世。

3.2 早古生代岛弧型岩浆岩

3.2.1 流水沟中基性杂岩体

流水沟中基性岩浆杂岩体分布于天水市以西的关子镇长沟—流水沟、甘谷双场—武山武家河一线,岩体形态为不规则状,呈 NWW—SEE 方向延伸,东西两端及中部被新生代地层所覆盖。东北侧与古元古代秦岭岩群片麻岩和大理岩单位呈构造接触关系,使杂岩体向北韧性逆冲于秦岭岩群之上;西南侧与关子镇蛇绿岩呈构造接触关系,其间发育韧性剪切变形带,致使两者发育的构造面理平行一致,在不同地段向南或北陡倾。通过野外地质填图和综合分析,流水沟中基性杂岩体可分出 3 种岩石类型:

变辉长岩、变辉长闪长岩和变闪长岩。

根据裴先治等(2005a,2005b;Pei Xianzhi et al.,2007a)研究,岩石的 SiO_2 含量介于 $52.47\% \sim 61.74\%$ 之间变化, TiO_2 含量较低,变化于 $0.30\% \sim 0.88\%$ 之间,低于 MORB 和 OIB,而与岛弧玄武岩接近。 $\text{Mg}^\#$ 值较低,在 $52.01 \sim 56.65$ 之间变化,反映了岩浆经历了一定程度的结晶分异作用的演化。全铁 FeO_T 含量变化于 $7.00\% \sim 10.30\%$ 之间, $\text{ALK}(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 为 $1.69\% \sim 2.12\%$,且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 含量,且 K_2O 含量低($0.10\% \sim 0.20\%$),显示出富钠低钾,属于低钾拉斑玄武岩系列。岩石的稀土元素分布型式呈 REE 近平坦型-LREE 略富集型,LREE 相对 HREE 略微富集,稀土元素总量为 $\Sigma\text{REE} = 18.62 \times 10^{-6} \sim 103.0 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 $2.05 \sim 5.01$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.10 \sim 5.61$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.13 \sim 3.16$, δEu 为 $0.85 \sim 1.01$,具有很弱的负 Eu 异常-无异常。与岛弧型火山岩的稀土元素配分型式相似。在岩石微量元素原始地幔标准化的蛛网图上,显示富集大离子亲石元素(LILE)Cs、Ba、Sr、Th、U,相对亏损 Rb 和高场强元素(HFSE)Nb、P、Sm、Ti 和 Y,类似于低钾岛弧拉斑玄武岩。在岩石微量元素 MORB 标准化蛛网图上显示出 Th 的明显富集和不相容元素的富集以及 K、Nb、P、Ti、Cr 的亏损,略具有 Ba、Sc 的正异常,具有岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩特征。特别是 Nb 的负异常是岛弧火山岩的显著特征。变辉长岩和变辉长闪长岩的微量元素含量和比值与岛弧玄武岩相近,而变闪长岩的微量元素含量和比值与岛弧安山岩非常类似。

上述岩石的地球化学特征表明,关子镇流水沟中基性岩浆杂岩中各类火成岩均表现出岛弧火山岩的地球化学特征,揭示出其总体形成于古岛弧构造环境,是岛弧岩浆分异结晶作用的产物,而不属于岛弧岩杂岩南侧分布的具有 N-MORB 特征的关子镇蛇绿岩的组成部分。

根据杨钊等(2006)对关子镇蛇绿岩北侧的关子镇东流水沟辉长岩的定年研究,获得辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $471 \pm 1.4\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.03$)。根据样品位置,本文认为该样品年龄可能代表了流水沟变质辉长岩-闪长岩体的形成年龄,即流水沟岛弧型中基性岩浆杂岩形成于中奥陶世。

3.2.2 百花中基性杂岩体

百花中基性岩浆杂岩体分布于天水利桥乡以北的百花林场—散岔一带,岩体形态为不规则状,受后

期新岩体的上侵挤位和吞蚀,形态更为复杂。百花杂岩体总体呈 NW 走向,东北侧与中元古代宽坪岩群以及仙坪二长花岗岩体相邻,西北侧与奥陶纪草滩沟群浅变质岛弧型火山岩-沉积岩系呈侵入接触关系,西南侧与熊山沟中粗粒似斑状二长花岗岩体侵入并呈断层接触关系。杂岩体南侧由北向南分布有古元古代秦岭岩群、关子镇蛇绿岩残片、李子园群以及晚泥盆世大草滩群含砾碎屑岩系,其间均为构造接触关系。

通过野外调研和综合分析(裴先治等,2005a, 2005b, 2007c, 2007d; Pei Xianzhi et al, 2007a, 2007b),百花变质岩杂岩体可分出 5 种岩石类型:①变辉石岩;②变辉长岩-辉长闪长岩;③变闪长岩;④石英闪长岩;⑤黑云母斜长花岗岩。这一系列岩浆岩组合具有岛弧型岩浆活动特点。由于岩石也已经历较强的韧性剪切变形和变质作用改造,普遍发育强烈的定向组构,原生矿物组合基本已被变质矿物组合所取代,但在变形较弱地带仍能看到岩石具有变余辉长结构等岩浆组构。在闪长岩、石英闪长岩中还有中细粒辉石岩、辉长岩等暗色包体。

变辉石岩的 SiO_2 含量介于 $43.08\% \sim 45.18\%$ 之间, TiO_2 含量较低 ($0.24\% \sim 0.30\%$); MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值较高,分别在 $16.00\% \sim 16.09\%$ 和 $81.11 \sim 82.50$ 之间,反映存在辉石的堆晶作用。 FeO_T 含量变化于 $10.50\% \sim 11.42\%$ 之间, $\text{ALK}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 $0.98\% \sim 1.31\%$,且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 含量,显示出富钠低钾。变辉长(闪长)岩 SiO_2 含量介于 $46.10\% \sim 52.48\%$ 之间, TiO_2 含量较低 ($0.25\% \sim 0.84\%$),与岛弧玄武岩接近,反映其源区可能与俯冲到深部的洋壳有关。 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值较高且变化大,分别在 $5.07\% \sim 11.90\%$ 和 $56.41 \sim 80.92$ 之间,反映原始岩浆在上升过程中经历了一定程度的结晶分异作用的演化。全铁 FeO_T 含量变化于 $7.71\% \sim 12.18\%$ 之间, $\text{ALK}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为 $0.95\% \sim 1.95\%$,且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 含量,显示出富钠低钾,为拉斑玄武岩系列岩石。

变辉石岩的稀土元素分布型式呈 REE 近平坦型-LREE 轻微富集型, LREE 与 HREE 之间分馏不明显,稀土元素总量为 $\Sigma \text{REE} = 10.14 \times 10^{-6} \sim 15.99 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 $1.97 \sim 2.91$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.10 \sim 3.49$, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 1.50 \sim 2.69$, δEu 为 $1.02 \sim 1.12$, 具有很弱的正 Eu 异常,暗示有斜长石的堆晶作用。变辉长(闪长)岩的稀土元素分布型式也同样呈 REE 近平坦型-LREE 轻微富集

型,与变辉石岩的配分模式非常相似, LREE 与 HREE 之间分馏不明显,稀土元素总量高于变辉长岩且变化较大, ΣREE 为 $18.39 \times 10^{-6} \sim 56.81 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 $1.73 \sim 2.53$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.19 \sim 1.84$, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 0.92 \sim 1.38$, δEu 为 $0.83 \sim 0.90$, 具有很弱的负 Eu 异常,暗示有斜长石的结晶分异作用,与岛弧火山岩的稀土元素配分型式相似。在岩石微量元素原始地幔标准化的蛛网图上,变辉石岩和变辉长(闪长)岩的分布型式总体是很相似,即都显示富集大离子亲石元素(LILE)Cs、Ba、Sr、Th、U,而相对亏损 Rb 和高场强元素(HFSE)Nb、P、Sm、Ti 和 Y,显示同源岩浆演化成因特征。在岩石微量元素 MORB 标准化蛛网图上,变辉石岩和变辉长(闪长)岩的分布型式总体是很相似,显示出不相容元素的富集以及 K、Nb、P、Zr、Ti、Y 的亏损,略具有 Ba、Sc 的正异常,且变辉石岩比变辉长(闪长)岩更加亏损 Nb、Ti、Y、Yb,明显不同于 MORB 和 OIB,而具有岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩特征(裴先治等,2005a, 2005b, 2007d; Pei Xianzhi et al, 2007a, 2007b)。

上述岩石的地球化学特征表明,天水地区百花岩浆杂岩中各类基性火成岩是活动陆缘岛弧岩浆活动的产物,揭示出其总体形成于古岛弧构造环境,是相对原始的岛弧环境岩浆分异结晶作用的产物。

裴先治等(2007c, 2007d)对百花杂岩体中辉长岩进行锆石 U-Pb 年代学研究,获得辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $449.7 \pm 3.1\text{Ma}$ (MSWD = 1.9)。表明百花岩浆杂岩体的主体岩浆结晶时代为晚奥陶世,与李王晔(2008)获得的武山地区岛弧成因的桦林沟变辉长岩和鸳鸯镇变辉长闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $440 \pm 5\text{Ma}$ (MSWD = 2.2) 和 $456 \pm 3\text{Ma}$ (MSWD = 2.7) 比较接近。

4 早古生代俯冲-碰撞型花岗质岩浆活动

西秦岭北缘地区广泛发育有加里东期俯冲型-碰撞型深成花岗质岩浆的侵入活动。俯冲型花岗岩类如凤县地区唐藏石英闪长岩体(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $454.7 \pm 1.9\text{Ma}$, MSWD = 1.6)(陈隽璐等,2007, 2008)、红花铺英云闪长岩体(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $450.5 \pm 1.9\text{Ma}$, MSWD = 1.8)(王洪亮等,2006)等。碰撞型花岗岩类如党川花岗岩体(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $438 \pm 3\text{Ma}$)(王婧等,2008)以及熊山沟似斑状二长花岗岩

体(全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $430 \pm 15 \text{ Ma}$)、柴家庄酒刺梁花岗岩体(全岩 Rb-Sr 等时年龄 424.4 Ma)、火炎山花岗岩体(全岩 Rb-Sr 等时年龄为 $399 \pm 7 \text{ Ma}$)及仙坪花岗岩体(全岩 Rb-Sr 等时年龄为 $396 \pm 7 \text{ Ma}$)等^①。

4.1 俯冲性花岗岩类

凤县唐藏石英闪长岩体位于商丹带北侧(陈隽璐等,2007,2008a),呈不规则岩株状侵入位于早古生代丹凤群火山-沉积岩之中,岩体面积约 20 km^2 ,与围岩之间呈侵入接触关系。岩体边部呈弱的片麻状构造,片麻理走向与区域北西向主构造线展布方向近于平行。唐藏岩体 SiO_2 变化于 $62.02\% \sim 64.26\% (>56\%)$, Al_2O_3 介于 $16.55\% \sim 17.45\% (>15\%)$, Na_2O 介于 $4.99\% \sim 6.91\% (>4.5\%)$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$,与钠质埃达克岩的主量元素成分一致。 MgO 为 $1.71\% \sim 2.09\%$, $\text{Mg}^\# = 0.59 \sim 0.63 (>0.47)$,应属富 Mg 埃达克岩; $\text{A}/\text{CNK} = 0.82 \sim 1.01$,为偏铝质钙碱系列埃达克岩(陈隽璐等,2007,2008a)。大离子亲石元素(LILE)K、Th、Rb、Ba、Sr 等富集,高场强元素(HFSE)Ta、Nb、Y、Yb 等相对亏损且向右逐渐降低。微量元素含量具俯冲带岩石特征。稀土总量较高($\Sigma\text{REE} = 217.88 \times 10^{-6} \sim 355.07 \times 10^{-6}$), $\text{LREE}/\text{HREE} = 17.72 \sim 25.82$,轻稀土富集,重稀土亏损, $\delta\text{Eu} = 0.82 \sim 1.0$,没有或呈弱负 Eu 异常,稀土元素配分曲线向右陡倾。与典型的埃达克岩微量元素地球化学特征相似(陈隽璐等,2007,2008a)。唐藏石英闪长岩除符合埃达克岩所有的主量和微量元素条件外,另一显著特点就是 K_2O 含量低,一般小于 2.07% ,应属 O 型埃达克岩,形成于俯冲构造环境,结合该岩体形成时代为早古生代(454 Ma),并与早古生代岛弧火山岩系密切共生的特点,有理由认为其源岩浆为早古生代消减大洋板片(类似于 MORB 成分)部分熔融的产物(陈隽璐等,2007,2008a)。表明早古生代时期沿北秦岭商丹一线存在的商丹洋盆,以及洋盆演化过程中发生了向北的俯冲消减作用。

红花铺岩体分布于凤县红花铺以东,呈长条状东西向展布,长约 15.7 km ,宽约 $1.6 \sim 4.9 \text{ km}$,出露面积约 39 km^2 ,延伸方向与区域构造线方向基本一致。西部与草滩沟群为侵入接触,南部与石炭纪草凉驿组呈断层或沉积接触,北部被二叠纪石英闪长岩侵吞(王洪亮等,2006)。红花铺侵入体岩石类型为英云闪长岩, SiO_2 含量为 $70.68\% \sim 75.03\%$, K_2O 含量为 $0.68\% \sim 1.04\%$, Na_2O 含量为 4.53%

$\sim 5.18\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 $0.13 \sim 0.23$, A/CNK 为 $1.0 \sim 1.1$,为富钠、贫钾的过铝钙性岩石系列。 ΣREE 为 $141.88 \times 10^{-6} \sim 141.97 \times 10^{-6}$, δEu 为 $0.72 \sim 1.25$, $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 为 $1.85 \sim 5.74$,轻、重稀土分馏特征不明显,表现为幔源元素富集特征。岩体内部见有较多的闪长质暗色包体,与寄主岩界线清楚,总体显示为 I 型花岗岩地球化学特征,具俯冲带岛弧的地球化学特征,可能与草滩沟群火山岩共同构成北秦岭西段俯冲带岛弧环境的侵入岩及火山岩组合。结合其形成时代为 $450 \pm 1.8 \text{ Ma}$ 的锆石年龄,代表了红花铺侵入体的侵位时间,同时也反映了西秦岭北部古岛弧的形成时代为晚奥陶世(王洪亮等,2006)。

4.2 碰撞型花岗岩类

碰撞型花岗岩类可以党川花岗岩体为代表。党川岩体在空间上呈不规则状展布,出露面积约 200 km^2 ;主要岩石类型为中细粒黑云母二长花岗岩。党川花岗岩的 SiO_2 含量为 $72.31\% \sim 74.08\%$, K、Na 含量显示有较大范围的变化: $\text{K}_2\text{O} = 3.19\% \sim 5.32\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 2.77\% \sim 4.08\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.78 \sim 1.92$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.90\% \sim 15.26\%$, 铝指数 $\text{A}/\text{CNK} = 1.06 \sim 1.12$,表明岩石为过铝质。党川花岗岩明显富 Sr, 贫 Nb、Ta、Y 和重稀土元素, Sr 含量为 $254 \times 10^{-6} \sim 337 \times 10^{-6}$, Y 含量为 $5.9 \times 10^{-6} \sim 11 \times 10^{-6}$, 显示党川花岗岩具有高的 Sr/Y 比值($25 \sim 49$)。党川花岗岩为轻稀土富集型的稀土元素组成模式, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 20.8 \sim 66.8$, 负 Eu 异常不明显, $\delta\text{Eu} = 0.79 \sim 0.99$ 。以党川花岗岩岩浆结晶年龄 $t = 438 \text{ Ma}$ 计算, 获得党川花岗岩 I_{Sr} 值变化于 $0.70660 \sim 0.70929$ 之间, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于 $-2.24 \sim -4.48$ 之间。Nd 同位素亏损地幔模式年龄(T_{DM})为 $1.13 \sim 1.58 \text{ Ga}$ (王婧等,2008)。上述结果表明党川花岗岩应来自于地壳物质的部分熔融,这与党川花岗岩中含有古老继承型锆石的结果是一致的(王婧等,2008)。表明党川花岗岩具有埃达克岩的地球化学属性,但党川花岗岩具有高的 K_2O 含量及高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值,并且具有演化的 Sr 和 Nd 同位素组成,明显区别于岛弧背景中由俯冲洋壳板片部分熔融形成的岛弧型埃达克岩,而与增厚下地壳部分熔融形成的 C 型埃达克质岩类似(王婧等,2008)。党川花岗岩的地球化学特征指示岩浆起源于增厚下地壳的部分熔融作用,反映在西秦岭北缘存在着早古生代的地壳加厚作用,这一地壳加厚作用应归因于秦岭地区在志留纪时,华北陆块与扬子

陆块发生碰撞造山作用。

5 西秦岭北缘早古生代构造演化

新元古代是整个地球历史发展过程中的十分重要和非常特殊的地史阶段,全球构造在经过中元古代一段相对平静的地质发展后,从中元古代晚期开始,一些分散的古陆块逐步汇聚,形成 Rodinia 超大陆,而该超大陆在新元古代晚期发生裂解,约在 600~550Ma 之间,裂解的部分陆块(相对位于南部)又汇聚形成规模相对较小的冈瓦纳大陆,在冈瓦纳大陆北缘,由于原特提斯洋的形成和演化,发育了包括中国主要陆块在内的“加里东期造山带”(姜春发等,2000;陆松年等,2003,2004,2006;许志琴等,2006)。研究区早古生代的构造演化正是在上述新元古代晚期原特提斯洋形成演化基础上延续和发展的,对于原特提斯洋具体位置、形态、规模,由于时代古老,现今地表残留极为有限,尽管有许多关于原特提斯洋的研究成果,但认识目前尚不统一。对新元古代构造格局的恢复十分困难,加之研究区加里东期之后的构造运动十分强烈、频繁,对早古生代形成的构造格局的改造极为强烈,目前地表多为断续延伸的残片(块),因而使得探讨早古生代的构造演化较为困难,也存在较多的不确定性。现仅就现有资料概略探讨其西秦岭北缘早古生代构造演化过程。

西秦岭北缘地区早古生代发育有关子镇-武山蛇绿岩、李子园群岛弧-弧前盆地火山-沉积岩系、草滩沟群岛弧型火山岩系以及流水沟和百花等为代表的岛弧型变质中基性岩浆杂岩,其与南侧的陆缘体系一同构筑了早古生代时期西秦岭北带的古洋陆构造格局,并经历了从洋盆形成-洋壳由南向北的俯冲消减直至陆-陆碰撞造山的板块构造演化过程。总体构造演化可大致划分为以下四个阶段:

5.1 晚寒武世古洋盆初始形成阶段

该阶段代表古洋壳的物质记录为关子镇-武山蛇绿岩,其主要发育在关子镇地区,为发育 N-MORB 基性火山岩的蛇绿岩组合(裴先治等,2004b;侯青叶等,2006;董云鹏等,2008),东延在利桥地区仍有残留,西延可到武山-鸳鸯镇一线,主要由发育 E-MORB 的变质基性火山岩以及呈构造岩块产出的变质橄榄岩(蛇纹岩)、变辉石岩、变辉长岩等组成(侯青叶等,2006;董云鹏等,2007;Dong Yongpeng et al,2007;丁仁平,2008)。关子镇蛇绿岩中辉长岩的主体结晶时代为 (499.7 ± 1.8) Ma,表明其形成时代主体为晚寒武世(裴先治等,2007b)。

李王晔等(2007,2008)对关子镇蛇绿岩以及中基性岩浆岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究结果表明,流水沟辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 534 ± 9 Ma、关子沟口闪长岩(斜长花岗岩)锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 517 ± 8 Ma、关子沟海子下辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 489 ± 10 Ma。裴先治等(2005a)曾获得关子镇流水沟辉长岩 TIMS 锆石 U-Pb 年龄为 507 ± 3 Ma。这些年代学资料表明,关子镇蛇绿岩主要形成于 534~489Ma 之间的寒武纪。

武山-鸳鸯镇一带蛇绿岩,据李王晔(2008)对分布于桦林沟和鸳鸯镇岛弧环境的辉长岩、辉长闪长岩中锆石 SHRIMP 微区定年获得的 440 ± 6 Ma 和 456 ± 3 Ma 的同位素年龄值,也能够限定武山一带蛇绿岩的形成时代应在 440~456Ma 之前,可能为早古生代早中期,武山一带蛇绿岩的形成可能要稍晚于东邻的关子镇一带洋壳的形成时代,应是洋盆发育稍晚期的产物。

5.2 早奥陶世洋盆初始俯冲阶段

该阶段以关子镇-武山蛇绿岩为代表的古洋盆发生由南向北的俯冲消减,在蛇绿岩北侧随着俯冲作用的逐渐加强,初始岛弧出现,形成了以李子园群为代表的岛弧-弧前盆地变质火山-沉积岩系,其中的变质火山岩主要为变玄武岩、变玄武安山岩和变安山岩,岩石的地球化学特征显示明显具岛弧型火山岩的特征(裴先治等,2006),而且其中的部分中性火山岩具有典型岛弧或弧前盆地构造环境的玻安岩的地球化学特征。这套形成于洋壳初始俯冲阶段的变质火山-沉积岩系,由于难以找到有利于精确测年的采样目标,目前尚未有可靠的同位素年龄资料,但从其产出的区域构造位置以及与相邻地层接触关系上分析,应属早古生代中期的产物。

5.3 中晚奥陶世洋壳大规模俯冲与古岛弧发育阶段

中晚奥陶世是研究区极为重要的洋-陆构造演化阶段,随着古洋盆由南向北俯冲消减的逐步加强,形成了具有典型岛弧构造环境下的奥陶纪草滩沟群变质火山岩及相应的火山碎屑岩及浅变质碎屑岩,其火山岩岩石类型主要包括玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩等,岩石地球化学特征清楚地表明其形成于典型的岛弧构造背景(孙民生,1998;王德耀,2002;闫全人等,2007a)。该阶段已获得的高精度同位素年龄数据比较一致,除李王晔(2008)在武山地区的桦林沟、鸳鸯镇等获得的岛弧型辉长岩

SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $440 \pm 5\text{Ma}$ 和 $456 \pm 3\text{Ma}$ 外,王洪亮等(2007)在东段两当县张家庄乡桑园村南侧的草滩沟群中基性火山岩中获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 $456.4 \pm 5\text{Ma}$,代表了以草滩沟群火山岩为代表的岛弧形成的准确时代。闫全人等(2007a,2007b)在陕西眉县斜峪关群岛弧型火山岩中获得玄武岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $472 \pm 11\text{Ma}$,在周至县黑河小王洞获得侵入枕状熔岩中的与俯冲作用相关的淡色花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $442 \pm 7\text{Ma}$ 。

在岛弧形成的同时或稍晚时期,形成了以流水沟及百花中基性岩浆杂岩为代表的深成侵入杂岩体以及岛弧型花岗岩体,其岩石地球化学特征也表明其形成于岛弧构造环境。主要岩石类型为辉长岩-辉长闪长岩-闪长岩和辉石岩-辉长(闪长)岩-闪长岩-石英闪长岩等(裴先治等,2005a,2005b,2007c,2007d;Pei Xianzhi et al,2007a,2007b)。关子镇流水沟变质中基性岩浆杂岩的主体结晶年龄为 $471.1 \pm 1.4\text{Ma}$ (杨钊等,2006),百花岩浆杂岩体的主体结晶时代确定为 $449.7 \pm 3.1\text{Ma}$ (裴先治等,2007c,2007d)。此外,代表俯冲性花岗岩类型的凤县地区唐藏石英闪长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $454.7 \pm 1.9\text{Ma}$ (陈隽璐等,2007,2008a)、红花铺英云闪长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $450.5 \pm 1.9\text{Ma}$ (王洪亮等,2006)。这些定年结果表明,西秦岭北带以关子镇蛇绿岩为代表的古洋盆的俯冲作用及产生火山-岩浆岛弧的时限跨度较大,西部较东部俯冲可能要早,总体时限为 $471 \sim 440\text{Ma}$ 期间的中晚奥陶世,峰期在 $450 \sim 456\text{Ma}$ 期间的晚奥陶世。该阶段在洋盆的南缘开始形成以太阳寺岩组为代表的被动陆缘稳定环境下的碎屑岩组合,该沉积作用可能一直延续到早古生代末期。

5.4 志留纪陆-陆或陆-弧碰撞造山阶段

该阶段大规模的古洋壳俯冲消减已经结束,开始转入陆-陆或陆-弧碰撞造山阶段。该阶段在区内没有典型的沉积地层出露,只有南部被动陆缘环境的太阳寺岩组的形成可能还在继续。但该时期大规模碰撞型花岗质岩浆的侵入活动较为强烈,广泛发育有加里东期碰撞型深成侵入体,如党川花岗岩体(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $438 \pm 3\text{Ma}$)(王婧等,2008)以及熊山沟似斑状二长花岗岩体(全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $430 \pm 15\text{Ma}$)、柴家庄酒刺梁花岗岩体(全岩 Rb-Sr 等时年龄 424.4Ma)、火炎山花岗岩体(全岩 Rb-Sr 等时年龄为 $399 \pm 7\text{Ma}$)、仙坪

花岗岩体(全岩 Rb-Sr 等时年龄为 $396 \pm 7\text{Ma}$)^①和草川铺花岗岩体(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $434 \pm 10\text{Ma}$)(Zhang H F, et al,2006)。这些岩体的年代学资料反映加里东期大规模碰撞型花岗质岩浆侵入活动主要发育在 $438 \sim 400\text{Ma}$ 期间,与区域加里东晚期(志留纪)的碰撞汇聚造山作用密切相关。充分反映了早古生代时期西秦岭北带地区存在板块的消减俯冲与汇聚碰撞的地质构造演化过程。

6 结论

(1)西秦岭北缘早古生代武山-天水构造带主要由古元古代秦岭岩群中深变质造山带基底岩系、中新元古代宽坪岩群变质岩系、新元古代木其滩岩组变质基性火山岩以及寒武纪关子镇蛇绿岩、武山蛇绿岩、晚寒武世—早奥陶世李子园群浅变质活动陆缘沉积-火山岩系、奥陶纪草滩沟群岛弧型火山-沉积岩系、早古生代太阳寺岩群被动陆缘型沉积碎屑岩系以及加里东期岛弧型深成侵入岩体、俯冲-碰撞型花岗岩体等组成。

(2)关子镇蛇绿岩中变质基性火山岩属于 N-MORB 型玄武岩,武山蛇绿岩中变质基性火山岩属于 E-MORB 型玄武岩,是洋脊型蛇绿岩的重要组成部分,形成时代大致在 $534 \sim 489\text{Ma}$ 之间的寒武纪。

(3)李子园群火山岩主要形成于与岛弧或与岛弧相关的弧前盆地构造环境,草滩沟群火山岩形成于与俯冲作用相关的岛弧环境,形成时代主要为晚奥陶世。而关子镇流水沟和百花中基性岩浆杂岩总体形成于中晚奥陶世($471 \sim 440\text{Ma}$)古岛弧构造环境。

(4)西秦岭北缘地区广泛发育有加里东期俯冲型-碰撞型深成花岗质岩浆的侵入活动。加里东期俯冲型花岗岩类主要形成于 $450 \sim 456\text{Ma}$ 期间的晚奥陶世,而碰撞型花岗岩类主要形成于 $438 \sim 400\text{Ma}$ 期间的志留纪。

(5)西秦岭北缘早古生代古洋陆构造格局经历了从洋盆形成-洋壳俯冲消减直至陆-陆碰撞造山的板块构造演化过程。总体构造演化可划分为四个阶段:①晚寒武世古洋盆初始形成阶段;②早奥陶世洋盆初始俯冲阶段;③中晚奥陶世洋壳大规模俯冲与古岛弧发育阶段;④志留纪陆-陆或陆-弧碰撞造山阶段。

注 释

① 裴先治,李勇,丁仁平,等.2004.天水市幅 1:250000 区域地质调

查(修测)成果报告. 西安:长安大学地质调查研究院.

参 考 文 献

陈隽璐,徐学义,王洪亮,王宗起,曾佐勋,王超,李平. 2007. 北秦岭西段唐藏石英闪长岩岩体的形成时代及其地质意义. 现代地质, 22(1): 45~52.

陈隽璐,徐学义,王洪亮,王宗起,曾佐勋,李平,王超. 2008a. 北秦岭西段早古生代埃达克岩地球化学特征及岩石成因. 地质学报, 82(4): 475~484.

丁仁平,裴先治,李勇,胡波,赵欣,郭俊锋. 2004. 西秦岭天水地区“李子园群”的解体及其构造环境浅析. 地质通报, 23(12): 1209~1214.

丁仁平,裴先治,胡波,李勇,郭俊锋,李佐臣,赵欣. 2005. 甘肃天水地区新生代火山岩地球化学特征及其成因. 地质与勘探, 41(1): 33~37.

丁仁平,裴先治,刘会彬,李佐臣,孙仁奇,刘战庆,孟勇. 2006. 西秦岭天水地区新阳新元古代花岗质片麻岩的锆石 LA-ICP-MS 定年及其地质意义. 中国地质, 33(6): 1217~1225.

丁仁平,裴先治,李佐臣,刘少锋,李瑞保,李高阳,刘战庆. 2008a. 祁连造山带中段雾宿山群的构造属性探讨. 中国地质, 35(4): 577~589.

丁仁平. 2008b. 西秦岭—祁连造山带(东段)交接部位早古生代构造格架及构造演化. 长安大学博士学位论文, 1~188.

董云鹏,张国伟,杨钊,赵霞,马海勇,姚安平. 2007. 西秦岭武山 E-MORB 型蛇绿岩及相关火山岩地球化学. 中国科学(D 辑), 37(增刊 I): 199~208.

董云鹏,杨钊,张国伟,赵霞,徐静刚,姚安平. 2008. 西秦岭关子镇蛇绿岩地球化学及其大地构造意义. 地质学报, 82(9): 1186~1194.

甘肃省地质矿产局. 1989. 甘肃省区域地质志. 北京:地质出版社, 5~301.

何世平,王洪亮,陈隽璐,徐学义,张宏飞,任光明,余吉远. 2007a. 北秦岭西段红花铺俯冲型侵入体 LA-ICPMS 定年及其地质意义. 地质学报, 81(1): 79~87.

何世平,王洪亮,徐学义,张宏飞,任光明. 2007b. 北祁连东段红土堡基性火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义. 地球科学进展, 22(2): 143~151.

侯青叶,赵志丹,张宏飞,张本仁,张利,陈岳龙. 2006. 西秦岭-松潘构造结古洋地幔地球化学特征及构造归属探讨. 岩石学报, 22(12): 2901~2909.

胡波,裴先治,丁仁平,杨吉,赵小明,李佐臣. 2005. 天水地区红土堡变基性岩的地球化学特征及其大地构造意义. 地质通报, 24(3): 258~263.

姜春发,王宗起,李锦轶. 2000. 中央造山带开合构造. 北京:地质出版社, 1~154.

李王晔,李曙光,裴先治,张国伟. 2007. 西秦岭关子镇蛇绿混杂岩的地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. 岩石学报, 23(11): 2836~2844.

李王晔. 2008. 西秦岭-东昆仑造山带蛇绿岩及岛弧型岩浆岩的年代学和地球化学研究——对特提斯洋演化的制约. 中国科学技术大学博士学位论文, 1~124.

刘会彬,裴先治,丁仁平,李佐臣,孙仁奇. 2006. 西秦岭天水市元龙地

区新元古代花岗质片麻岩锆石定年及其地质意义. 地质通报, 25(11): 1315~1320.

陆松年,李怀坤,陈志宏,等著. 2003. 秦岭中-新元古代地质演化及对 RODINIA 超级大陆事件的响应. 北京:地质出版社, 1~194.

陆松年,李怀坤,陈志宏,于海峰,金巍,郭坤一. 2004. 新元古代时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系. 地学前缘, 11(2): 515~523.

陆松年,陈志宏,李怀坤,郝国杰,相振群. 2005. 秦岭造山带中两条新元古代岩浆岩带. 地质学报, 79(2): 165~173.

陆松年,于海峰,李怀坤,陈志宏,王惠初,张传林,相振群. 2006. “中央造山带”早古生代缝合带及构造分区概述. 地质通报, 25(12): 1368~1380.

裴先治. 1997. 东秦岭商丹构造带的组成与构造演化. 西安:西安地图出版社, 1~120.

裴先治,郭俊锋,李勇,丁仁平,苏春乾,胡波. 2003. 西秦岭武山杨河—礼县固城地区石炭纪地层的发现及其意义. 地质通报, 22(7): 494~499.

裴先治,丁仁平,胡波,李勇,郭俊锋,李佐臣. 2004a. 西秦岭天水地区新生代酸性火山岩地球化学特征及其构造意义. 岩石矿物学杂志, 23(3): 227~235.

裴先治,丁仁平,胡波,李勇,张国伟,郭俊锋. 2004b. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩的厘定及其地质意义. 地质通报, 23(12): 1202~1208.

裴先治,李勇,陆松年,陈志宏,丁仁平,胡波,李佐臣,刘会彬. 2005a. 西秦岭天水地区关子镇中基性岩浆杂岩锆石 U-Pb 同位素年龄及其地质意义. 地质通报, 24(1): 23~29.

裴先治,李佐臣,丁仁平,李勇,胡波,刘会彬. 2005b. 西秦岭天水地区岛弧型基性岩浆杂岩的地球化学特征及形成时代. 中国地质, 32(4): 529~540.

裴先治,刘会彬,丁仁平,李佐臣,胡波,孙仁奇,侯育红. 2006. 西秦岭天水地区李子园群变质火山岩的地球化学特征及其地质意义. 大地构造与成矿学, 30(2): 193~205.

裴先治,丁仁平,张国伟,刘会彬,李佐臣,李王晔,刘战庆,孟勇. 2007a. 西秦岭北缘新元古代花岗质片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质学报, 81(6): 772~786.

裴先治,丁仁平,李佐臣,刘战庆,李高阳,李瑞保,王飞,李夫杰. 2007b. 西秦岭北缘关子镇蛇绿岩的形成时代: 来自辉长岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据. 地质学报, 81(11): 1550~1561.

裴先治,刘战庆,丁仁平,李佐臣,李高阳,李瑞保,王飞,李夫杰. 2007c. 甘肃天水地区百花岩浆杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 地球科学进展, 22(8): 818~827.

裴先治,丁仁平,张国伟,刘会彬,李佐臣,李高阳,刘战庆,孟勇. 2007d. 西秦岭天水地区百花基性岩浆杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征. 中国科学(D 辑): 地球科学, 37(增刊 I): 224~234.

裴先治,孙仁奇,丁仁平,刘会彬,李佐臣,刘战庆,孟勇. 2007e. 陇东地区阎家店闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. 中国地质, 34(1): 8~16.

宋志高,张治洮,张莓,贾群子. 1991a. 陕、甘边界“牛头河群”的分解及其构造意义. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 31: 1~14.

宋志高,贾群子,张治洮,张莓. 1991b. 北秦岭-北祁连(天水-宝鸡间)早古生代火山岩系及其构造连接关系的研究. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 34: 1~82.

孙民生. 1998. 草滩沟群火山岩特征及其形成环境分析. 陕西地质, 16(1): 42~50.

王德耀. 2002. 草滩沟群、丹凤岩群火山岩对比及其构造环境分析. 西北地质, 35(4): 59~66.

王洪亮,何世平,陈隽璐,徐学义,孙勇,第五春荣. 2006. 北秦岭西段红花铺俯冲型侵入体 LA-ICP-MS 定年及其地质意义. 现代地质, 20(4): 536~564.

王洪亮,陈亮,孙勇,柳小明,徐学义,陈隽璐,张红,第五春荣. 2007. 北秦岭西段奥陶纪火山岩中发现近 4.1 Ga 的捕虏锆石. 科学通报, 52(14): 1685~1694.

王婧,张宏飞,徐旺春,蔡宏明. 2008. 西秦岭党川地区花岗岩的成因及其构造意义. 地球科学——中国地质大学学报, 33(4): 474~486.

许志琴,杨经绥,李海兵,姚建新. 2006. 中央造山带早古生代地体格架与高压/超高压变质带的形成. 地质学报, 80(12): 1793~1806.

闫全人,王宗起,陈隽璐,闫臻,王涛,李秋根,姜春发,张宗清. 2007a. 北秦岭斜峪关群和草滩沟群火山岩成因的地球化学和同位素约束, SHRIMP 年代及其意义. 地质学报, 81(4): 488~500.

闫全人,陈隽璐,王宗起,闫臻,王涛,李秋根,张宗清,姜春发. 2007b. 北秦岭小王洞枕状熔岩中淡色侵入岩的地球化学特征、SHRIMP 年龄及地质意义. 中国科学(D 辑): 37(10): 1301~1313.

杨经绥,许志琴,裴先治,史仁灯,吴才来,张建新,李海兵,孟繁聪,戎合. 2002. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别. 地质学报, 76(4): 484~495.

杨军录,冯益民,潘晓平. 2001. 武山蛇绿岩的特征、同位素年代及地质意义. 前寒武纪研究进展, 24(2): 98~106.

杨钊,董云鹏,柳小明,张津海. 2006. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年. 地质通报, 25(11): 1321~1325.

杨志超,刘剑,金勤海. 1984. 陕西省凤县红花铺、杨家岭火山岩系中腕足类等动物化石的发现及其意义. 陕西地质, 2(增刊): 12~16.

张宏飞,靳兰兰,张利, Nigel Harris, 周炼, 胡圣虹, 张本仁. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nb 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制. 中国科学(D 辑), 35(10): 914~926.

张宏飞,靳兰兰,张利,袁洪林,周炼,张本仁. 2006. 基底岩系和花岗岩类 Pb-Nb 同位素组成限制祁连山带的构造属性. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1): 57~65.

张国伟,孟庆任,于在平,孙勇,周鼎武,郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 中国科学(D 辑), 26(3): 193~200.

张国伟,张本仁,袁学诚,肖庆辉,著. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1~855.

张国伟,郭安林,姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结. 地学前缘, 11(3): 23~32.

张旗. 1990. 玻安岩和玻玄岩的地球化学特征和成因探讨. 地球化学, 19(3): 207~215.

张旗,周国庆. 2000. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 10~13.

张维吉,孟宪恂,胡健民,裴先治,樊双虎,等著. 1994. 祁连-北秦岭造山带接合部位构造特征与造山过程. 西安: 西北大学出版社, 1~283.

张宗清,张国伟,刘敦一,王宗起,唐索寒,王进辉. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学. 北京: 地质出版社, 1~348.

Crawford A J, Falloon T J, Green D H. 1989. Classification, petrogenesis and tectonic setting of boninites. Crawford A J. Boninites. London: Unwin Hyman, 1~49.

Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Yang Zhao, Zhao Xia, Ma Haiyong, Yao anping. 2007. Geochemistry of the E-MORB type ophiolite and related volcanic rocks from the Wushan area, West Qinling. Science in China Series D: Earth Sciences, 50 (Sup I): 234~245.

Falloon T J, Crawford A J. 1991. The petrogenesis of high-calcium boninite lavas dredged from the northern Tonga ridge. Earth Planet Sci Lett., 102(3/4): 375~394.

Pei Xianzhi, Li Zuochen, Liu Huibin, Li Gaoyang, Ding Saping, Li Yong, Hu Bo, Guo Junfeng. 2007a. Geochemical characteristics and zircon U-Pb isotopic ages of island-arc basic igneous complexes from the Tianshui area in West Qinling. Front. Earth Sci. China, 1(1): 49~59.

Pei Xianzhi, Ding Saping, Zhang Guowei, Liu Huibin, Li Zuochen, Li Gaoyang, Liu Zhanqing, Meng Yong. 2007b. The LA-ICP-MS zircons U-Pb ages and geochemistry of the Baihua Basic igneous complexes in Tianshui area of West Qinling. Science in China Series D: Earth Sciences, 50 (Sup I): 264~276.

Piercey S J, Murphy D C, Mortensen J K. 2001. Boninitic magmatism in a continental margin setting, Yukon-Tanana terrane, southeastern Yukon. Canada. Geology, 29(8): 731~734.

Zhang H F, Zhang B R, Nigel Harris, Zhang L, Chen Y L, Chen N S, Zhao Z D. 2006. U-Pb zircon SHRIMP ages, geochemical and Sr - Nd-Pb isotopic compositions of intrusive rocks from the Longshan-Tianshui area in the southeast corner of the Qilian orogenic belt, China: Constraints on petrogenesis and tectonic affinity. Journal of Asian Earth Sciences, 27: 751~764.

Early Paleozoic Tianshui-Wushan Tectonic zone of the Northern Margin of West Qinling and its Tectonic Evolution

PEI Xianzhi, DING Saping, LI Zuochen, LIU Zhanqing, LI Ruibao, FENG Jianyun, SUN Yu, ZHANG Yafeng, LIU Zhigang, ZHANG Xiaofei, CHEN Guochao, CHEN Youxin

Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Faculty of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, 710054

Abstract

Early Paleozoic Tianshui-Wushan tectonic zone is located in the Tianshui area in the eastern Gansu province. It consists mainly of Guanzizhen-Wushan ophiolite belt in the Cambrian meso- to epi-metamorphic sedimentary-volcanic rock series at the active continental margin in the Late Cambrian-Early Ordovician Liziyuan Group, island-arc volcanic-sedimentary rock series in the Ordovician Caotangou Group, plutonic intrusion and subduction-collision granitoid in the Caledonian. Metabasic volcanic rocks in the Guanzizhen ophiolite belong to N-MORB, and metabasic volcanic rocks in the Wushan ophiolite belong to E-MORB. They are importance segments of the ocean ridge ophiolite, formed in between 534Ma to 489Ma of Cambrian. Volcanic rocks in the Liziyuan Group mainly formed in forearc basin setting with island-arc or island-arc-related, and volcanic rocks in the Caotangou Group formed in island-arc setting with subduction-related. Intermediate-basic igneous complexes of Liushuigou and Baihua in the Guanzizhen formed in paleo-island-arc setting in the Middle-Late Ordovician (471~440Ma), while had subduction type (450~456Ma) and collision type (438~400Ma) granitoids magmatism in the Caledonian. Early Paleozoic paleo-ocean-continent of structural framework in northern margin of West Qinling had come through evolution of plate tectonics from formation ocean basin to subduction of oceanic crust, until continental-continental collision orogeny. The overall tectonic evolution be divided into four stages: ① Paleo-ocean basin initial form stage in the Late Cambrian. ② Ocean basin initial subduction stage in the Early Ordovician. ③ Wholesale subduction and paleo-island-arc growth stage in the Middle-Late Ordovician. ④ Continental-continental or continental-arc collision orogeny stage in the Silurian.

Key words: ophiolite; island-arc magmatic rock; Tianshui-Wushan tectonic zone; Early Paleozoic; West Qinling