

# 马兰峪背斜核部中生代侵入岩体锆石 U-Pb 年龄、 地球化学特征及其构造意义

杨付领<sup>1, 2)</sup>, 牛宝贵<sup>2)</sup>, 任纪舜<sup>2)\*</sup>, 李 舒<sup>2)</sup>

1)中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2)中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

**摘要:** 利用 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得马兰峪背斜核部前分水岭二长花岗岩、茅山二长花岗岩、王坪石二长花岗岩、高家店石英闪长岩、肖营子花岗闪长岩及钾长花岗岩的结晶年龄分别为( $153.8\pm2.7$ ) Ma、( $162.7\pm1.5$ ) Ma、( $162.3\pm1.3$ ) Ma、( $170.5\pm1.8$ ) Ma、( $164.6\pm2.2$ ) Ma 和( $186.8\pm1.3$ ) Ma, 同时获得 180~175 Ma 和 201~186 Ma 的继承岩浆锆石年龄, 时代上分属于印支期和燕山期, 以燕山期为主; 岩石地球化学特征表明其岩浆来源于上地幔物质底侵引起下地壳部分熔融。结合区域地质资料分析, 本文认为: 1)马兰峪背斜开始形成于印支期, 完成于燕山期; 2)印支—燕山期强烈构造运动不但使地台基底与盖层同步卷入褶皱作用, 地壳缩短加厚, 而且使上地幔物质底侵, 下地壳物质部分熔融, 从而形成了一系列发育于背斜核部的侵入岩体; 3)燕山地区中生代造山作用, 并不只是地壳表层的物质运动, 而是涉及全地壳以至上地幔的物质运动, 它使中朝地块北部由原来稳定克拉通状态进入一个全面活化的新阶段。

**关键词:** 马兰峪背斜; LA-MC-ICP-MS; 锆石 U-Pb; 地球化学; 中生代

中图分类号: P548; P588.12; P597.1 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2015.04.08

## Zircon U-Pb Ages and Geochemical Characteristics of the Mesozoic Intrusive Bodies along the Core of the Malanyu Anticline and Their Tectonic Significances

YANG Fu-ling<sup>1, 2)</sup>, NIU Bao-gui<sup>2)</sup>, REN Ji-shun<sup>2)\*</sup>, LI Shan<sup>2)</sup>

1) School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083;  
2) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

**Abstract:** LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of zircons from the Qianfenshuling monzonitic granite, Maoshan monzonitic granite, Wangpingshi monzonitic granite, Gaojiadian quartz diorite, Xiaoyingzi granodiorite and moyite yielded ( $153.8\pm2.7$ ) Ma, ( $162.7\pm1.5$ ) Ma, ( $162.3\pm1.3$ ) Ma, ( $170.5\pm1.8$ ) Ma, ( $164.6\pm2.2$ ) Ma and ( $186.8\pm1.3$ ) Ma respectively, and several inheritable magmatic zircons were dated at 180~175 Ma and 201~186 Ma. The results indicate that the Mesozoic intrusive bodies along the core of the Malanyu anticlinorium were emplaced in the Indosinian and Yanshanian, with the latter being predominant. Their geochemical characteristics show that the magma was generated from partial melting of lower crustal material caused by the upper mantle underplating. Combining these data with the regional geological information, the authors have reached some conclusions: 1) the Malanyu anticline was initiated in the Indosinian period, and formed finally in the Yanshanian period; 2) the Indosinian-Yanshanian orogeny not only contributed to the crust thickening characterized by basement-involved folding but also resulted in partial melting of the lower crust, bringing about the formation of intrusive bodies along the anticlinal core; and 3) the Mesozoic orogeny in the Yanshan area was represented not only by the tectonic

本文由中国地质调查局项目“中国及邻区海陆大地构造研究”(编号: 12120113013700)和“中国及邻区小比例尺地质图和大地构造图的编制”(编号: 12120113013800)联合资助。

收稿日期: 2014-12-22; 改回日期: 2015-02-02。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 杨付领, 男, 1986 年生。博士研究生。构造地质学专业。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: yangfulling@163.com。

\*通讯作者: 任纪舜, 男, 1935 年生。研究员, 博士生导师。主要从事大地构造学研究。E-mail: renjishun@cags.ac.cn。

process of the surface of the crust but also by the movement of the lower crust and upper mantle, which caused the northern part of the Sino-Korean block to enter into a new evolutionary stage, i.e., from the original stability to overall activation.

**Key words:** Malanyu anticline; LA-MC-ICP-MS; zircon U-Pb age; Petrogeochemistry; Mesozoic

马兰峪复式背斜位于燕山造山带南缘，为一条形成于中生代的东西向构造。河北省地质局区域地质测量大队、中国地质科学院地质力学所和中国地质大学的地质工作者曾在这一区域开展地质填图或专题研究工作，发表了一系列有价值的研究成果（河北省地质局区域地质测量大队，1966, 1970；河北省区域地质矿产勘查开发局，2000；崔盛芹等，2002；中国地质大学（北京）地质调查研究院，2004；张长厚等，2004ab, 2011）。引人注目的是，在马兰峪复式背斜核部发育有一系列呈东西向线状展布的中生代中酸性侵入岩体，其形成时代从晚三叠世至晚侏罗世均有分布，这些侵入岩体必然与马兰峪复式背斜的褶皱过程有着密切的成生联系。因此作者以马兰峪复式背斜核部的中生代侵入岩体作为研究对象，应用同位素年代学与岩石地球化学技术方法，结合区域构造，探讨马兰峪背斜的形成时代、形成过程及其地质构造意义。

马兰峪复式背斜地处承德复式向斜之南，西起平谷、东至秦皇岛，整体为一近EW向的复式背斜构造，长约110 km，核部宽25~30 km。背斜核部主要指兴隆—蔚县一线之东太古界变质结晶基底出露的区域，在青龙县以南可见中、新元古界盖层残留其上（图1）。其核部变质岩系主要为角闪斜长片麻岩，被沿复背斜核部分布的一系列中生代中酸性岩体侵入。背斜两翼地层基本对称，分别向南、北倾斜，中、新元古界至古生界地台盖层发育有次一级褶曲，如南翼的东莲花院背斜，构造线方向与背斜轴基本平行，组成一完整的复式背斜形态。背斜南翼多处可见中元古界长城系常州沟组底部红褐色石英岩状砂岩角度不整合于太古界片麻岩之上，北翼由于断层破坏，仅在兴隆之南背斜倾伏端，可见常州沟组底部暗红色砂砾岩角度不整合于太古代基底岩石之上。

中生代陆相上叠盆地沉积主要分布于马兰峪背斜两翼和承德复向斜，进一步可划分为先后三个

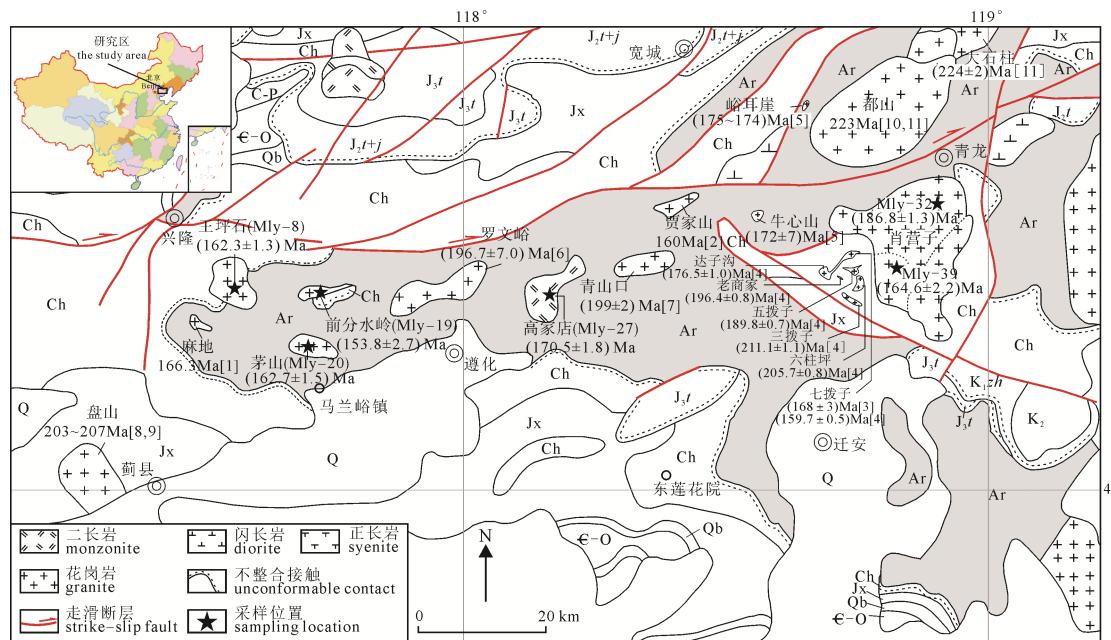


图1 马兰峪地区地质简图(据河北省地质矿产局, 1989 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Malanyu area (modified after Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, 1989)

Ar-太古界结晶基底; Ch-长城系; Jx-蔚县系; Qb-青白口系; ε-O-寒武—奥陶系; C-P-石炭—二叠系; J2t+j-髫髻山组+九龙山组;

J3t-土城子组; K1zh-张家口组; K2-上白垩统; Q-第四系

图中参考文献: [1]-王季亮等, 1994; [2]-河北省区域地质矿产勘查开发局, 2000; [3]-张长厚等, 2004a; [4]-李强等, 2012; [5]-罗镇宽等, 2001b; [6]-陆继龙等, 2012; [7]-罗镇宽等, 2001a; [8]-赵越等, 2005; [9]-马寅生等, 2007; [10]-罗镇宽等, 2003; [11]-叶浩等, 2014

Ar-Archean crystallized basement; Ch-Changcheng System; Jx-Jixian System; Qb-Qingbaikou System; ε-Cambrian-Ordovician; C-P-Carboniferous-Permian; J2t+j-Jiulongshan-Tiaojishan Formation; J3t-Tuchengzi Formation; K1zh-Zhangjiakou Formation; K2-Upper Cretaceous; Q-Quaternary

References: [1]-WANG et al., 1994; [2]-Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, 2000; [3]-ZHANG et al., 2004a; [4]-LI et al., 2012; [5]-LUO et al., 2001b; [6]-LU et al., 2012; [7]-LUO et al., 2001a; [8]-ZHAO et al., 2005; [9]-MA et al., 2007; [10]-LUO et al., 2003; [11]-YE et al., 2014

表 1 样品位置、矿物组成特征

Table 1 Sampling locations and mineral composition of the Mesozoic intrusive bodies

| 样品号    | 北纬         | 东经          | 岩体名称 | 岩性    | 主要矿物              | 副矿物        | 次生矿物     |
|--------|------------|-------------|------|-------|-------------------|------------|----------|
| Mly-8  | 40°18.357' | 117°35.110' | 王坪石  | 二长花岗岩 | Kfs+Pl+Qtz+Bt     | Ap+Mag     | Chl      |
| Mly-19 | 40°18.207' | 117°45.273' | 前分水岭 | 二长花岗岩 | Qtz+Kfs+Pl+Bt     | Ap+Mag     | Chl +Ser |
| Mly-20 | 40°14.176' | 117°43.362' | 茅山   | 二长花岗岩 | Qtz+Pl+Kfs+Bt     | Ap+Mag     | Chl      |
| Mly-27 | 40°15.269' | 118°10.470' | 高家店  | 石英闪长岩 | Pl+Hbl+Bt+Qtz+Kfs | Mag+Tnt    | Chl +Ep  |
| Mly-32 | 40°21.173' | 118°53.571' | 肖营子  | 钾长花岗岩 | Kfs+Qtz+Pl+Bt     | Ap+Mag     | Chl      |
| Mly-39 | 40°15.050' | 118°49.383' | 肖营子  | 花岗闪长岩 | Pl+Kfs+Qtz+Hbl+Bt | Ap+Mag+Tnt | Chl      |

注: Ap-磷灰石; Bt-黑云母; Chl-绿泥石; Ep-绿帘石; Hbl-角闪石; Kfs-钾长石; Mag-磁铁矿; Pl-斜长石; Qtz-石英; Ser-绢云母; Tnt-榍石。

世代(徐刚等, 2006)。第一世代, 由早侏罗世杏石口组、南大岭组和下花园组地层构成, 自下而上为一套砂岩、砾岩, 基性至中性火山岩和含煤岩系组成的盆地充填地层, 早中三叠世紫红色长石岩屑砂岩被早侏罗世杏石口组微角度不整合覆盖; 第二世代, 由九龙山组、髫髻山组和土城子组盆地充填岩系构成, 时代为中一晚侏罗世包括早白垩世初期部分地层, 分布广泛。在背斜北翼中北部前中侏罗世褶皱地层大范围掩覆于盆地充填地层之下, 中侏罗世晚期九龙山组或髫髻山组角度不整合于早侏罗世杏石口组或下花园组地层之上并超覆于中、新元古界和古生界地台盖层之上; 第三世代, 由早白垩世张家口组火山岩或义县组构成, 不整合于一切老地质体之上。上述中生代地层间的三个不整合面分别代表了中生代印支运动与燕山运动 I 幕和 II 幕, 区域内, 由这三期造山作用所形成的构造线方向均为近东西走向, 其褶皱构造具显著的同轴叠加特点。结合滦平盆地和承德盆地张家口组底部时代确定为 136~135 Ma(牛宝贵等, 2003; 赵越等, 2004), 可以基本限定燕山 II 幕造山作用结束的时间应在晚侏罗世—早白垩世初(135 Ma 之前)。

马兰峪背斜核部的中生代岩浆岩带自西向东主要由麻地、王坪石、茅山、前分水岭、罗文峪、高家店、青山口、贾家山、肖营子和都山以及分布于其间的数个小岩体组成(图 1)。岩体形态多为椭圆状, 长轴与背斜轴基本平行, 大部分岩体为复式岩体。近些年, 分布于背斜核部东段与成矿密切相关的侵入岩体获得了较好的年代学数据(罗镇宽等, 2001a, b, 2003; 张长厚等, 2004a; 郭少丰等, 2009; 李强等, 2012; 陆继龙等, 2012; 叶浩等, 2014), 而其它非成矿岩体的年代学与岩石地球化学报道较少, 虽也有一些年龄数据, 但多采用 K-Ar 或 Rb-Sr 等技术手段测试得到, 精度不高且差异大。因此, 分析每个岩体的形成年龄, 研究其形成的构造条件不仅对认识马兰峪背斜的形成, 而且对燕山地区中生代构造演化过程均具有重要的意义。本文采用

LA-MC-ICP-MS 锆石原位微区定年技术分析部分岩体的形成时代, 用于分析的样品采样位置及详细信息见图 1 和表 1。

## 1 主要岩体的 U-Pb 年龄和地球化学特征

### 1.1 分析方法

样品主量元素和微量元素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。主量元素分析采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析, 测试精密度 RSD<2%~8%。微量元素分析采用 XR 电感耦合等离子体质谱分析(ICP MS), 测试精密度 RSD<10%。

锆石 U-Pb 同位素分析在天津地质矿产研究所同位素实验室完成。使用激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP MS), 激光器为美国 ESI 公司生产的 UP193-FXArF 准分子激光器, 激光波长 193 nm, 脉冲宽度 5 ns, 束斑直径为 35 μm, 脉冲频率 8~10 Hz。激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune, 利用动态变焦扩大色散可以同时接收质量数相差很大的 U-Pb 同位素, 进行锆石 U-Pb 同位素原位测定。采用中国地质大学刘勇胜博士研发的 ICP MS DataCal 程序和 Kenneth R1 Ludwig 的 Isoplot 程序进行数据处理, <sup>208</sup>Pb 校正法对普通铅进行校正, 利用 SRM610 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。

### 1.2 锆石 U-Pb 年龄

6 件样品中锆石颗粒晶型均完整, 主要为柱状、椭圆状或短柱状, 晶体粒径变化于 40~200 μm 之间, 锆石均具有典型的岩浆生长振荡环带结构(图 2)。

根据宋彪等(2008)的研究认为: “通常, 一个岩体样品中锆石成因复杂, 有岩浆侵位过程中形成的, 亦有捕获的, 各自具有不同的年龄和意义, 实际上, 一个样品中锆石测定得足够多, 那么其中最年轻颗粒的年龄就最接近岩体最后的形成时间, 即岩体结晶冷却时间”。鉴于本区岩体有相当一部分为晚三叠世—侏罗纪印支—燕山阶段多期次侵入形成的复式岩体, 这在野外和以往的定年研究已得到证实; 另

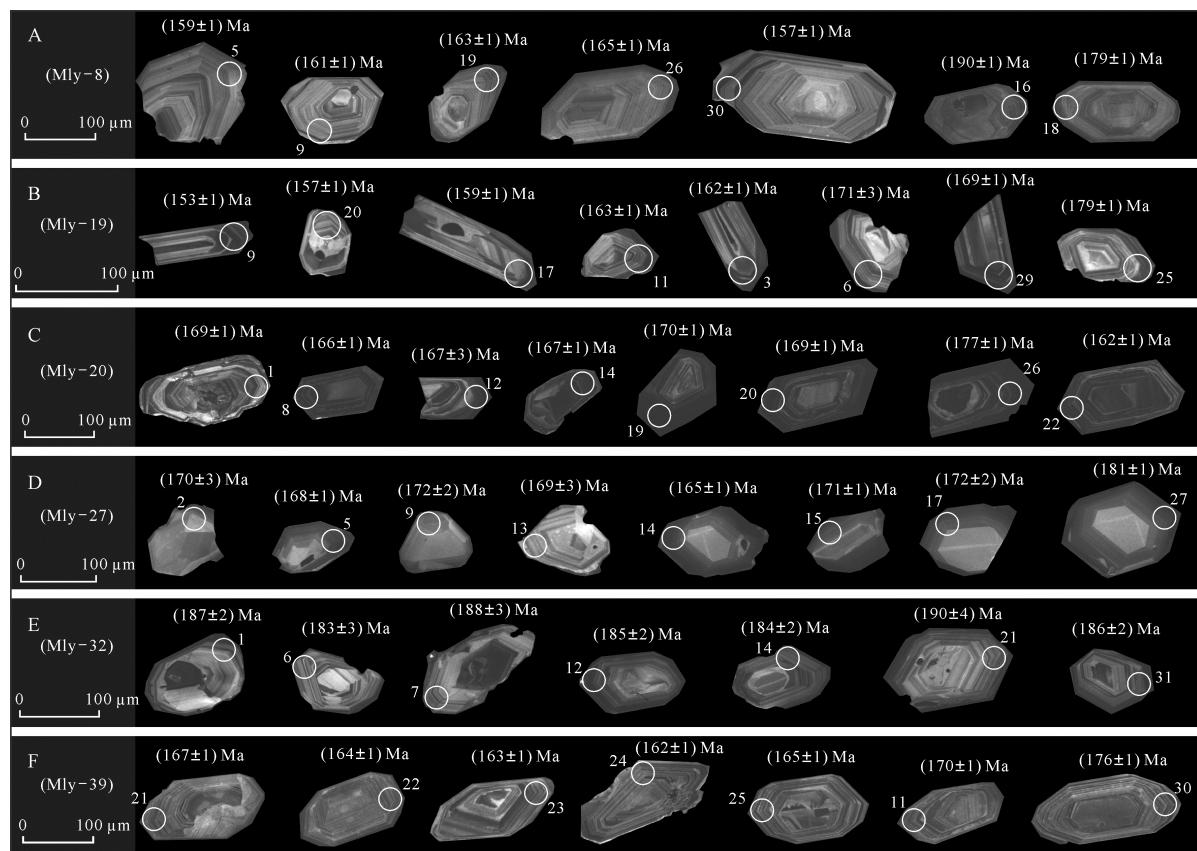


图 2 测年锆石阴极发光图像(圆圈为激光剥蚀位置)

Fig. 2 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons (small circles are LA-MC-ICP-MS U-Pb analysis spots.)

本次测试样品中还出现有连续的锆石年龄，这很可能是由岩体在深部滞留期间连续结晶所致，故选取其中最年轻的若干颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值作为岩体最终形成或结晶年龄。

王坪石岩体二长花岗岩(Mly-8)，共测试 30 粒锆石获得 30 个数据，其中 1、15 号点数据偏离 U-Pb 谱和线且 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄差异大；其余数据在 U-Pb 谱和图中的投影位置落于谱和线或附近(图 3A)，锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大致可分为 5 组(图 3a)，按照上述观点，取其最年轻的一组(5、6、9、12、13、19、21、29)8 粒锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 164~158 Ma 之间，给出的加权平均值为(162.3±1.3) Ma，作为该岩体二长花岗岩的结晶年龄；其余 4 组年龄相对偏老，依直方图的概率曲线确定其峰值年龄分别为 191 Ma、180 Ma、172 Ma 和 167 Ma，为继承锆石的年龄。

前分水岭岩体二长花岗岩(Mly-19)，共测试 30 粒锆石获得的 30 个数据在 U-Pb 谱和图中的投影位置落于谱和线或附近(图 3B)，锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大致可分为 4 组(图 3b)，同上述观点，取其最年轻的一组(9、13、26)3 粒锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 155~153 Ma 之间，给出的加权平均值为(153.8±2.7) Ma，作为该岩体二长花岗岩的结晶年龄；其余 3 组年龄

相对偏老，依直方图的概率曲线确定其峰值年龄分别为 178 Ma、170 Ma 和 164 Ma，为继承锆石的年龄。

茅山岩体二长花岗岩(Mly-20)，共测试 26 粒锆石获得的 26 个数据在 U-Pb 谱和图中的投影位置落于谱和线或附近(图 3C)，锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大致可分为 3 组(图 3c)，取其最年轻的一组(18、22)2 粒锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 164~161 Ma 之间，给出的加权平均值为(162.7±1.5) Ma，作为该岩体二长花岗岩结晶年龄；其余 2 组年龄相对偏老，依直方图的概率曲线确定其峰值年龄分别为 176 Ma 和 170 Ma，为继承锆石的年龄。

高家店岩体石英闪长岩(Mly-27)，共测试 32 粒锆石获得 32 个数据，其中 8、10、19、30、32 号点数据偏离 U-Pb 谱和线且 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄差异大；其余数据在 U-Pb 谱和图中的投影位置落于谱和线或附近(图 3D)，锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大致可分为 3 组(图 3d)，取其最年轻的一组(2、3、5~7、9、12~15、17、21、24、28)14 粒锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 174~164 Ma 之间，给出的加权平均值为(170.5±1.8) Ma，作为该岩体石英闪长岩的结晶年龄；其余 2 组年龄相对偏老，依直方图的概率曲线确定其峰值年龄分别为 186 Ma 和 176 Ma，为继承

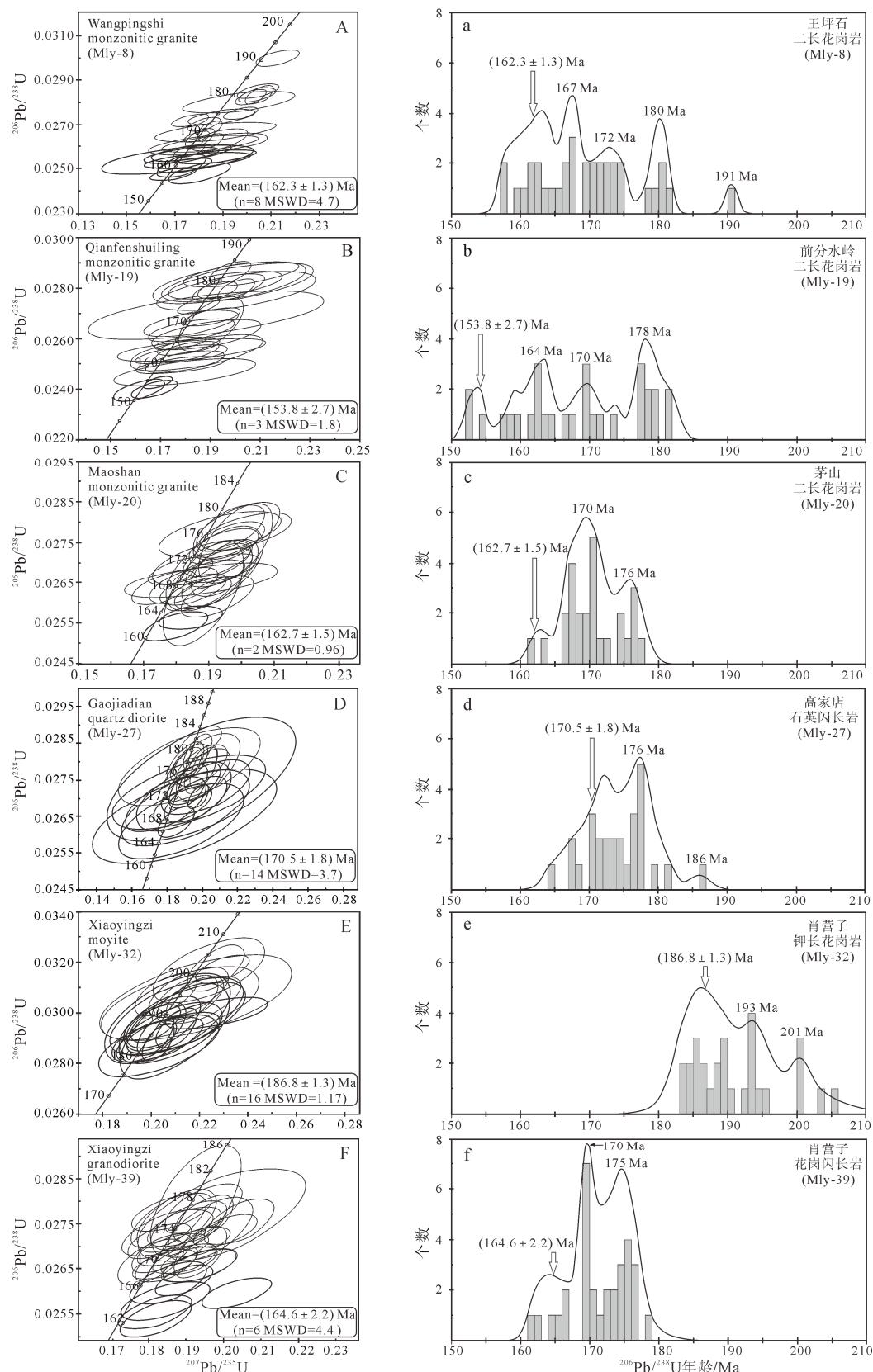


图 3 锆石 U-Pb 谐和图和年龄频率分布图  
Fig. 3 U-Pb concordia and probability diagrams of zircon  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages

锆石的年龄。

肖营子岩体钾长花岗岩(Mly-32), 共测试 32 粒锆石获得 32 个数据, 其中 4、11、13、16 号点数据偏离 U-Pb 谐和线且  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  年龄差

异大; 其余数据在 U-Pb 谐和图中的投影位置落于谐和线或附近(图 3E), 锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄大致可分为 3 组(图 3e), 取其最年轻的一组(1、3、6~8、12、14、17、20、21、23、25、27~29、31)16 粒锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

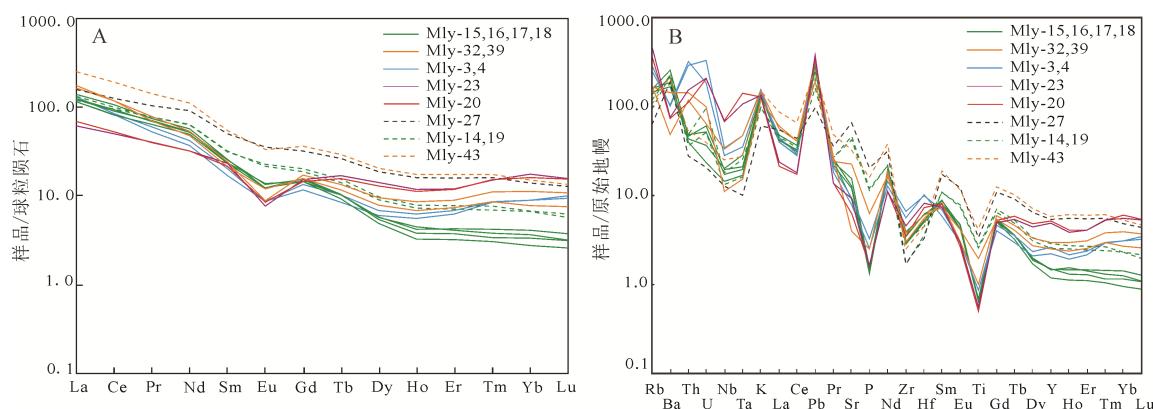


图 4 稀土元素球粒陨石标准化配分图(A)和微量元素原始地幔标准化蜘蛛图解(B)(球粒陨石和原始地幔标准数据参考 Sun et al., 1989; 图中虚线为闪长岩, 实线为花岗岩)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (A) and primitive mantle-normalized spidergrams (B) of the intrusive bodies from the core of the Malanyu anticline (the values of chondrite and primitive mantle are from Sun et al., 1989; Solid lines represent the granite, and dotted line represents diorite)

年龄介于 191~183 Ma 之间, 给出的加权平均值为  $(186.8 \pm 1.3)$  Ma, 作为该岩体钾长花岗岩的结晶年龄; 其余 2 组年龄相对偏老, 依直方图的概率曲线确定其峰值年龄分别为 201 Ma 和 193 Ma, 为继承锆石的年龄。

肖营子岩体花岗闪长岩(Mly-39), 共测试 31 粒锆石获得的 31 个数据在 U-Pb 谱和图中的投影位置落于谐和线或附近(图 3F), 锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄大致可分为 3 组(图 3f), 取其最年轻的一组(21~25、28)6 粒锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄介于 166~161 Ma 之间, 给出的加权平均值为  $(164.6 \pm 2.2)$  Ma, 作为该岩体花岗闪长岩的结晶年龄; 其余 2 组年龄相对偏老, 依直方图的概率曲线确定其峰值年龄分别为 175 Ma 和 170 Ma, 为继承锆石的年龄。

### 1.3 岩体地球化学特征

马兰峪背斜核部中生代中酸性侵入岩体总体上可分为闪长岩类和花岗岩类。闪长岩总体表现为低 Si( $\text{SiO}_2=55.28\% \sim 66.26\%$ )、Mg( $\text{MgO}=1.6\% \sim 3.17\%$ )、高 Al( $\text{Al}_2\text{O}_3=16.17\% \sim 16.57\%$ )、Ga( $\text{CaO}=3.03\% \sim 6.22\%$ )、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比  $< 1$ , A/CNK 值  $< 1$ , 为准铝质; 花岗岩总体表现为高 Si( $\text{SiO}_2=73.57\% \sim 75.77\%$ )、Al( $\text{Al}_2\text{O}_3=12.97\% \sim 14.62\%$ )、Ga( $\text{CaO}=0.47\% \sim 1.07\%$ )、低 Mg( $\text{MgO}=0.14\% \sim 0.29\%$ )、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比  $\approx 1$ , A/CNK 值  $> 1$ , 为偏铝质。对于同一岩体不同岩性单元, 随着  $\text{SiO}_2$  含量的增加,  $\text{K}_2\text{O}$  表现为一致增加, 其余各主量元素均表现为一致减少, 显示出岩浆分异特征。岩体稀土总量总体偏低 ( $\sum \text{REE} = 82 \times 10^{-6} \sim 349 \times 10^{-6}$ , 平均  $155 \times 10^{-6}$ ), 在稀土元素球粒陨石标准化图中(图 4A), 各岩体配分曲线相似, 均表现为左陡右缓的轻稀土元素富集、重稀土元素亏损型式( $(\text{La/Yb})_N = 3.53 \sim 44.32$ , 平均 18.98), 具有不明显或弱 Eu 负异常, 其中花岗岩类较闪长

岩类 Eu 负异常明显。微量元素原始地幔标准化图中(图 4B), 各岩体具有相似配分曲线特征, K、Pb 大离子亲石元素富集, Nb、Ta、P、Ti、Zr 等高场强元素亏损。另闪长岩的 Ba( $339 \times 10^{-6} \sim 1806 \times 10^{-6}$ , 平均  $1067 \times 10^{-6}$ )、Sr( $106 \times 10^{-6} \sim 980 \times 10^{-6}$ , 平均  $402 \times 10^{-6}$ ) 均高于一般花岗岩的 Ba、Sr 含量, 表现为高 Ba-Sr 的特点。

## 2 讨论

通过以上工作我们得到了马兰峪背斜核部中生代侵入岩体的年代学和地球化学的基本特征, 在此基础上, 本文结合区域构造和前人研究成果, 探讨马兰峪背斜的形成时代、形成过程及其大地构造意义。

关于马兰峪背斜的形成时代, 一些学者依据侵位于该复式背斜南翼的盘山岩体获得 207~203 Ma 年龄数据, 以及在该复式背斜之北兴隆断裂北侧获得与褶皱轴面平行的花岗质斑岩脉锆石 U-Pb 年龄 ( $203 \pm 8$ ) Ma 和 ( $227 \pm 1$ ) Ma, 认为其形成于晚三叠世印支期(马寅生等, 2007; 赵丽君, 2010; Wang et al., 2011, 2013)。但在侏罗纪时期, 组成马兰峪背斜翼部及相邻区域中生代地层分别于早侏罗世杏石口组与下伏早一中三叠世地层之间和中侏罗世九龙山组或髫髻山组与下伏早侏罗世下花园组之间均发育有明显的区域性角度不整合, 并在近核部南翼还残留有经褶皱的晚侏罗世陆相盆地沉积岩系呈角度不整合直接覆于中元古代地层之上(图 1), 其前白垩纪盖层褶皱的构造线方向均为近东西走向; 但不整合于上述前白垩纪及一切更老地质体上的早白垩世张家口组—义县组火山—沉积岩系, 无论其控制盆地岩系发育的断裂构造还是之后形成的褶皱构造线方向均呈北东—北北东走向, 大角度斜跨前白垩纪近

表 2 马兰峪背斜核部中生代侵入岩体同位素年龄表

Table 2 Isotope ages of the Mesozoic intrusive bodies from the core of the Malanyu anticline

| 时期  | 岩体名称 | 岩性     | 年龄/Ma     | 测试方法         | 来源                   |
|-----|------|--------|-----------|--------------|----------------------|
| 燕山期 | 前分水岭 | 二长花岗岩  | 153.8±2.7 | LA-MC-ICP-MS | 本文                   |
|     | 王坪石  | 二长花岗岩  | 162.3±1.3 | LA-MC-ICP-MS | 本文                   |
|     | 茅山   | 二长花岗岩  | 162.7±1.5 | LA-MC-ICP-MS | 本文                   |
|     | 麻地   | 花岗岩    | 166.3     | Rb-Sr        | 王季亮等, 1994           |
|     | 贾家山  | 二长花岗岩  | 160       | K-Ar         | 河北省区域地质矿产勘查开发局, 2000 |
|     | 七拨子  | 花岗岩    | 168±3     | LA-ICP-MS    | 张长厚等, 2004a          |
|     |      | 二长花岗岩  | 159.5±0.5 | LA-ICP-MS    | 李强等, 2012            |
|     | 肖营子  | 花岗闪长岩  | 164.4±2.2 | LA-MC-ICP-MS | 本文                   |
|     | 高家店  | 石英闪长岩  | 170.5±1.8 | LA-MC-ICP-MS | 本文                   |
|     | 牛心山  | 中细粒花岗岩 | 172±2     | SHRIMP       | 罗镇宽等, 2001b          |
| 印支期 | 峪耳崖  | 肉红色花岗岩 | 174~175   | SHRIMP       | 罗镇宽等, 2001b          |
|     | 达子沟  | 二长花岗岩  | 176.5±1.0 | LA-ICP-MS    | 李强等, 2012            |
|     | 肖营子  | 钾长花岗岩  | 186.8±1.3 | LA-MC-ICP-MS | 本文                   |
|     | 五拨子  | 花岗斑岩   | 189.8±0.7 | LA-ICP-MS    | 李强等, 2012            |
|     | 老商家  | 花岗斑岩   | 196.4±0.8 | LA-ICP-MS    | 李强等, 2012            |
|     | 罗文峪  | 二长花岗岩  | 196.7±7.0 | LA-ICP-MS    | 陆继龙等, 2012           |
|     | 青山口  | 二长花岗岩  | 199±2     | SHRIMP       | 罗镇宽等, 2001a          |
|     | 六柱坪  | 二长花岗岩  | 205.7±0.8 | LA-ICP-MS    | 李强等, 2012            |
|     | 三拨子  | 二长花岗岩  | 211.1±1.1 | LA-ICP-MS    | 李强等, 2012            |
|     | 盘山   | 石英二长岩脉 | 203~207   | SHRIMP       | 马寅生等, 2007           |
| 期   |      | 细粒花岗岩  | 210±4     | SHRIMP       | 赵越等, 2005            |
|     | 都山   | 黑云母花岗岩 | 223±2     | SHRIMP       | 罗镇宽等, 2003           |
|     |      | 花岗岩    | 222±1     | LA-ICP-MS    | 叶浩等, 2014            |
|     | 大石柱  | 二长花岗岩  | 224±2     | LA-ICP-MS    | 叶浩等, 2014            |

东西向的构造之上(Niu et al., 2004)。这些特征表明, 马兰峪背斜并不仅仅是印支运动的产物, 而是开始形成于印支期, 最终完成于燕山期。

根据上述获得几个岩体的锆石 U-Pb 年龄, 得出各岩体侵位结晶年龄由老至新依次为: 前分水岭二长花岗岩为(153.8±2.7) Ma, 茅山二长花岗岩为(162.7±1.5) Ma, 王坪石二长花岗岩为(162.3±1.3) Ma, 肖营子花岗闪长岩为(164.4±2.2) Ma, 高家店二长闪长岩为(170.5±1.8) Ma, 肖营子钾长花岗岩(186.8±1.3) Ma; 各岩体的继承岩浆锆石的峰值年龄可进一步归纳为 167~164 Ma、172~170 Ma、180~175 Ma 和 201~186 Ma 几组(图 3)。这一结果基本反映了马兰峪背斜核部花岗质岩浆活动的时代范围, 与前人研究成果可互为印证与补充(Zhang et al., 2014), 并可将马兰峪背斜核部中生代侵入岩体时代大致分别归属于印支期(224~186 Ma)和燕山期(180~153 Ma)(表 2), 以燕山期为主, 与区域内构造运动完全协调一致。这也反映了马兰峪复式背斜开始形成于印支期, 并最终完成于燕山期, 期间伴随与构造活动协调一致的岩浆活动。

区域地质填图和专题研究表明, 马兰峪背斜是水平挤压背景下形成的基底结晶岩系与盖层共同卷入褶皱作用的厚皮式构造, 构造作用使地壳加厚到近 50 km(河北省地质局区域地质测量大队, 1966;

Chen, 1998; 李海龙等, 2008; 张长厚等, 2011)。一些学者分析了马兰峪背斜核部岩体以及这一区域中生代高锶花岗岩和中晚侏罗世髫髻山组火山岩地球化学特征认为其形成于陆内造山挤压环境, 岩浆应来源于下地壳古老变质岩, 同时有地幔物质的加入(李伍平等, 2004, 2007; 刘红涛等, 2002; 李承东等, 2004; 马君, 2009; 李小伟等, 2010; Li et al., 2013; 叶浩等, 2014)。本文所列举的马兰峪背斜核部侵入岩体具有相似微量元素配分模式、左陡右倾型的稀土元素配分曲线、不明显或弱的 Eu 负异常以及部分岩体具有高 Ba-Sr 花岗岩特征表明其岩浆确实来源于加厚的下地壳, 具有壳幔混合特征。野外可见王坪石岩体钾长花岗岩、高家店二长闪长岩和肖营子花岗斑岩中有暗色包体出现也指示了壳幔混合作用。上述事实说明马兰峪背斜在其形成过程中, 其构造作用已触及下地壳并引起上地幔顶部物质运动, 上地幔物质的底侵作用使下地壳物质部分熔融, 使得以花岗岩等为主体的中酸性岩浆沿背斜核部不断侵入。因此, 马兰峪背斜形成过程, 不仅是地壳表层物质的运动, 而且涉及下地壳甚至上地幔部分的构造岩浆作用过程。

除剧烈的地壳褶皱作用外, 燕山及其北侧的内蒙古地轴还发育有规模巨大的深部断裂, 由北向南有康保—围场断裂带和赤城—隆化断裂带等。北缘康

保—围场断裂在 270~250 Ma、230~210 Ma 均具强烈的深层次韧性剪切变形(Wang et al., 2013); 赤城—隆化断裂带也经历了多次断裂活动: 263~252 Ma、244~233 Ma、180~162 Ma(王瑜, 1994; 胡玲等, 2002; Wang et al., 2013), 断裂作用形成的糜棱岩的变质程度已达到高绿片岩相的变质条件, 表明其形成深度也已达到中、下地壳。

从燕山地区中生代的沉积-火山岩地层序列看出, 燕山地区中、晚三叠世时曾经受了印支造山运动, 伴有大量花岗岩侵入, 之后南大岭火山岩喷出。侏罗纪时期, 以九龙山组或髫髻山组之下角度不整合为其上限, 和以张家口组之下的角度不整合为其上限的两个不整合面为界限的燕山运动两幕造山作用均发育强烈火山作用和大量花岗岩侵入。这就充分说明了燕山造山带是涉及全地壳的一个构造-岩浆活动带, 中生代的构造运动使得这里的大陆地壳卷入造山作用中, 完全改变了这里大陆壳原来的稳定状态, 进入一个构造-岩浆活化的新阶段, 即滨太平洋构造-岩浆活化的新阶段(任纪舜等, 1980, 1990, 1999; 刘凤山等, 1998; 李秋生等, 2008)

### 3 结论

通过对马兰峪复式背斜核部中生代侵入岩体的锆石 U-Pb 定年分析认为, 背斜核部中生代侵入岩形成时期大致可分为印支期和燕山期, 与区域内构造作用完全同步。侵入岩地球化学特征表明其岩浆可能来源于上地幔物质底侵引起下地壳基性岩石部分熔融。这说明马兰峪复式背斜不仅是印支造山运动的产物, 而是开始形成于印支期, 最终完成于燕山期; 说明燕山地区中生代的构造运动并不仅是地壳表层的构造作用, 而是涉及下地壳甚至上地幔的构造运动, 它使燕山地区大陆地壳由原来稳定的克拉通状态进入一个构造-岩浆活化的新阶段。

**致谢:** 感谢中国地质科学院地质研究所任留东研究员检查了岩石薄片; 刘建峰、张维、周丽云博士对岩石地化数据和 U-Pb 测年数据处理的指导; 宋彪研究员对锆石 U-Pb 测年数据处理的指导及对本文提出了建设性的修改意见。感谢中国地震局地质研究所王艳楠同学对本文测试工作的帮助。感谢审稿专家提出的建议。

### 参考文献:

- 崔盛芹, 李锦蓉, 吴珍汉, 易明初, 沈淑敏, 尹华仁, 马寅生. 2002. 燕山地区中新生代陆内造山作用[M]. 北京: 地质出版社.  
郭少丰, 汤中立, 罗照华, 赵文浩. 2009. 冀东唐杖子、牛心山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报,

- 28(10): 1458-1464.  
河北省地质局区域地质测量大队. 1966. 兴隆幅、宝坻幅北部 1/20 万地质图说明书[R]. 廊坊: 河北省地质局区域地质测量大队.  
河北省地质局区域地质测量大队. 1970. 青龙幅 1/20 万地质图说明书[R]. 廊坊: 河北省地质局区域地质测量大队.  
河北省地质矿产局. 1989. 中华人民共和国地质矿产部地质专报 第 15 号 河北省北京市天津市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.  
河北省区域地质矿产勘查开发局. 2000. 承德市幅 1/25 万区域地质调查报告[R]. 石家庄: 河北省区域地质矿产勘查开发局.  
胡玲, 宋鸿林, 颜丹平, 胡道功. 2002. 尚义-赤城断裂带中糜棱岩  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄记录及地质意义[J]. 中国科学(D 辑), 32(11): 908-913.  
李承东, 张旗, 苗来成, 孟宪锋. 2004. 冀北中生代高 Sr 低 Y 和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系[J]. 岩石学报, 20(2): 269-284.  
李海龙, 张长厚, 邹云, 邓洪菱, 马君. 2008. 冀东马兰峪背斜南翼与西部倾伏端盖层变形特征及其构造意义[J]. 地质通报, 27(10): 1698-1708.  
李强, 孟祥元, 武峰, 杨富全, 刘锋, 张志欣. 2012. 河北省四拨子-六拨子钼铜矿区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿意义[J]. 矿床地质, 31(2): 255-270.  
李秋生, 高锐, 张成科, 赵金仁, 管烨, 张季生. 2008. 残余壳根与“三明治”结构—燕山造山带中段地壳结构的主要特征[J]. 地球学报, 29(2): 129-136.  
李伍平, 李献华. 2004. 燕山造山带中段中晚侏罗世中酸性火山岩的成因及其意义[J]. 岩石学报, 20(3): 501-510.  
李伍平, 赵越, 李献华, 路凤香, 梁细荣, 涂湘林. 2007. 燕山造山带中—晚侏罗世髫髻山期(蓝旗期)火山岩的成因及其动力学意义[J]. 岩石学报, 23(3): 557-564.  
李小伟, 莫宣学, 黄丹峰, 徐晓彤, 孟月玥. 2010. 河北兴隆王坪正长花岗岩地球化学特征及成因研究[J]. 地质学报, 84(5): 682-693.  
刘凤山, 石淮立. 1998. 太行山—燕山地区中生代花岗岩生成动力学机制与陆内造山作用[J]. 地球学报, 19(1): 12-18.  
刘红涛, 孙世华, 刘建明, 翟明国. 2002. 华北克拉通北缘中生代高锶花岗岩类: 地球化学与源区性质[J]. 岩石学报, 18(3): 257-274.  
陆继龙, 石厚礼, 赵玉岩, 郝立波, 魏俏巧, 赵新运. 2012. 冀东罗文峪花岗岩体 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(S3): 179-188.  
罗镇宽, 关康, 裴有守, 苗来成, QIU Y M, MCNAUGHTON N J, GROVES D I. 2001a. 冀东金厂峪金矿区钠长岩脉及青山口花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义[J]. 地质找矿论丛, 16(4): 226-231.  
罗镇宽, 裴有守, 关康, 苗来成, QIU Y M, MCNAUGHTON N J, GROVES D I. 2001b. 冀东峪耳崖和牛心山花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 278-285.  
罗镇宽, 苗来成, 关康, 裴有守, QIU Y M, MCNAUGHTON N J, GROVES D I. 2003. 冀东都山花岗岩基及相关花岗斑岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年及其意义[J]. 地球化学, 32(2): 173-180.  
马君. 2009. 冀东马兰峪隆起核部中生代中酸性侵入岩岩石地

球化学特征及构造意义[D]. 北京: 中国地质大学.

马寅生, 曾庆利, 宋彪, 杜建军, 杨富全, 赵越. 2007. 燕山中段  
盘山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定及其构造  
意义[J]. 岩石学报, 23(3): 547-556.

牛宝贵, 和政军, 宋彪, 任纪舜. 2003. 张家口组火山岩  
SHRIMP 定年及其重大意义[J]. 地质通报, 22(2): 140-141.

任纪舜, 姜春发, 张正坤, 秦德余. 1980. 中国大地构造及其演  
化[M]. 北京: 科学出版社: 4-7.

任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 1990. 中国东部及  
邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社:  
6-9.

任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 姜春发, 牛宝贵, 李锦铁, 谢广连,  
和政军, 刘志刚. 1999. 从全球看中国大地构造——中国及  
邻区大地构造图简要说明[M]. 北京: 地质出版社: 14-18.

宋彪, 乔秀夫. 2008. 辽北辉绿岩墙(床)群及二道沟组玄武岩锆  
石年龄及其构造意义[J]. 地学前缘, 15(3): 250-262.

王季亮, 李丙泽, 周德星. 1994. 河北省中酸性岩体地质特征及  
其成矿关系[M]. 北京: 地质出版社.

王瑜. 1994. 中国东部内蒙—燕山地区晚古生代晚期—中生代  
的造山作用过程[D]. 北京: 中国地质科学院.

徐刚, 赵越, 高锐, 李秋生, 胡健民, 刘晓文, 吴海, 杨富全,  
张拴宏, 管烨, 张季生, 白金, 匡朝阳, 王海燕. 2006. 燕山  
褶断带中生代盆地变形—板内变形过程的记录——以下板  
城、承德-上板城、北台盆地为例[J]. 地球学报, 27(1): 1-12.

叶浩, 张拴宏, 赵越, 吴飞. 2014. 燕山褶断带晚三叠世都山复  
式岩基成因及侵位变形: 华北北缘中生代早期构造背景的  
制约[J]. 地学前缘, 21(4): 275-292.

张长厚, 吴淦国, 王根厚, 张维杰, 宋鸿林. 2004a. 冀东地区燕  
山中段北西向构造带: 构造属性及其年代学[J]. 中国科学(D  
辑), 34(7): 600-612.

张长厚, 吴淦国, 徐德斌, 王根厚, 孙卫华. 2004b. 燕山板内造  
山带中生代构造格局与构造演化[J]. 地质通报, 23(9):  
864-875.

张长厚, 李程明, 邓洪菱, 刘阳, 刘磊, 魏波, 李寒滨, 刘孜.  
2011. 燕山-太行山北段中生代收缩变形与华北克拉通破  
坏[J]. 中国科学(D辑), 41(5): 593-617.

赵丽君. 2010. 华北克拉通北缘早中生代岩体侵位与地壳变形  
——以盘山岩体周缘变形及年代学分析为例[J]. 地质与勘  
探, 46(1): 102-112.

赵越, 宋彪, 张拴宏, 马寅生, 裴军令, 杨振宇. 2005. 应用锆石  
SHRIMP U-Pb 年龄确定燕山褶断带晚三叠世的构造变形时  
代[C]//北京离子探针中心年报(2004). 北京: 地质出版社:  
63-64.

赵越, 张拴宏, 徐刚, 杨振宇, 胡健民. 2004. 燕山板内变形带  
侏罗纪主要构造事件[J]. 地质通报, 23(9): 854-863.

中国地质大学(北京)地质调查研究院. 2004. 青龙县幅 1/25 万区  
域地质调查报告[R]. 北京: 中国地质大学(北京)地质调查  
研究院.

## References:

- CUI Sheng-qin, LI Jin-rong, WU Zhen-han, YI Ming-chu, SHEN  
Shu-min, YIN Hua-ren, MA Yin-sheng. 2002. Mesozoic and  
Cenozoic intracontinental orogenesis of the Yanshan area,  
China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- CHEN A. 1998. Geometric and kinematic evolution of base  
ment-cored structures: intraplate orogenesis within the Yan  
shan Orogen, northern China[J]. Tectonophysics, 292(1-2):  
17-42.
- Geological Survey Institute of China University of Geosciences.  
2004. Report of regional geology of Qinglong(scale  
1:250000)[R]. Beijing: Geological Survey Institute of China  
University of Geosciences(in Chinese).
- Geological Survey Team of Hebei Province. 1966. Report of re  
gional geology of Xinglong and northern Baodi(scale  
1:200000)[R]. Langfang: Geological Survey Team of Hebei  
Province(in Chinese).
- Geological Survey Team of Hebei Province. 1970. Report of re  
gional geology of Qinglong(scale 1:200000)[R]. Langfang:  
Geological Survey Team of Hebei Province(in Chinese).
- GUO Shao-feng, TANG Zhong-li, LUO Zhao-hua, ZHAO Wen-hao.  
2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geological signifi  
cance from granite bodies in Tangzhangzi and Niuxinshan,  
eastern Hebei Province, China[J]. Geological Bulletin of  
China, 28(10): 1458-1464(in Chinese with English abstract).
- Hebei Bureau of Geology and Minerals. 1989. Regional geology of  
Hebei Province, Beijing Municipality, and Tianjin Municipal  
ity Province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in  
Chinese).
- Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration.  
2000. Report of regional geology of Chengde(scale  
1:250000)[R]. Shijiazhuang: Hebei Bureau of Geology and  
Mineral Resources Exploration(in Chinese).
- HU Ling, SONG Hong-lin, YAN Dan-ping, HU Dao-gong. 2002.  
The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology constraint and geological sig  
nificance of mylonites in Shangyi-Chicheng fault belt on the  
north of North China Craton[J]. Science in China (Series D),  
32(11): 908-913(in Chinese).
- LI Cheng-dong, ZHANG Qi, MIAO Lai-cheng, MENG Xian-feng.  
2004. Mesozoic high-Sr, low-Y and low-Sr, low-Y types  
granitoids in the northern Hebei province: Geochemistry and  
petrogenesis and its relation to mineralization of gold depos  
its[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 269-284(in Chinese  
with English abstract).
- LI Hai-long, ZHANG Chang-hou, ZOU Yun, DENG Hong-ling,  
MA Jun. 2008. Tectonic deformations of the cover in the  
southern limb and western plunging zone of the Malanyu anti  
clinorium, eastern Hebei, China, and its tectonic implica  
tions[J]. Geological Bulletin of China, 27(10): 1698-1708(in  
Chinese with English abstract).
- LI Qiang, MENG Xiang-yuan, WU Feng, YANG Fu-quan, LIU  
Feng, ZHANG Zhi-xin. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating  
of intrusive rocks and its metallogenetic significance in Si  
bozi-Liubozi molybdenum-copper deposit of Qinglong County,  
Hebei Province[J]. Mineral Deposits, 31(2): 255-270(in Chi  
nese with English abstract).
- LI Qiu-sheng, GAO Rui, ZHANG Cheng-ke, ZHAO Jin-ren,  
GUAN Ye, ZHANG Ji-sheng. 2008. Remainder Crustal Root  
and Decoupling-Main Characteristics of Crust Structure be  
neath the Yanshan Intracontinent Orogen[J]. Acta Geoscient  
ifica Sinica, 29(2): 129-136(in Chinese with English abstract).
- LI Shan, WANG Tao, WILDE S A, TONG Ying. 2013. Evolution,  
source and tectonic significance of Early Mesozoic granitoid

- magmatism in the Central Asian Orogenic Belt (central segment)[J]. *Earth-Science Reviews*, 126(0): 206-234.
- LI Wu-ping, LI Xian-hua. 2004. Petrogenesis and its implication for the middle-late Jurassic intermediate-acidic volcanic rocks in the middle section of Yanshan orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 501-510(in Chinese with English abstract).
- LI Wu-ping, ZHAO Yue, LI Xian-hua, LU Feng-xiang, LIAO Xi-rong, TU Xiang-lin. 2007. Genesis of the middle-later Jurassic volcanic rocks of Tiaojishan (Lanqi) period and its geodynamic implication, Yanshan Orogen, east China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 557-564(in Chinese with English abstract).
- LI Xiao-wei, MO Xuan-xue, HUANG Dan-feng, XU Xiao-tong, MENG Yue-yue. 2010. Geochemical characteristics and Origin of the Wangpingshi Syenogranite in Xinglong County, Hebei Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(5): 682-693(in Chinese with English abstract).
- LIU Feng-shan, SHI Zhun-li. 1998. Dynamic mechanism about Generation of Mesozoic Granites in Taihang Shan-Yan Shan Area and Intracontinental Orogeny[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 19(1): 12-18(in Chinese with English abstract).
- LIU Hong-tao, SUN Shi-hua, LIU Jian-ming, ZHAI Ming-guo. 2002. The Mesozoic high-Sr granitoids in the northern marginal region of North China Craton: geochemistry and source region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 257-274(in Chinese with English abstract).
- LU Ji-long, SHI Hou-li, ZHAO Yu-yan, HAO Li-bo, WEI Qiao-qiao, ZHAO Xin-yun. 2012. LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Luowenyu Granite Intrusions and Its Geological Significance in Eastern Hebei Province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 42(S3): 179-188(in Chinese with English abstract).
- LUO Zhen-kuan, GUAN Kang, QIU You-shou, MIAO Lai-cheng, QIU Y M, MCNAUGHTON N J, GROVES D I. 2001. Zircon SHRIMP U-Pb dating of albite dyke in Jinchangyu gold mine, jidong area, Hebei, China[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 16(4): 226-231(in Chinese with English abstract).
- LUO Zhen-kuan, QIU You-shou, GUAN Kang, MIAO Lai-cheng, QIU Y M, MCNAUGHTON N J, GROVES D I. 2001. SHRIMP U-Pb dating on zircon from Yu 'erya and Niuxinshan granite intrusions in eastern Hebei Province[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 20(4): 278-285(in Chinese with English abstract).
- LUO Zhen-kuan, MIAO Lai-cheng, GUAN Kang, QIU You-shou, QIU Y M, MCNAUGHTON N J, GROVES D I. 2003. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Dushan granitic batholith and related granite- porphyry dyke, eastern Hebei Province, China, and their geological significance[J]. *Geochimica*, 32(2): 173-180(in Chinese with English abstract).
- MA Jun. 2009. Geochemical Characteristics and Mesozoic intermediate and felsic plutons in Malanyu Uplift, Estern Hebei Province, and its tectonic implications[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- MA Yin-sheng, ZENG Qing-li, SONG Biao, DU Jian-jun, YANG Fu-quan, ZHAO Yue. 2007. SHRIMP U-Pb dating of zircon from Panshan granitoid pluton in Yanshan orogenic belt and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 547-556(in Chinese with English abstract).
- NIU Bao-gui, HE Zheng-jun, SONG Biao, REN Ji-shun. 2003. SHRIMP dating of the Zhangjiakou volcanic series and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(2): 140-141(in Chinese).
- NIU Bao-gui, HE Zheng-jun, SONG Biao, REN Ji-shun, XIAO Li-wei. 2004. SHRIMP Geochronology of Volcanics of the Zhangjiakou and Yixian Formations, Northern Hebei Province, with a Discussion on the Age of the Xing'anling Group of the Great Hinggan Mountains and Volcanic Strata of the South-eastern Coastal Area of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 1214-1228.
- REN Ji-shun, JIANG Chun-fa, ZHANG Zheng-kun, QIN De-yu. 1980. *Geotectonics of China and its evolution*[M]. Beijing: Science Press: 4-7(in Chinese).
- REN Ji-shun, CHEN Bing-wei, NIU Bao-gui, LIU Zhi-gang, LIU Feng-ren. 1990. *Tectonic evolution of the continental lithosphere and metallogeny in Eastern China and Adjacent Area*[M]. Beijing: Science Press: 6-9(in Chinese).
- REN Ji-shun, WANG Zuo-xun, CHEN Bing-wei, JIANG Chun-fa, NIU Bao-gui, LI Jin-yi, XIE Guang-lian, HE Zheng-jun, LIU Zhi-gang. 1999. *A view of geotectonics of China from globe: An explanation of geotectonic map of China and adjacent area*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 14-18.
- SONG Biao, QIAO Xiu-fu. 2008. Ages of the zircons from basalt of the Erdaogou Formation and diabase dyke warms in Northern Liaoning, and their significances[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 250-262(in Chinese with English abstract).
- SUN S S, McDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 42: 313-345.
- WANG Ji-liang, LI Bing-ze, ZHOU De-xing. 1994. Geological characteristics and related mineralization of middle-acid complex in Hebei province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WANG Yu. 1994. Orogenic processes of the inner Mongolia-Yanshan area in Eastern China during the late Late Paleozoic-Mesozoic[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu, ZHOU Li-yun, LI Jin-yi. 2011. Intracontinental superimposed tectonics—A case study in the Western Hills of Beijing, eastern China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 123(5-6): 1033-1055.
- WANG Yu, ZHOU Li-yun, ZHAO Li-jun. 2013. Cratonic reactivation and orogeny: An example from the northern margin of the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 24(3-4): 1203-1222.
- XU Gang, ZHAO Yue, GAO Rui, LI Qiu-sheng, HU Jian-min, LIU Xiao-wen, WU Hai, YANG Fu-quan, ZHANG Shuan-hong, GUAN Ye, ZHANG Ji-sheng, BAI Jin, KUANG Chao-yang, WANG Hai-yan. 2006. Mesozoic basin deformation of Yanshan folded fault belt-records of the intraplate deformation process: a case study of Xiabancheng, Chengde

- Shangbancheng and Beital basins[J]. Acta Geoscientica Sinica, 27(1): 1-12(in Chinese with English abstract).
- YE Hao, ZHANG Shuan-hong, ZHAO Yue, WU Fei. 2014. Petrogenesis and emplacement deformation of the Late Triassic Dushan composite batholith in the Yanshan fold and thrust belt: Implications for the tectonic settings of the northern margin of the North China Craton during the Early Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 21(4): 275-292(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Chang-hou, WU Gan-guo, WANG Gen-hou, ZHANG Wei-jie, SONG Hong-lin. 2004a. Northwest trending tectonic belt in the middle Yanshan Orogenic Belt of northeast Hebei Province, North China: Tectonic evolution and geochronology[J]. Science in China(Series D), 34(7): 600-612(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Chang-hou, WU Gan-guo, XU De-bin, WANG Gen-hou, SUN Wei-hua. 2004b. Mesozoic tectonic framework and evolution in the central segment of the intraplate Yanshan orogenic belt[J]. Geological Bulletin of China, 23(9): 864-875(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Chang-hou, LI Cheng-ming, DENG Hong-ling, LIU Yang, LIU Lei, WEI Bo, LI Han-bin, LIU Zi. 2011. Mesozoic contraction deformation in the Yanshan and northern Taihang mountains and its implications to the destruction of the North China Craton[J]. Science in China(Series D), 54(5): 593-617(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Shuan-hong, ZHAO Yue, DAVIS G A, YE Hao, WU Fei. 2014. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization[J]. Earth-Science Reviews, 131(0): 49-87.
- ZHAO Li-jun. 2010. Early Mesozoic Plutonic Intrusion and Crustal Deformation in the Northern Margin of North China Craton:A Case Study on Deformation Surrounding the Pan-shan Granitic Intrusion and its Chronological Analysis[J]. Geology and Exploration, 46(1): 102-112(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yue, SONG Biao, ZHANG Shuan-hong, MA Yin-sheng, PEI Jun-ling, YANG Zhen-yu. 2005. An application of SHRIMP U-Pb age zircon geochronology to determine the age of tectonic deformation of the Late Triassic in the Yanshan fold and thrust belt[C]// Beijing SHRIMP Center annals(2004). Beijing: Geological Publishing House: 63-64(in Chinese).
- ZHAO Yue, ZHANG Shuan-hong, XU Gang, YANG Zhen-hong, HU Jian-min. 2004. Major tectonic event in the Yanshanian intraplate deformation belt in the Jurassic[J]. Geological Bulletin of China, 23(9): 854-863(in Chinese with English abstract).

## “盐湖卤水蒸发方法及设备、以及利用其的盐湖卤水处理方法及装置”获国家发明专利

### “Salt Lake Brine Evaporation Method and Equipment as well as the Processing Method and Device of Salt Lake Brine Based on This Technique” Obtains the Country Patent of Invention

由中国地质科学院矿产资源研究所盐湖与热水资源研究发展中心郑绵平、伍倩、乜贞、卜令忠、王云生申请的国家发明专利“盐湖卤水蒸发方法及设备、以及利用其的盐湖卤水处理方法及装置”(专利号: ZL 2012 1 0149139.3)于2015年6月10日获得授权公告。该发明涉及一种盐湖卤水蒸发方法及设备、以及利用其的盐湖卤水处理方法及装置, 特别涉及一种非常有效地提高碳酸盐型盐湖卤水蒸发制卤效率的盐湖卤水蒸发方法及设备、以及利用其的盐湖卤水处理方法及装置。

该项发明在西藏扎布耶盐湖开发中形成的太阳池技术的基础上, 充分利用青藏高原丰富的太阳能资源、冷资源及地热资源, 将冷冻排淡析硝碱和地热水热交换等方法应用于碳酸盐型盐湖卤水蒸发制卤过程, 降低了生产成本并摒弃了矿物燃料消耗, 使卤水蒸发速率和制卤效率得到显著提高。当雄错盐湖盐田试验表明, 该技术的使用可以极大地缩短成卤和产盐周期, 由于加速升温, 不仅可以获得太阳池连续运行所需的足够成卤量, 还可以直接从卤水中获得品位达80%的碳酸锂混盐和硝碱等盐类产品。本发明因地制宜, 巧用高原“绿色”能源, 对于开拓青藏高原有着远大前景的碳酸盐型锂盐湖具有重要意义, 目前已在当地进行扩试推广中。