

# 墨西哥西马德雷山脉中—新生代构造、岩浆演化及成矿特征

姚春彦, 姚仲友, 李汉武, 郭维民, 刘君安

YAO Chunyan, YAO Zhongyou, LI Hanwu, GUO Weimin, LIU Jun'an

中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016

Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China

**摘要:**墨西哥西马德雷山脉是白垩纪—新生代岩浆活动和构造运动形成的。中生代岩浆活动可以分为5个主要阶段:侏罗纪—早白垩世、晚白垩世—古新世、始新世—渐新世、中新世早期和中新世中期—现代。这些岩浆活动和构造运动与法拉隆(Farallon)板块向北美大陆俯冲和加利福尼亚湾打开相关。墨西哥中新生代的成矿作用与东太平洋板块边缘连续的俯冲过程密切相关,矿床类型多样,包括VMS(与火山相关的块状硫化物)型、斑岩型、IOCG(铁氧化物铜金)型、矽卡岩型等。

**关键词:**中生代;岩浆演化;成矿特征;墨西哥西马德雷山脉

中图分类号:P534.5;P534.6;P588.1 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2017)12-2124-10

**Yao C Y, Yao Z Y, Li H W, Guo W M, Liu J A. The tectonics, magmatic evolution and metallogenic characteristics in Mexican Sierra Madre Occidental during the Mesozoic–Cenozoic period. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(12):2124–2133**

**Abstracts:** The Sierra Madre Occidental in Mexico was formed by Cretaceous–Cenozoic magmatic and tectonic evolution. Five main magmatic stages for the Mesozoic–Cenozoic could be recognized in Mexico, i.e., Jurassic to Early Cretaceous, Late Cretaceous to Paleocene, Eocene to Oligocene, Early Miocene, and Middle Miocene to the present. The magmatic and tectonic history in the Sierra Madre Occidental was related to the opening of the Gulf of California and the subduction of the Farallon plate to the North American continent. The Mesozoic–Cenozoic metallogeny in Mexico probably resulted from the continuous subduction process at the edge of the eastern Pacific plate. The types of deposits formed in this metallogenic epoch include VMS, porphyry, IOCG, skarn and other types.

**Key words:** Mesozoic–Cenozoic; magmatic evolution; metallogenic characteristics; Mexican Sierra Madre Occidental

以流纹岩和/或花岗岩类为主的大火成—深成岩带是大多数大陆构造环境共有的特征。大火成—深成岩带多以大体积( $10^5\text{km}^3$ 或大于 $10^6\text{km}^3$ 数量级)、形成时代集中(10~40Ma)为典型特点。Bryan等<sup>[1]</sup>将这些分布在全球的大火成—深成岩带统称为硅质大火成岩省。硅质大火成岩省在地球演化过程中具有重要的意义,其大规模的岩浆活动不但与板块构造及矿床的形成有关,短时间内大面积的喷发事件也涉及到全球气候变化。

“墨西哥西马德雷”指北起墨美边境、南至泛墨

西哥火山岩带、西临加利福尼亚湾、东邻中央高原,平均海拔超过2000m的一个大规模自然地理省,是地球上规模较大的酸性火成岩省之一(图1),也是新生代形成规模最大的酸性火成岩省,熔结凝灰岩分布面积约 $393000\text{km}^2$ <sup>[3]</sup>。加利福尼亚湾的打开,加速了西马德雷西侧深大峡谷地貌的形成,盆地和山脉的拉张构造形成东部边界大的构造凹陷。“西马德雷山脉”也常用来描述古近纪火山岩省,其特点是发育大面积的酸性熔结凝灰岩。在自然地理省之外的中央高原和奇瓦瓦(Chihuahua)东部部分地

收稿日期:2017-03-20;修订日期:2017-09-19

资助项目:中国地质调查局项目《海上丝绸之路大洋洲和南美洲矿产资源潜力评价》(编号:DD20160110)

作者简介:姚春彦(1980-),女,博士,高级工程师,从事矿床和地球化学方面的研究。E-mail: ycyan@126.com

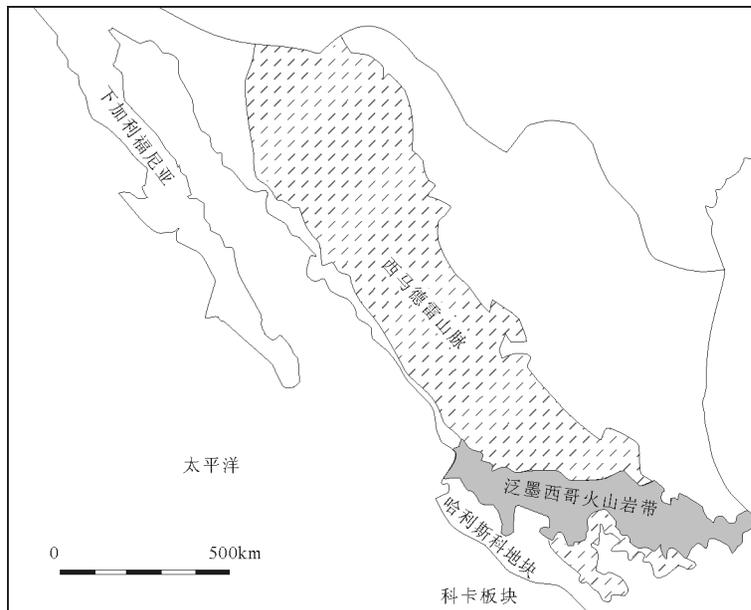
图1 西马德雷山脉位置<sup>[1]</sup>

Fig. 1 The location of the Mexican Sierra Madre Occidental

区、泛墨西哥火山岩带南面的南马德雷山脉(Michoacan、Guerrero 和 Oaxaca)也出露少量晚始新世—渐新世酸性熔结凝灰岩<sup>[4]</sup>。

墨西哥作为拉美经济大国和世界重要的矿业生产国,主要的能源矿产资源有石油、天然气、铀、煤等;金属矿产有铁、锰、铜、铅、锌、金、银、铋、汞、钨、钼、钒等;非金属矿产有硫、石墨、硅灰石、天然碱、萤石等。据美国地质调查局2013年墨西哥矿业年鉴统计,墨西哥储量居世界前列的矿产有:银位居世界第1位,氟石和铋居世界第2位,硅灰石居世界第3位,钼、铅和锌位居世界第5位,石墨居世界第7位,黄金居世界第8位,锰位居世界第11位。从地区分布看,西马德雷山区除金矿外还储藏铅、铜、铋、钨、锡、汞等有色金属,是墨西哥最重要的有色金属资源分布地区。

本文重点讨论西马德雷自然地理省范围内的地质概况及成矿特征。

## 1 墨西哥西马德雷地质概况

从全球构造演化背景看,墨西哥地处太平洋的科卡板块与大西洋加勒比板块之间,属双向俯冲带之间的隆起地块,由墨西哥造山带和墨西哥湾沿岸向斜两大构造单元组成<sup>[5]</sup>。墨西哥地质调查局根据

墨西哥的地质构造特征,将墨西哥构造单元划分为2个一级构造单元,分别是墨西哥造山带和墨西哥湾盆地,进一步划分为6个二级构造单元,其中在墨西哥造山带划分了3个二级构造单元,分别是下加利福尼亚造山带、西马德雷—南马德雷岛弧带和东马德雷逆冲挤压带(图2)。西马德雷—南马德雷岛弧带被泛墨西哥火山岩带分割成西马德雷带和南马德雷带。

### 1.1 区域地层

墨西哥西马德雷山脉由白垩纪—新生代岩浆活动和构造运动形成<sup>[2]</sup>。西马德雷山脉地层由5类岩石组成:①晚白垩世—古新世深成岩和火山岩;②始新世安山岩和下部火山岩杂岩体中的少量流纹岩;③渐新世(32~28Ma)和早中新世(24~20Ma)2次喷发的硅质熔结凝灰岩;④每次熔结凝灰岩喷发活动末期及之后喷发的玄武质熔岩;⑤中新世、上新世和第四纪反复喷发的碱性玄武质熔岩和熔结凝灰岩。岩石组合①和②被定义为下火山岩系,岩石组合③被定义为上火山岩系<sup>[6]</sup>。西马德雷山脉北部的岩石组合④为镁铁质火山岩,有研究认为其是南科迪勒拉(Cordillera)玄武质安山岩带的北延部分<sup>[7]</sup>。岩石组合⑤与加利福尼亚湾的多次拉张运动及加利福尼亚湾打开直接相关<sup>[2]</sup>。以上所有的岩石覆盖在出露很少的前寒武纪、古生代和中生代非均质基底上<sup>[8]</sup>。

西马德雷大部分区域被26~17Ma的流纹质凝灰岩和具浮岩屑的凝灰岩覆盖<sup>[9]</sup>。北部主要由始新世和渐新世厚度超过1km的硅化凝灰岩、流纹质熔岩及少量安山质熔岩组成<sup>[10]</sup>。火山岩的硅化作用可能是由于法拉隆(Farallon)板块俯冲导致幔源玄武岩分馏结晶作用形成的。西马德雷南部主要由熔结凝灰岩及少量安山熔岩组成。Santa Maria del Oro 及 Juchipila 地区主要分布34~28Ma的凝灰岩。在Guadalajar北部的西马德雷被SN向到NNE—SSW向约15km宽的地堑隔断。其中Juchipila地堑被层状火山—沉积层序覆盖。西马德雷东部,凝灰岩被14.7Ma的安山质火山岩覆盖<sup>[2]</sup>。

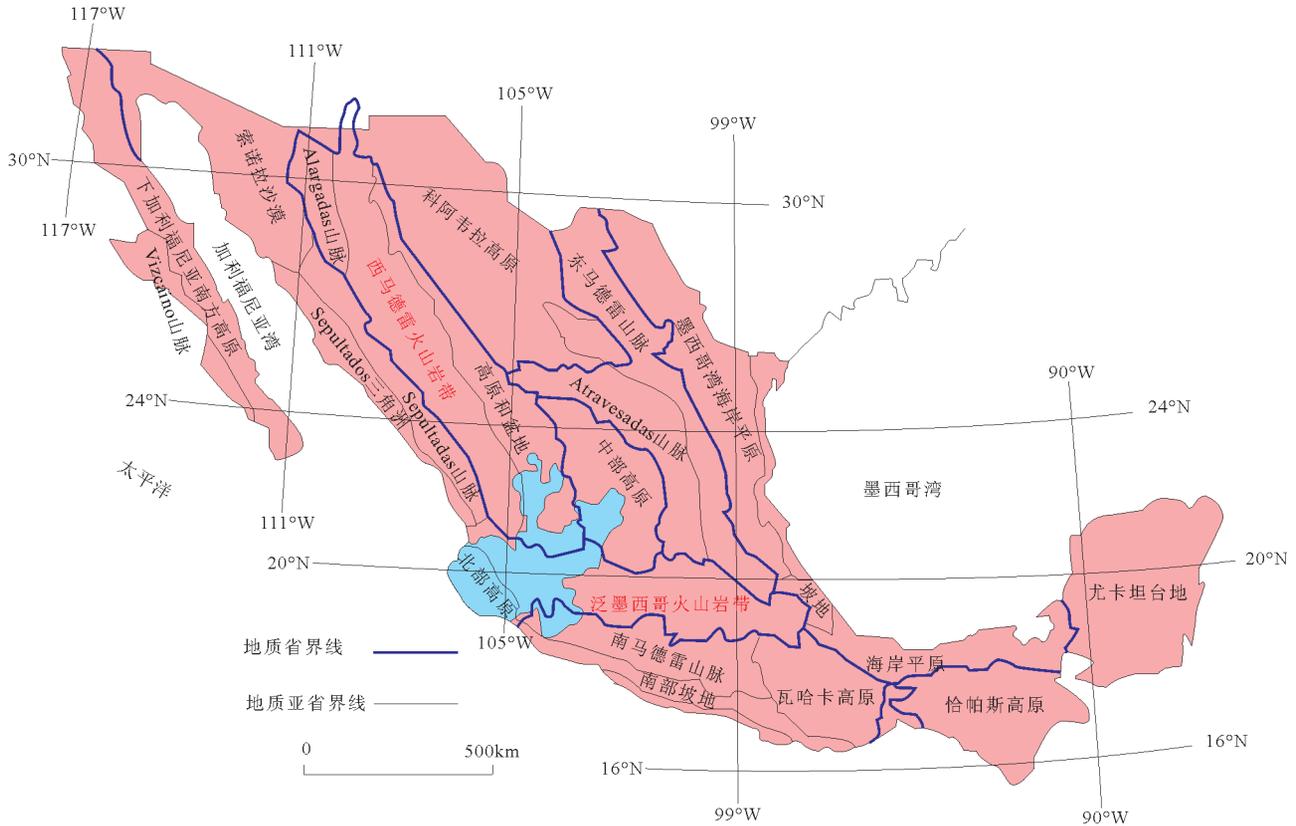


图2 墨西哥的大地构造单元

Fig. 2 The tectonic sketch map of the Mexico

1.2 区域构造

墨西哥西马德雷山脉大部分地区受到始新世末—渐新世不同期次以拉张为主的构造运动影响。在西马德雷山脉的北端(Sonora北部和Chihuahua北部)和南端(Nayarit—Jalisco),该构造运动影响了西马德雷山脉纵贯的整个区域,但并没有影响到西马德雷山脉的中心地带。未受到构造运动影响的中心带可作为东面墨西哥盆岭省与西面海湾拉张省之间的自然地理分界线<sup>[11]</sup>。为便于阐述西马德雷山脉的构造特征,将其划分为北部地区、中部地区和南部地区(图3)。

(1)北部地区

在西马德雷山脉北部及西北部的Sonora和Sinaloa发育NEE—SWW走向的地堑和断层,这些构造对渐新世前的岩石产生了较大影响<sup>[12]</sup>。西马德雷山脉的大多数斑岩铜—钼矿床产在该变形阶段同期或后期的强烈拉张带内<sup>[12]</sup>,矿床的K—Ar及Re—Os年龄为古新世和始新世。有研究认为,E—W和NEE—

SWW走向构造是在拉拉米(Laramide)造山运动挤压变形的最后阶段形成的<sup>[12-13]</sup>。但也有观点认为,这些构造可能与拉拉米造山运动和渐新世—上新世拉张运动过渡期的变形作用相关。

奇瓦瓦南部始新世与渐新世的熔结凝灰岩呈角度不整合接触,指示该地区拉张作用始于始新世<sup>[14]</sup>。另一方面,McDowell等<sup>[15]</sup>对该地区最早形成的过碱性熔结凝灰岩和过渡玄武岩(SCORBA类岩石)研究后认为,33Ma左右是该地区挤压变形与拉张变形的过渡期时限。根据野外构造特征,McDowell等<sup>[16]</sup>推断,区域范围内最早的拉张作用是紧随渐新世酸性火山作用(34~29Ma)发生的。29Ma前后熔结凝灰岩的不同产出关系,以及高角度正断层的存在和火山岩系的缓倾斜特征表明,奇瓦瓦地区的拉张运动止于形成盆岭构造的29Ma之后<sup>[16]</sup>。

相比于奇瓦瓦,Sonora的拉张作用更强烈且发生的年代稍晚。在一次大规模的陆内变形作用后,

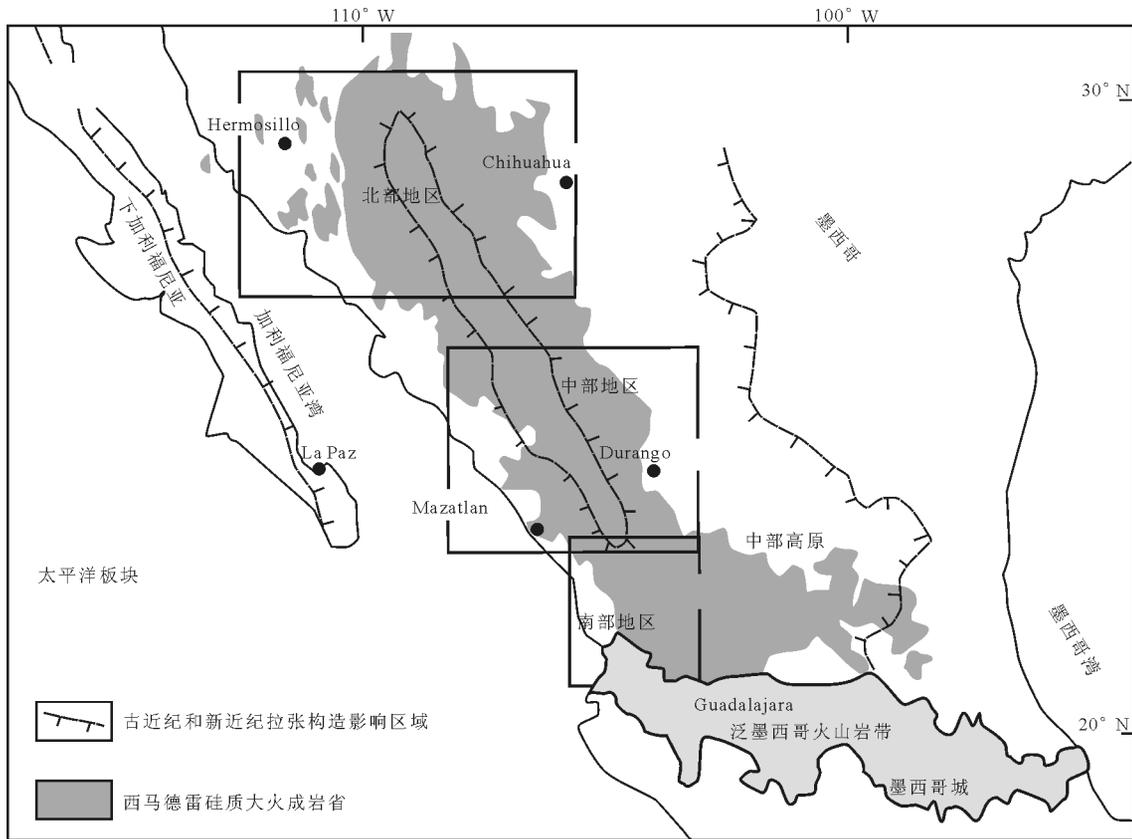
图3 墨西哥西马德雷构造分区<sup>[2,11]</sup>

Fig. 3 The tectonic distribution of the Mexican Sierra Madre Occidental

在 Hermosillo 和 Tecoripa 之间形成一条与西马德雷山脉走向近似平行的宽构造带。该构造带内存在高角度和低角度正断层及变质核杂岩<sup>[17-18]</sup>。Nouse 等<sup>[17]</sup>认为,该地区出露的高铝深成岩是变形地壳部分熔融的结果。通过钾长石  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄分析, Gans 等<sup>[19]</sup>认为, Mazatán 地区变质核杂岩在 20~16Ma 发生剥露,该时限与磷灰石裂变径迹获得的年龄  $18\pm 3\text{Ma}$  一致。Nourse 等<sup>[17]</sup>总结文献报道的 Sonora 地区不同变质核杂岩的年龄后认为, Sonora 地区地壳拉张运动发生在 25~15Ma。另外,在 Sonora 中东部,除变质核杂岩外,以高角度正断层为边界的拉张盆地也很常见。这些盆地的总体走向为 NNW—SSE 至 N—S 方向,含有厚层的砾岩和砂岩。在这些碎屑岩底部附近, 27~20Ma 的玄武质—安山质熔岩很常见<sup>[20]</sup>。

在 Sonora 东北部和 Chihuahua 西北部,构造活动仍在进行,但是活动的规模小。在 1887—1999 年期间,该地区至少发生了 64 次地震<sup>[21]</sup>,其中最大的

一次是 1887 年 5 月 3 日在 Sonora 州 Bavispe 地区发生的地震,震级为 7.4 级。

#### (2) 中部地区

在西马德雷山脉中部地区,拉张作用主要影响山脉的边缘,中心区域受到的影响较小。西马德雷山脉中部地区总体呈 NEE—SWW 的拉张作用可以追溯至渐新世。Nazas 地区熔结凝灰岩走向为 NE 向,最大倾角为  $35^\circ$ ,其 K—Ar 年龄为  $29.9\pm 1.6\text{Ma}$ ,覆于其上的近水平熔结凝灰岩层年龄为  $29.5\pm 0.6\text{Ma}$ <sup>[22]</sup>。Mezquital 地堑位于 Durango 市南西,走向为 NNE,宽约 40m。在该地堑内,高角度断层穿过渐新世熔结凝灰岩层,最年轻熔结凝灰岩的 K—Ar 年龄为  $27.0\pm 1.0\text{Ma}$ <sup>[23]</sup>。在该地区正断层的断层面上发现了 2 个时期的断层擦痕:老擦痕表明发生了 NW 走向的拉张运动,新擦痕表明发生了 NE 走向的拉张运动。

在 Sinaloa 州,西马德雷山脉的西侧受到强烈拉张作用的影响,形成总体呈 NNW 走向的半地堑。

在Tayoltita北部,一条NE走向的缓冲带将该地区分成2个倾斜域,即位于北面NEE走向的火山岩系和位于南面SWW走向的火山岩系<sup>[2]</sup>。

早中新世熔结凝灰岩沿Durango-Mazatlán联邦公路的Sinaloa-Durango州界分布,呈水平产出,只观察到一些小的断层。然而,在公路北侧Presidio河地区和Tayoltita附近的Pixtla河谷,相同层序内地层发生了倾斜,最大倾角为30°,表明在加利福尼亚湾打开之前,中新世中晚期的拉张作用间歇性地影响了西马德雷山脉的内陆地区<sup>[24]</sup>。

### (3)南部地区

西马德雷山脉的南部地区受到拉张构造运动的影响。在该地区的东北部边界处,即在Zacatecas州的Fresnillo地区,显然存在一个早期拉张阶段,熔结凝灰岩(39Ma)向西南倾斜,最大倾角为30°,其上覆盖近水平的凝灰岩层<sup>[25]</sup>。Zacatecas南部和Jalisco北部的多条地堑是拉张构造的延续,这些构造影响了东面的中央高原<sup>[26]</sup>。Ferrari等<sup>[27]</sup>将西马德雷山脉南部地区的构造分成3个主要域:东部域主要由NNE—NS走向、切断晚渐新世或早中新世熔结凝灰岩的地堑组成。在Tlaltenango地堑中,地层层序中最年轻的熔结凝灰岩年龄为22Ma,有正断层穿过岩体,使其发生了至少400m的位移。Bolaños地堑不同火山岩单元之间的截切关系表明,早中新世发生了拉张运动,且该拉张运动可能分多个阶段<sup>[27]</sup>;西部域的主要构造包括Alica、Pajaritos和Jesús María半地堑,以及Pochotitán和San Pedro正断层系统。所有这些构造的走向均呈N—S向至NNW—SSE向。半地堑的主断层切割Nayar层序中的熔结凝灰岩层(约21Ma)<sup>[27]</sup>。San Pedro和Pochotitán断层系统由NEE向至NE—SW走向的拉张运动形成。

西马德雷山脉的早中新世和渐新世火山岩发育雁列式开阔褶皱、小规模逆冲断层和多个左行断层。这些构造都是在中中新世形成的<sup>[28]</sup>,分布于一条NWW—SEE走向、西马德雷山脉与Jalisco地块最南边界处的构造带内。

## 2 中生代岩浆活动

西马德雷山脉是由白垩纪—新生代岩浆活动和构造运动形成的。本文重点关注西马德雷白垩纪—新生代时期的岩浆活动,这一时期火山岩的分

布情况见图4。

### (1)晚白垩世—古新世岩浆活动

在白垩纪末期和古近纪初期,墨西哥北部的岩浆活动以拉拉米(Laramide)岩浆弧活动为主,该期的岩浆活动产生了大量深成岩和火山岩,McDowell等<sup>[6]</sup>将这些岩石系统统称为下火山岩系。在墨西哥西北部的下部火山岩杂岩体中,深成岩年龄介于90~40Ma之间,越往东,岩石的年龄越小。沿Sinaloa境内西马德雷山脉的西缘,与加利福尼亚湾打开相关的地壳拉张作用造成下火山岩系的岩基出露;在Durango西部Nazas地区发现了白垩纪闪长质侵入岩,因此,在西马德雷山脉大部分地区很可能存在白垩纪—古新世岩基<sup>[10]</sup>。在西马德雷山脉南部地区,白垩纪—古新世火成岩很少出露,主要原因是存在一个大范围分布的渐新世尤其是早中新世熔结凝灰岩覆盖层。该覆盖层在该地区分布面积较大。

### (2)始新世岩浆活动

在西马德雷山脉北部,始新世火山岩主要沿奇瓦瓦(Chihuahua)境内该山脉的东缘和该火成岩省内的陆深峡谷出露。最早的始新世熔结凝灰岩多富含晶屑和黑云母<sup>[29]</sup>。在经过小规模的不连续的岩浆活动阶段之后,大规模的始新世岩浆活动始于46Ma,并一直持续至27.5Ma,几乎没有间断过。因此,在西马德雷山脉北部地区,极难区分始新世岩浆活动和“上火山岩系”的熔结凝灰岩岩浆活动。

在西马德雷山脉中部地区,最厚的始新世火山岩出露在Sinaloa-Durango的州界附近,尤其是在Tayoltita地区。该火山岩层序倾斜方向为E—NE向,由流纹质和安山质熔岩及次火山侵入岩组成。闪长质侵入岩的K—Ar年龄为39.9~36.6Ma。另外,西马德雷山脉的东缘也发生了重要的始新世岩浆活动。红层将始新世火山岩与渐新世流纹质熔结凝灰岩分隔。在Durango市北北西约210km处的El Cuarenta地区,测得流纹质火山岩系底部熔结凝灰岩的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年龄为39.6Ma<sup>[30]</sup>。

在西马德雷山脉南部地区发现了多处始新世岩石露头。Zacatecas州的Fresnillo和SainAlto地区出露大面积的酸性熔结凝灰岩、流纹岩穹隆和安山质熔岩<sup>[31]</sup>。安山质熔岩的K—Ar年龄为48.1±2.6Ma(钾长石)<sup>[32]</sup>。该熔岩层序的上覆岩层为红色砂岩和

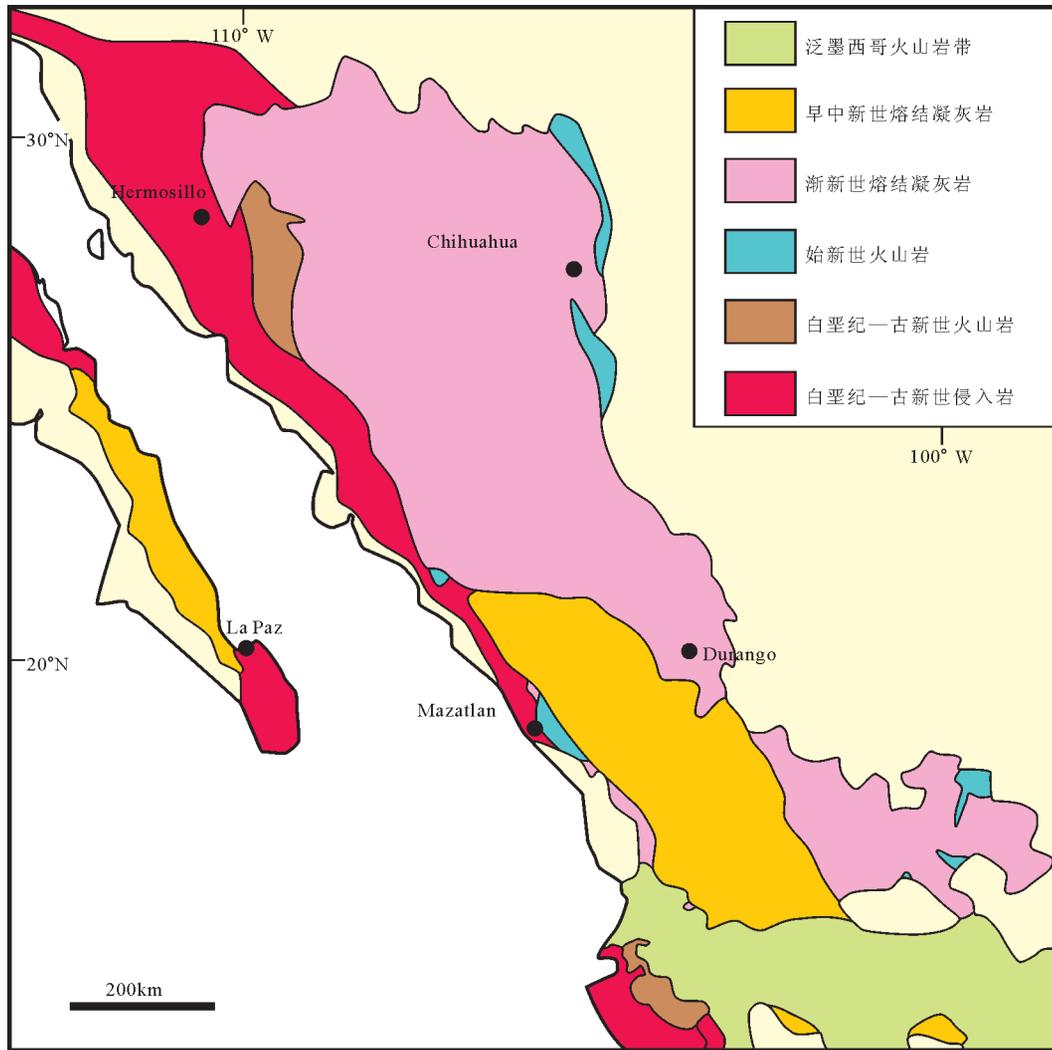


图 4 西马德雷新生代火山岩分布<sup>[2]</sup>

Fig. 4 The igneous distribution in Mexican Sierra Madre Occidental during Mesozoic–Cenozoic period

砾岩,夹安山质火山碎屑岩。这些碎屑岩将古新世岩石与渐新世—中新世熔结凝灰岩分隔。

(3)渐新世—早中新世熔结凝灰岩喷发(熔结凝灰岩爆发)

西马德雷大火成岩省巨厚的熔结凝灰岩覆盖了墨西哥西部的大部分地区。这一岩层序也被称为“上火山岩系”,其不整合覆盖在下火山岩系和始新世火成岩之上。上火山岩系主要由厚层的流纹质熔结凝灰岩、凝灰岩和熔岩组成,夹少量镁铁质熔岩<sup>[33]</sup>。西马德雷熔结凝灰岩的重要特征是就位时间较短,主要有2次喷发:第一次熔结凝灰岩喷发出现在渐新世开始时,涉及的范围非常大,在整个

火成岩省同步爆发;第二次喷发出现在早中新世,此次喷发集中于西马德雷山脉西南部。火岩省中心地带的熔结凝灰岩层序的最大宽度约为1km,出露的熔结凝灰岩的年龄跨度不超过3Ma,例如Rio Verde凝灰岩的年龄为31.8~31.4Ma<sup>[34]</sup>, Cascada凝灰岩的年龄为29.0Ma, Batopilas熔结凝灰岩的K–Ar年龄为30.1~28.1Ma<sup>[35]</sup>。

在西马德雷山脉中部地区,熔结凝灰岩主要出露于Durango州。在Nazas地区,2个渐新世熔结凝灰岩层序的年龄分别为32.2±0.7Ma和29.5±0.6Ma(透长石K–Ar年龄)<sup>[22]</sup>。在Durango市附近出露的渐新世熔结凝灰岩层序的厚度约为800m,该层序与

Chupaderos破火山口的形成有关。

西马德雷山脉的南部地区被酸性熔结凝灰岩覆盖。渐新世熔结凝灰岩主要出露于Aguascalientes东部、Zacatecas地区和Jalisco北部<sup>[27]</sup>。在Zacatecas北部的Fresnillo地区,Valdecañas山脉的流纹质熔岩和熔结凝灰岩的K-Ar年龄介于29.1~27.5Ma之间,而与银矿化相关的次火山岩体的年龄为33.5~32.2Ma<sup>[25]</sup>。在东南部,渐新世岩石大量出露于Jalpa和Tlaltenango之间的Morones山脉。

早中新世熔结凝灰岩层序覆盖了西马德雷山脉位于Nayarit境内的部分。Ferrari等<sup>[27]</sup>发现了2组不同年龄、不同物源区的熔结凝灰岩层序,即Las Canoas层序和El Nayar层序。Las Canoas层序厚约350m,K-Ar法<sup>[36]</sup>和<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar法<sup>[27]</sup>测得的年龄均为23.5Ma,该层序与北部约80km处出露的El Salto-Espinazo del Diablo层序形成于同一时代<sup>[6]</sup>。Las Canoas层序与南部Bolaños地堑内出露岩系的下部岩石在形成时代上一致。该岩系内的安山岩和熔结凝灰岩的K-Ar年龄分别为23.7Ma和23.2Ma<sup>[37]</sup>。

EL Nayar层序是沿西马德雷山脉西缘分布的NNW走向的岩带,平均宽度为75km。在Nayar高原,该层序达到最大厚度。该高原区存在一系列破火山口和火山口,可能是主要的喷发位置<sup>[27]</sup>。在El Nayar破火山口的内部,可以观察到11个不同的熔结凝灰岩单元,平均总厚度约1000m<sup>[27]</sup>。在El Nayar层序的不同层位,测定了7个<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年龄,均介于21.2~19.9Ma之间,平均年龄为20.9Ma<sup>[27]</sup>。该层序与南面Santa María del Oro地区(21.3Ma)<sup>[38]</sup>、Aguamilpa地区(22.4Ma)<sup>[39]</sup>和Bolaños地堑上部(21.3~20.1Ma)出露的熔结凝灰岩年龄一致<sup>[40]</sup>。

#### (4)晚中新世及以后的火山活动

在熔结凝灰岩喷发之后,西马德雷山脉的岩浆活动变得分散。火山岩一般呈双峰式和不连续分布特征,火山活动倾向于向未来的加利福尼亚湾迁移。在每一次熔结凝灰岩喷发的后期,均有玄武质-安山岩熔岩间歇性侵位,以及一组俯冲结束后形成的偏镁铁质和碱性岩石产出。这些熔岩主要沿北部San Buenaventura和Chihuahua、南部Navojoa和Sinaloa之间的一条大致呈NNE走向的构造带分布。这些镁铁质火山岩被统称为南科迪勒拉(Cordillera)玄武质安山岩省,

用来描述广泛分布的镁铁质岩石组合。Huejuquilla地区出露早渐新世熔结凝灰岩爆发之后侵位的玄武质熔岩。

在西马德雷山脉西北部,后俯冲岩浆作用的特点是,岩浆喷发形成了一个由熔结凝灰岩、过碱性流纹质和流纹英安质熔岩组成的独特层序(Lista Blanca组岩层)。这些岩石也广泛地出露于Sonora西北部的其他地区,岩石的年龄范围相对较窄,在14~11Ma之间<sup>[41]</sup>。

### 3 墨西哥西马德雷中生代成矿特征

墨西哥西马德雷多金属成矿作用与太平洋板块边缘连续的俯冲过程密切相关,其成矿历史可以追溯到侏罗纪。中生代时期,墨西哥境内形成的主要矿床均发育在太平洋沿岸的大洋环境或大陆岛弧环境中<sup>[42]</sup>,主要的矿床类型包括:①火山成因块状硫化物或重晶石矿床(VMS);②斑岩型铜矿、钼矿、金矿和钨矿矿床;③多金属铜矿、钨矿、金矿,以及矽卡岩矿床;④铁氧化物铜金(IOCG)矿床;⑤基性-超基性岩体中发育的铬铁矿-镍矿(铜-钴-金-PGE)和菱镁矿矿床。同时也发育其他矿床,如造山型金矿床、萤石矿床、铀矿矿床等。

侏罗纪一早白垩世,火山块状硫化物矿床发育在由俯冲作用形成的岛弧和其他与俯冲相关的海底火山或火山-沉积组合地质体内,如Tizapa-Santa Rosa, Campo Morado-Suriana, Tlanilpa-Azulaquez, Cuale-Bramador, San Nicolás-El Salvador等矿床<sup>[43]</sup>。该类型矿床主要围绕Guerrero复合地块边缘及在断裂弧或弧后环境分布。大部分以早侏罗世和早白垩世超镁铁质岩为主岩的铬-镍-铜矿床形成于岛弧和超俯冲区域<sup>[44]</sup>。

晚白垩世-古新世形成了多种金属矿床。斑岩型矿床、浅成低温热液矿床、矽卡岩型硫化物矿床和铁氧化物铜金矿床主要分布在一系列的陆弧内<sup>[45]</sup>;品位最高、经济价值最大的斑岩型铜-钼(钨-金)矿床产于Caborca和奇瓦瓦地体(如Sonora北部的巨型Cananea斑岩型铜-钼-钨矿床和La Caridad斑岩型铜-钼-钨矿床)。墨西哥的斑岩型矿床与主岩同源,其主岩可能是从多种源区和岩浆过程中演化出来的,并且受到不同程度地壳沉积物质的同化混染<sup>[45]</sup>。矽卡岩型铁矿床(铁矿带)主要分布在墨西哥西南部地区,例如Mezcala或Cerro Nahuatl。晚

白垩世, Sinaloa 地区发育与超基性-基性岩杂岩体有关的多金属矿床, 而 Sonora 西北部地区则发育造山型金矿床。

始新世—早中新世是西马德雷岩浆活动最活跃的时期。浅成低温热液矿床、中硫化多金属和低硫化金-银矿床等与晚始新世—早渐新世(35~30Ma)早期的火山杂岩密切相关, 如世界级的 Guanajuato 和 Fresnillo 浅成低温热液银矿床、大型 Peñasquito 金银铅锌矿床等。西马德雷南部发育渐新世铁氧化物铜金矿床, 如 Cerro de Mercado 和 La Perla-Hércules 矿集区<sup>[42]</sup>。

早中新世浅成低温热液(金、银、多金属)矿床与上火山岩系的岩浆活动相关。该时期大多数中低温热液矿床发现于 Nayarit 地区或相邻州, 并伴随发育一些脉状锡矿床。

#### 4 结 论

(1) 墨西哥西马德雷造山带地层主要由晚白垩世—始新世深成岩、火山岩、安山岩及少量流纹岩的下火山岩系, 以及渐新世和早中新世硅质熔结凝灰岩的上火山岩系, 玄武质熔岩、碱性玄武质熔岩和熔结凝灰岩组成。

(2) 始新世—渐新世不同期次以拉张为主的构造运动影响了西马德雷山脉纵贯的整个区域, 但并没有影响西马德雷山脉的中心地带。

(3) 墨西哥西马德雷大火成岩省的岩浆活动主要分为 4 期, 即晚白垩世—古新世、始新世、渐新世—早中新世, 以及晚中新世及以后的岩浆活动。

(4) 墨西哥西马德雷多金属成矿作用与太平洋板块边缘连续的俯冲过程密切相关, 其成矿历史可以追溯到侏罗纪, 矿床类型多样, 包括 VMS 型、斑岩型、IOCG 型、矽卡岩型、浅成低温热液型、铜镍硫化物型等。

**致谢:** 感谢在本文完成过程中给予指导性意见的中国地质科学院宋学信研究员, 以及参加过讨论或提出指导性意见的其他项目组人员。

#### 参考文献

[1] Bryan S E, Ferrari L. Large igneous provinces and silicic large igneous provinces: Progress in our understanding over the last 25 years[J]. Geological Society of America Bulletin, 2013, 125: 1053–1078.

[2] Ferrari L, Valencia-Moreno M, Bryan S. Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of

the western margin of North America[J]. Geological Society of America Bulletin, 2007, Special Paper 422: 1–39.

- [3] Aguirre-Díaz G J, Labarthe-Hernández G. Fissure ignimbrites: Fissure-source origin for voluminous ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and its relationship with Basin and Range faulting[J]. Geology, 2003, 31: 773–776.
- [4] Moran-Zenteno D J, Tolson G, Martiny B, et al. Ertiary arc-magmatism of the Sierra Madre del Sur, Mexico, and its transition to the volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt[J]. Journal of South American Earth Sciences, 1999, 12: 513–535.
- [5] 王素平, 王绘清, 吕晓东, 等. 墨西哥地质、矿产及矿业经济概况[J]. 安徽地质, 2012, 22: 273–280.
- [6] McDowell F W, Keizer R P. Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlán, Mexico[J]. Geological Society of America Bulletin, 1977, 88: 1479–1487.
- [7] Cameron K L, Nimz G J, Kuentz D, et al. Southern Cordilleran basaltic andesite suite, southern Chihuahua, Mexico; a link between Tertiary continental arc and flood basalt magmatism in North America[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94: 7817–7840.
- [8] Dickinson W R, Lawton T F. Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of Mexico[J]. Geological Society of America Bulletin, 2001, 113: 1142–1160.
- [9] Moore G, Marone C, Carmichael I S E, et al. Basaltic volcanism and extension near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and the Mexican Volcanic Belt[J]. Geological Society of America Bulletin, 1994, 106: 383–394.
- [10] Aguirre-Díaz G J, McDowell F W. The volcanic section at Nazas, Durango, Mexico, and the possibility of widespread Eocene volcanism within the Sierra Madre Occidental[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96: 13373–13388.
- [11] Henry C D, Aranda-Gómez J J. Plate interactions control middle-late Miocene proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range[J]. Tectonophysics, 2000, 318: 1–26.
- [12] Homer J T, Enríquez E. Epithermal precious metal mineralization in a strike-slip corridor: The San Dimas district, Durango, Mexico[J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 1999, 94: 1375–1380.
- [13] Barra F, Ruiz J, Valencia V A, et al. Laramide porphyry Cu-Mo mineralization in northern Mexico: Age constraints from Re-Os geochronology in molybdenites[J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 2005, 100: 1605–1616.
- [14] Megaw P K M. Geology and geochemistry of the Santa Eulalia mining district, Chihuahua, Mexico[M]. University of Arizona,

- Tucson, 1990: 463.
- [15] McDowell F W, Mauger R L. K–Ar and U–Pb zircon chronology of Late Cretaceous and Tertiary magmatism in central Chihuahua State, Mexico[J]. Geological Society of America Bulletin, 1994, 106: 118–132.
- [16] McDowell F W, Clabaugh S E. Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico[C]//Chapin C E, Elston W E. Ash–Flow Tuffs: Geological Society of America Special Paper, 1979, 180: 113–124.
- [17] Nourse J A, Anderson T H, Silver LT. Tertiary metamorphic core complexes in Sonora, northwestern Mexico[J]. Tectonics, 1994, 13: 1161–1182.
- [18] Vega–Granillo R, Calmus T. Mazatán metamorphic core complex (Sonora, Mexico): Structures along the detachment fault and its exhumation evolution[J]. Journal of South American Earth Sciences, 2003, 16: 193–204.
- [19] Gans P B, MacMillan I, Roldán–Quintana J. Late Miocene (Proto-Gulf) extension and magmatism on the Sonoran margin[J]. EOS, Transactions AGU, 2003, 84(46): 405.
- [20] Paz–Moreno F, Demant A, Cochemé J J, et al. The Quaternary Moctezuma volcanic field: A tholeiitic to alkali basaltic episode in the central Sonoran Basin and Range Province, Mexico[C]//Johnson S E, Paterson S R, Fletcher J M, et al. Tectonic Evolution of Northwestern México and the Southwestern USA: Geological Society of America Special Paper, 2003, 374: 439–455.
- [21] Suter M. The historical seismicity of northeastern Sonora and northwestern Chihuahua, Mexico (28–32°N, 106–111°W)[J]. Journal of South American Earth Sciences, 2001, 14: 521–532.
- [22] Aguirre–Díaz G J, McDowell F W. Nature and timing of faulting and syn–extensional magmatism in the southern Basin and Range, central–eastern Durango, Mexico[J]. Geological Society of America Bulletin, 1993, 105: 1435–1444.
- [23] Aranda–Gómez J J, Henry C D, Luhr J F, et al. Cenozoic volcanism and tectonics in NW Mexico—a transect across the Sierra Madre Occidental volcanic field and observations on extension related magmatism in the southern Basin and Range and Gulf of California tectonic Provinces[C]//Aguirre–Díaz G J, Aranda–Gómez J J, Carrasco–Núñez G, et al. Magmatism and Tectonics in the Central and Northwestern Mexico—A Selection of the 1997 IAVCEI General Assembly Excursions. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 1997: 41.
- [24] Aranda–Gómez J J, Luhr J F, Housh T B, et al. Synextensional Pliocene–Pleistocene eruptive activity in the Camargo volcanic field, Chihuahua, México[J]. Geological Society of America Bulletin, 2003, 115: 298–313.
- [25] Lang B, Steinitz G, Sawkins F J, Simmons SF. K–Ar Age studies in the Fresnillo Silver District, Zacatecas, Mexico[J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 1988, 83: 1642–1646.
- [26] Nieto–Samaniego Á F, Ferrari L, Alaniz–Álvarez S A, et al. Variation of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico[J]. Geological Society of America Bulletin, 1999, 111: 347–363.
- [27] Ferrari L, López–Martínez M, Rosas–Elguera J. Ignimbrite flareup and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico—implications for the late subduction history of the Farallon Plate[J]. Tectonics, 2002, 21: 1029.
- [28] Ferrari L. Miocene shearing along the northern boundary of the Jalisco block and the opening of the southern Gulf of California[J]. Geology, 1995, 23: 751–754.
- [29] Magonthier M C. Distinctive rhyolite suites in the mid–Tertiary ignimbritic complex of the Sierra Madre Occidental, western Mexico[J]. Bulletin de la Société Géologique de France, 1988, 8(4): 57–68.
- [30] Tuta Z, Sutter J H, Kesler S E, et al. Geochronology of mercury, tin, and fluorite mineralization in northern Mexico[J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 1988, 83: 1931–1942.
- [31] Ponce B, Clark K. The Zacatecas mining district—a Tertiary caldera complex associated with precious and base metal mineralization[J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 1988, 83: 1668–1682.
- [32] Webber K L, Fernández L A, Simmons W B. Geochemistry and mineralogy of the Eocene–Oligocene volcanic sequence, southern Sierra Madre Occidental, Juchipila, Zacatecas, Mexico[J]. Geofísica Internacional, 1994, 33: 77–89.
- [33] Cochemé J J, Demant A. Geology of the Yécora area, northern Sierra Madre Occidental, Mexico[C]//Pérez–Segura E, Jacques–Ayala C. Studies of Sonoran Geology. Geological Society of America Special Paper, 1991, 254: 81–94.
- [34] Wark D A, Kempter K A, McDowell F W. Evolution of waning, subduction–related magmatism, northern Sierra Madre Occidental, Mexico[J]. Geological Society of America Bulletin, 1990, 102: 1555–1564.
- [35] Lanphere M A, Cameron K L, Cameron M. Sr isotopic geochemistry of voluminous rhyolitic ignimbrites and related rocks, Batopilas area, western Mexico[J]. Nature, 1980, 286: 594–596.
- [36] Clark K F, Damon P E, Shafi quillah M, et al. Sección geológica–estructural a través de la parte sur de la Sierra Madre Occidental, entre Fresnillo y la costa de Nayarit[J]. Asociación Ingenierosde

- Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Memoria Técnica, 1981, XIV: 69–99.
- [37]Scheubel F R, Clark K F, Porter E W. Geology, tectonic environment, structural controls in the San Martin de Bolaños District, Jalisco[J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 1988, 8: 1703–1720.
- [38]Gastil R G, Krummenacher D, Minch J. The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California[J]. Geological Society of America Bulletin, 1979, 90: 839–857.
- [39]Damon P E, Nieto–Obregón J, Delgado–Argote L. Un plegamiento neogénico en Nayarit y Jalisco y evolución geomórfica del Río Grande de Santiago: Asociación Ingenieros de Minas[J]. Metalurgistas y Geólogos de México, Memoria Técnica, 1979, X II: 156–191.
- [40]Scheubel F R, Clark K F, Porter E W. Geology, tectonic environment, structural controls in the San Martin de Bolaños District, Jalisco[J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 1988, 83: 1703–1720.
- [41]Vidal–Solano J R, Paz–Moreno F A, Iriondo A, et al. Middle Miocene peralkaline ignimbrites in the Hermosillo region (Sonora, México): Geodynamic implications[J]. Comptes Rendus Geosciences, 2005, 337: 1421–1430.
- [42]Camprubi A. Tectonic and metallogenic history of Mexico[J]. Society of Economic Geologists, 2013, 17: 201–243.
- [43]Centeno–García E, Busby C, Busby M, et al. Evolution of the Guerrero composite terrane along the Mexican margin, from extensional fringing arc to contractional continental arc[J]. Geological Society of America Bulletin, 2011, 123: 1776–1797.
- [44]Ortiz–Hernández L E, Escamilla–Casas J C, Flores–Castro K, et al. Características geológicas y potencial metalogénico de los principales complejos ultramáficos–máficos de México[J]. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 2006, 57: 161–181.
- [45]Valencia–Moreno M, Ochoa–Landín L, Noguez–Alcántara B, et al. Geological and metallogenetic characteristics of the porphyry copper deposits of México and their situation in the world context[J]. Geological Society of America Special Paper, 2007, 422: 433–458.