

东南亚地区重要矿床地质特征及找矿潜力

陈喜峰, 叶锦华, 向运川, 陈秀法

CHEN Xifeng, YE Jinhua, XIANG Yunchuan, CHEN Xiufa

中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

摘要:东南亚地区矿产资源十分丰富,特别是铜、镍、铬、钾盐、铝土矿等矿产资源与中国有较强的互补性,受到中国地质学家和矿业界的广泛关注。东南亚地区总体矿产勘查、开发程度低,随着东南亚地区经济的快速发展和找矿技术方法的提高,该地区一大批新矿床的发现和一系列新矿山的陆续建成投产必将为全球经济发展和进步注入新的活力。通过对东南亚地区产出的大型-超大型或代表性重要矿床地质特征和分布规律进行总结,对其产出环境和找矿潜力进行讨论,旨在为中国地质学家、矿业企业了解该地区重要矿床的地质特征、时空分布规律、找矿潜力和找矿模型提供有益信息,为中国地勘单位和矿业企业“走出去”,在东南亚地区开展综合性找矿评价提供参考依据,同时也为在中国西南三江成矿带开展勘查找矿工作提供对比依据。

关键词:重要矿床;地质特征;找矿潜力;东南亚

中图分类号:P61 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)01-0050-16

Chen X F, Ye J H, Xiang Y C, Chen X F. Geological characteristics and exploration potential of the important deposits in Southeast Asia. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(1):50-65

Abstract: The abundant mineral resources in Southeast Asia, especially the tin, copper, nickel, bauxite, chromium and potash resources, have obvious complementarity for China's resources, and hence have aroused much attention among Chinese geologists and mining industries in recent years. Although the exploration and development degree of mineral resources of Southeast Asia is very low, Southeast Asia is likely to be one of the most important metal suppliers and resource bases in the world in the coming years. With the discovery of several world-class mineral deposits, the reopening of a number of old mines and the improvement of exploration techniques, the metallogenic studies and mineral exploration have attracted increasing attention among the international mining communities. In carrying out the idea of "two types of mining markets and two kinds of mineral resources" in China, Southeast Asia will be one of the best choices. Although Southeast Asia is still the frontier area for exploration and mining, the present activity of exploration is very promising. For the purpose of clear understanding of the crust evolution and regional metallogeny, this paper has summarized the geological characteristics and temporal - spatial distribution regularities. Meanwhile, the geological setting, ore - forming processes and exploration potential have also been discussed. The purpose of this study is to fill the knowledge gap of our understanding of the metallogeny of Southeast Asia. To better find new mineral deposits in Southeast Asia, we should conduct more detailed researches both on regional metallogeny and on individual mineral deposits.

Key words: important deposit; geological characteristics; exploration potential; Southeast Asia

东南亚是指南纬 10°~北纬 28°、东经 92.3°~141.5°范围内的地区,具体包括缅甸、泰国、老挝、越南、柬埔寨、马来西亚、新加坡、文莱、印度尼西亚

(以下简称印尼)、东帝汶和菲律宾 11 个国家,总面积约 456.8×10⁴km²,人口约 5.6 亿。

东南亚地区经历了漫长、多期次的构造变动、

收稿日期:2016-04-26;修订日期:2016-05-23

资助项目:中国地质调查局项目《全球重要成矿带成果集成与综合研究》(编号:1212011220912)

作者简介:陈喜峰(1979-),男,博士,高级工程师,从事矿床学研究。E-mail:chen6100117@126.com

沉积作用和强烈的岩浆活动^[1],为矿产资源的形成创造了优越的成矿条件。该地区成矿作用复杂多样,蕴藏着丰富的石油、天然气、铜、铅、锌、铁、铬、锰、锑、金、镍、铝、钾盐、石膏、锡、钨、宝玉石等重要矿产资源。其中,铜、铬、镍、铝土矿、钾盐、锡是东南亚地区在世界上占有重要地位的优势矿产资源。东南亚地区丰富的矿产资源具有矿床(点)多、区域性集中分布、埋藏浅、易开采等特点,但由于历史、经济、基础设施等方面的原因,矿产勘查、开发程度总体较低。近年来,随着东南亚地区经济的快速发展和找矿技术水平的提高,新发现了一些重要的矿床^[2-4],表现出较大的找矿潜力。

从全球巨型成矿带看^[5-6],东南亚地处特提斯成矿域与环太平洋成矿域的交会地区,与中国西南三江(怒江-澜沧江-金沙江)成矿带相接,是中国西南三江成矿带和华南成矿带的向南延伸地区,二者在区域成矿地质条件、成矿特征、构造演化、成矿地质背景等方面具有共同性,同时也存在差异性^[7-16],特别是铜、镍、铬、钾盐、铝土矿等矿产资源与中国有较强的互补性,受到中国地质学家和矿业界的广泛关注。本文对东南亚地区钾盐、铜、铬、锡、铝土矿、镍等矿产的重要矿床的产出环境、地质特征及找矿潜力进行了系统论述,以期为中国地质学家、矿业企业了解该地区重要矿床的地质特征、时空分布规律、找矿潜力和找矿模型提供有益信息,为中国地勘单位和矿业企业“走出去”,在东南亚地区开展综合性找矿评价提供参考依据,同时也为在中国西南三江成矿带开展勘查找矿工作提供对比依据。

1 成矿环境

从全球板块构造看,东南亚地区地处欧亚板块、印度-澳大利亚板块和太平洋板块三大板块的交会地带(图1),在地质历史上发生过多次洋盆开合、多期俯冲碰撞和多个板块的拼接缝合,存在大洋、大陆或先后转换,或同时平行发展的复杂构造演化过程^①,是全球构造最活跃、最复杂的地区之一。东南亚大陆地质构造主要由复杂的地块群、火山岛弧、弧后盆地和板块缝合带组成^[1],现今的东南亚大陆是由西缅地块(West Myanmar)、印支地块(Indochina)、素可泰(Sukhothai)地块、他依(Inthannon)地块、滇缅泰马苏(Sibumasu)地块、苏门答腊分地块、巽他地块及菲律宾海板块和太平洋板块部分

区域拼贴而成的复杂地质体^[1,17,19-20],其中,西缅地块、滇缅泰马苏(Sibumasu)地块及其他地块属于原冈瓦纳超大陆的组成部分,它们于不同的地质历史时期分别从冈瓦纳超大陆西北边缘裂解、向北漂移,同时导致古特提斯洋、中特提斯洋和新特提斯洋的打开^[1],在晚古生代和新生代重新汇聚拼合,形成现今的东南亚大陆。东南亚地区岛弧可划分为东、西2个岛弧带,东岛弧带主体为菲律宾-新几内亚岛弧带,西岛弧带为由缅甸中央岛弧带-苏门答腊-爪哇-加里曼丹-苏拉威西-东帝汶岛等岛屿、岛弧组成的复杂岛弧带,在东、西2个岛弧带产有众多斑岩型铜、金、钼矿床(点)。东南亚地区的盆地主要有呵叻盆地、沙空那空盆地、金边盆地、湄公河盆地及西原玄武岩区,部分盆地中产有成因与沉积作用有关的大型-超大型钾盐矿床和红土型镍、铝土矿矿床。

东南亚地区遭受了海西期、印支期、燕山期等不同时期的构造变动、岩浆活动、变质作用和成矿作用^[21-27],是全球最重要的成矿区带之一,具有特提斯-喜马拉雅成矿域和环太平洋成矿域的双重成矿特征^[28]。从冈瓦纳超大陆裂解到形成东南亚大陆的整个地质历史过程中,各地块间发生了多期次、不同类型的俯冲、弧-陆碰撞和陆-陆碰撞^[19-20],并伴随有强烈的岩浆活动、构造变动和变质作用,在地块的边缘形成了多条矿化褶皱带,如长山褶皱带和黎府褶皱带^[1]。地块在从冈瓦纳超大陆分离→向北漂移→拼贴到欧亚大陆南缘→汇聚拼合形成东南亚大陆的过程中,发生了多期次的弧岩浆作用^[29-31]、弧后盆地打开与闭合^[32-33]和蛇绿岩仰冲^[34-35],增生的岛弧、蛇绿岩带、大型变形带构成了地块群的边界。在某种程度上,这些变形带或褶皱带代表着原来洋盆或构造带的位置。

从冈瓦纳超大陆裂解到形成现今东南亚大陆的整个过程中,东南亚大陆各地块间发生了复杂的、多期次的构造-岩浆活动-变质作用-热液活动,为东南亚地区成矿作用创造了优越的成矿条件,并提供了丰富的成矿物质,形成的矿产资源主要有沉积岩型金矿、造山带型金矿、与斑岩有关的铜(金)矿、热液型矿床(金、银、铜)、潜力巨大的斑岩型铜-金-钼矿床与IOCG(铁氧化物铜金)型矿床^[36-37]、与侵入岩有关的金矿、VMS(火山岩型块状硫化物)型矿床、锡钨矿、稀土矿和宝玉石矿^[1]。

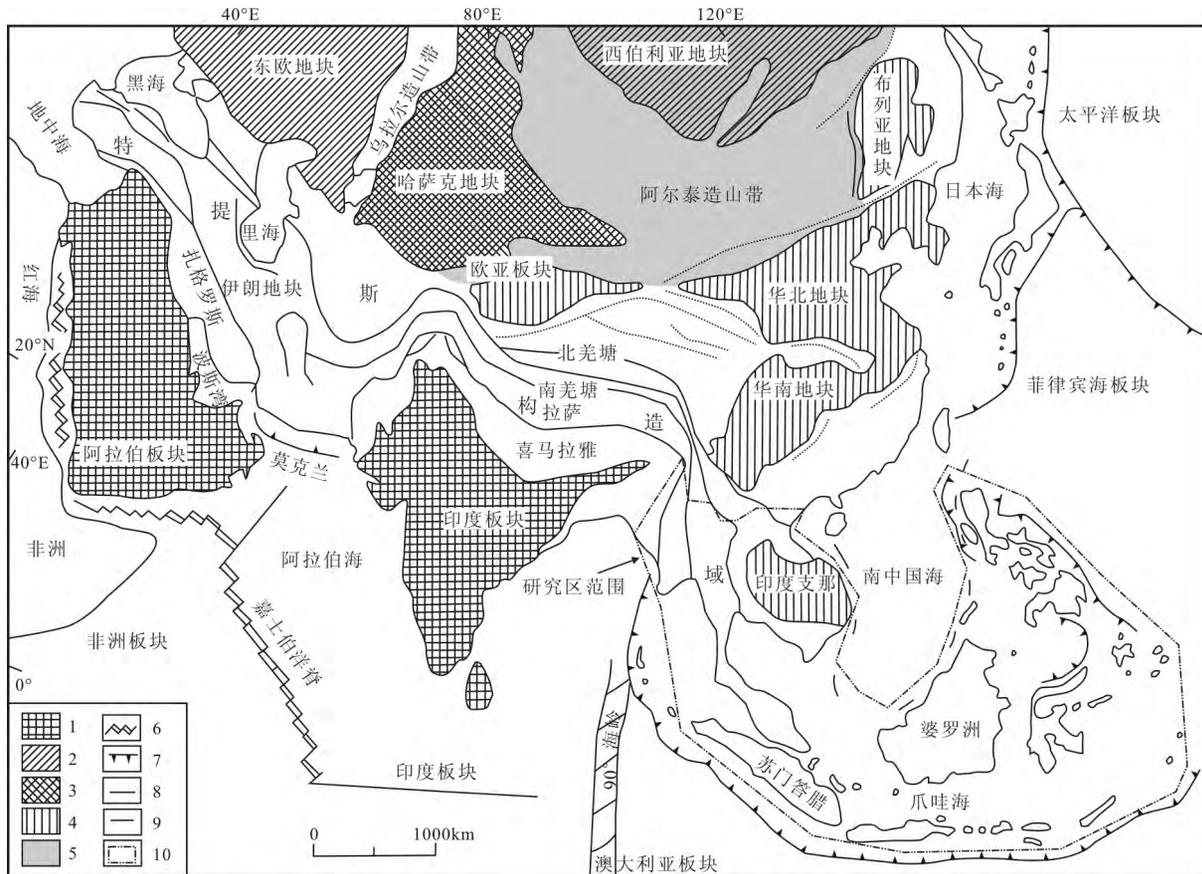


图1 东南亚及邻区大地构造分区图(据参考文献[17-18]修改)

Fig. 1 Geotectonic division of Southeast Asia and its neighboring areas

- 1—前寒武纪冈瓦纳地盾; 2—前寒武纪劳亚地盾; 3—哈萨克地块; 4—晚古生代亚洲增生地块;
- 5—晚古生代阿尔泰造山带; 6—现代洋中脊; 7—现代俯冲带; 8—特提斯成矿域主要缝合带;
- 9—特提斯构造域的其他缝合带; 10—研究区范围

受篇幅所限,本文仅对东南亚大陆的印支(Indochina)地块、西缅(West Myanmar)地块和滇缅泰马苏(Sibumasu)地块三大构造单元的成矿环境进行简要论述。

1.1 印支地块(Indochina Terrane)

印支地块是东南亚大陆内最大的构造单元,与中国华南陆块毗邻,二者以北—北西向延伸的哀牢山—马江缝合带为界。印支地块的次级构造单元主要包括长山褶皱带、黎府褶皱带、大叻—桔井褶皱带和东马来西亚褶皱带,产有丰富的铜、铝土矿、钨锡、钾盐、铬、镍矿产,代表性矿床有泰国的呵叻(Nakhon Ratchasima)大型钾盐矿田和越南南部(South Vietnam)的超大型铝矿田(图2;表1)。

长山褶皱带位于印支地块东北缘,呈北西—南

东向延伸,其东北部以哀牢山—马江构造带为界,西北部以晚三叠世—新生代莫边府断裂为界,西南部以黎府褶皱带为界,南部以晚中生代大叻—桔井褶皱带为界,与越南中部的高变质昆嵩地块以三岐—福山构造带为界。长山褶皱带可能是古特提斯洋的哀牢山—马江分支闭合的产物^[51],该褶皱带内主要发育古生代海相火山岩和早二叠世—三叠纪花岗岩和火山岩。长山褶皱带至少发生了2期陆缘弧岩浆活动:一期是在早二叠世,形成了越南西北部的花岗岩(锆石 U-Pb 年龄 280~270Ma)^[51]和老挝南部的 Sepon 金矿^[52];另一期是在早三叠世(锆石 U-Pb 年龄 250~245Ma)^[51]。长山褶皱带产有丰富的铜、铁、钨锡、金等矿产资源。

黎府褶皱带位于印支地块西缘,在其中部的呵

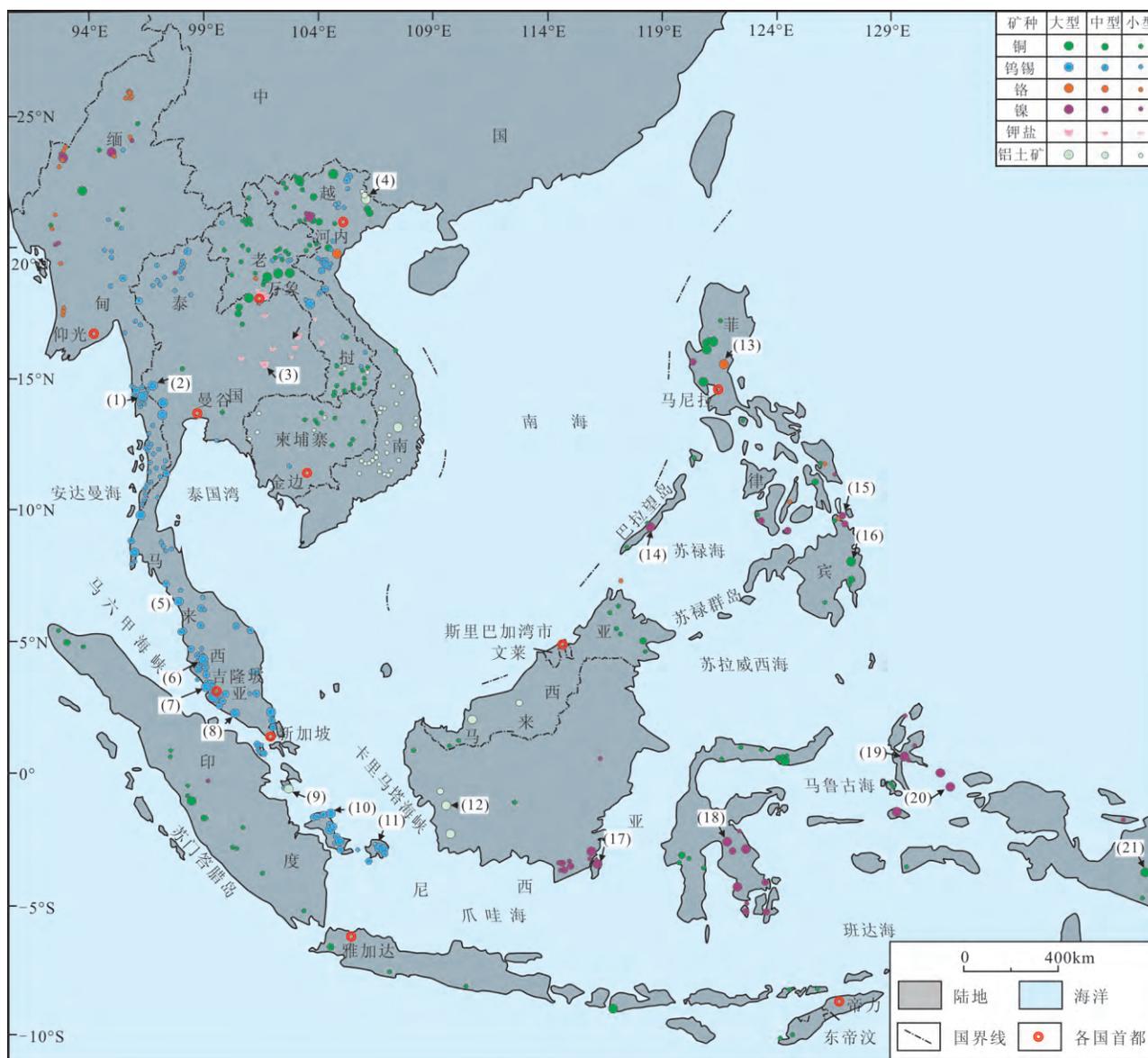


图 2 东南亚主要矿床分布略图(据参考文献[1,7]修改)

Fig. 2 Sketch map showing the distribution of major ore deposits in Southeast Asia

(1)—缅甸赫敏之(Hermyingyi)钨锡矿床;(2)—泰国比劳克(Pilok)钨锡矿床;(3)—泰国呵叻(Nakhon Ratchasima)钾盐矿田;(4)—越南南部(South Vietnam)铝土矿田;(5)—马来西亚卡基武吉(Kakibukit)锡矿床;(6)—马来西亚坚打谷(Kinta Valley)锡矿床;(7)—马来西亚吉隆坡(Kuala Lumpur)锡矿区;(8)—马来西亚克森德(Kesend)锡矿床;(9)—印度尼西亚塔杨(Tayang)铝土矿床;(10)—印度尼西亚邦加岛(Bangka Isl.)锡矿床;(11)—印度尼西亚克拉帕康皮特(Kelapa Kampit)锡矿区;(12)—印度尼西亚西加里曼丹(W.Kalimantan)铝土矿床;(13)—菲律宾阿科杰(Acoje)铬矿田;(14)—菲律宾里奥图巴(Rio Tuba)镍矿床;(15)—菲律宾苏里高(Surigao)镍矿床;(16)—菲律宾坦珀坎(Tampakan)铜矿床;(17)—印度尼西亚普劳塞布库(Pulau Sebuk)镍矿床;(18)—印度尼西亚索罗阿科(Soroako)镍矿床;(19)—印度尼西亚哈马黑拉(Halmahera)镍矿床;(20)—印度尼西亚加格岛(Gag Island)镍矿床;(21)—印度尼西亚格拉斯贝格(Grasberg)铜-金矿床;(22)—老挝普开(Phu Kham)铜-金矿床;(23)—泰国普西普(Puthep)铁-铜(金)矿床;(24)—泰国普隆(Phu Lon)铜-金矿床

叻高原分布巨厚的中生代呵叻红层。该褶皱带发育晚二叠世—三叠纪安山质-流纹质火山岩,最近新发现了泥盆纪-石炭纪、志留纪岩浆岩^[53]。

该褶皱带产有重要的岩浆热液型金矿和与斑岩有关的铜-金矿化,铜-金矿化主要与三叠纪黎府花岗岩有关^[54]。

大叻-桔井褶皱带从柬埔寨一直延伸至越南南部,带内主要发育三叠纪-白垩纪沉积岩和岩浆岩。在柬埔寨南部、东部和越南南部分布大量的早侏罗世-白垩纪花岗岩,形成与侵入体有关的金矿化系统,花岗岩内发育大量含金石英-硫化物脉,目前已发现了柬埔寨东部著名的 Okvau 金矿床^[1]。

东马来西亚褶皱带位于东马来半岛,西缘与滇缅泰马苏地块以文冬-劳勿缝合带为界。关于东马来西亚褶皱带的性质、构造背景存在争议, Sone 等^[19]、Barber 等^[55]认为,该褶皱属他依地块和素可泰地块的向南延伸部分,但缺少可靠的地层、岩浆岩和火山岩依据。东马来西亚褶皱带发育大量 I 型花岗岩,这些 I 型花岗岩成岩时代为晚二叠世-三叠纪,其形成与古特提斯洋向东马来西亚褶皱带西缘俯冲有关^[56]。东马来西亚褶皱带蕴藏着世界著名的锡矿资源和重要的造山型金矿。

1.2 滇缅泰马苏地块(Sibumasu Terrane)

滇缅泰马苏地块(部分研究者将滇缅泰马苏地块称为掸泰地块)主要包括泰国西部、马来半岛西部、缅甸东部、苏门答腊岛东北部等地区,其西缘以缅甸西部的实皆断裂和抹谷变质带为界,东邻泰国东部的他依陆块,向北与中国的保山/腾冲地块相连。基于对马来半岛碎屑锆石的研究^[57],滇缅泰马苏地块基底主要为古元古界。最新的研究结果表明^[58],滇缅泰马苏地块晚寒武世-早奥陶世塔如涛砂岩的碎屑锆石与澳大利亚西部奥陶纪 Tumblagooda 砂岩的碎屑锆石具有极相似的特征,中二叠世之前,滇缅泰马苏地块与澳大利亚在地理位上非常接近^[1]。滇缅泰马苏地块产丰富的钨锡、铜、金、锑、铅、锌等多种矿产资源,代表性矿床有缅甸赫敏之(Hermyingyi)大型钨锡矿床、泰国比劳克(Pilok)大型钨锡矿床、马来西亚卡基武吉(Kakibukit)大型锡矿床、马来西亚坚打谷(Kinta Valley)超大型锡矿田和马来西亚克森德(Kesend)大型锡矿床(图2;表1)。

1.3 西缅地块(West Myanmar Terrane)

西缅地块位于抹谷变质带和安达曼-巽他海沟之间,其东界以南北向延伸的实皆断裂为界,西界以印缅山脉活动俯冲带的西缘为界。印缅山脉发育超基性岩、枕状玄武岩、硅质岩、上三叠统复理石岩、白垩系石灰岩。研究表明^[59-60],晚中生代的碰撞

运动或早三叠世的走滑运动是导致缅甸西部与滇缅泰马苏地块拼接的主要原因。安达曼-巽他俯冲带从印度阿萨姆邦,经孟加拉湾北部、缅甸西部,一直延伸到苏门答腊岛的西部,其复杂的俯冲作用最早可能发生在晚白垩世^[61],而且这种俯冲作用一直间歇性地从始新世持续到现在。安达曼-巽他俯冲带在新近纪发生的俯冲作用,形成了缅甸的高林(Kawlin)-文多(Wuntho)-普帕山(Mt Popa)岛弧(中央火山弧带)和苏门答腊火山弧,这2个火山弧都产有重要的斑岩型和热液型金和铜-金-钼矿化。西缅地块代表性矿床有印度尼西亚塔杨(Tayang)超大型铝矿床、印度尼西亚邦加岛(Bangka Isl.)特大型锡矿床和印度尼西亚克拉帕康皮特(Kelapa Kampit)超大型锡矿区(图2;表1)。总体看,印度板块和欧亚板块的俯冲碰撞及产生的挤压作用对西缅地块的新生代构造演化活动产生了强烈的影响^[62]。

2 代表性矿床地质特征

本文针对东南亚地区的钾盐、铜、锡、铝、镍等优势矿产资源,选择代表性矿床,对其矿床地质特征进行简要论述。

2.1 泰国呵叻(Nakhon Ratchasima)大型钾盐矿田

呵叻盆地位于泰国东北部及老挝中部,面积约 $17 \times 10^4 \text{ km}^2$,是东南亚地区最大的含钾盆地,发育于陆块/断块之上,属断陷-坳陷盆地。目前,呵叻钾盐矿田已探明万象、农诺、农波和 Udon Southouse 四个大型钾盐矿床,上述4个矿床钾盐资源储量约 $6.12 \times 10^8 \text{ t}$,KCl 含量 $6.25\% \sim 41.72\%$ ^[40](图2;表1)。

大地构造位置上,呵叻钾盐矿田位于印支地块中南部,处于印支地槽褶皱系南段,其南、西、北东三面分别被北柬埔寨、南乌江和湄公河深大断裂控制。矿田内分布的地层主要为上白垩统马哈沙拉堪组(MahaSarakhm Formation),属一套碎屑岩系和蒸发岩沉积类,是呵叻盆地唯一的含钾岩系,其岩石类型主要有乳白色、淡红色膏岩层(岩盐、光卤石、钾石盐、溢晶石、水氯镁石等)和砖红色、棕红色、紫红色中厚层状粉砂质泥岩、泥质粉砂岩及少量粉砂岩。马哈沙拉堪组可划分为上盐组、中盐组和下盐组3个盐组,钾镁盐主矿体主要产于下盐组中上部,矿体多为单层结构类型,矿体具有累计厚度大、埋藏浅且产状平缓的特点,部分地段在

表 1 东南亚重要矿床地质特征
Table 1 Principal geological characteristics of the major mineral deposits in Southeast Asia

矿床名称	构造背景	主要赋矿围岩或地层	矿体特征	矿石矿物	主要围岩蚀变	规模/品位	矿产储量	类型	文献
1-缅甸赫敏之 (Hermingyi) 钨锡矿床	显生宙造山带	碱长细晶花岗岩体及其围岩接触带	脉状、透镜状、似层状	黑钨矿、锡石、黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿	云英岩化、电气石化、硅化、绿泥石化	锡/大型, WO ₃ 含量 0.276%~0.311%, Sn 含量 0.049%~0.061%	锡大于 4×10 ⁴ t	岩浆热液型	[38]
2-泰国比劳克 (Pilok) 钨锡矿床	显生宙造山带	石炭系一二叠系与白垩纪中粗粒黑云母及二云母花岗岩的接触带	脉状、透镜状、似层状	锡石、黑钨矿	云英岩化、电气石化、绿泥石化	锡/大型, Sn 含量 0.1%~1.2%	锡大于 4×10 ⁴ t	岩浆热液型	[39]
3-泰国呵叻 (Nakhon Ratchasima) 钾盐矿田	显生宙造山带	白垩系泥岩粉砂岩盐层	主要呈层状	光卤石、钾石盐、水氯镁石、溢晶石	—	钾盐/大型, KCl 含量 6.25%~41.72%	氯化钾 6×10 ⁴ t	蒸发岩型	[40]
4-越南南部 (South Vietnam) 铝矿田	新生代风化壳	古近系—第四系红土风化壳	层状、似层状、透镜状	三水铝石、针铁矿、赤铁矿	高岭土化	铝/超大型, Al ₂ O ₃ 含量 38.6%~53.23%	铝土矿 8.5 亿 t	红土型	[5]
5-马来西亚卡基武吉 (Kakibukit) 锡矿床	新生代风化壳	第四系冲积-残坡积层	不规则囊状	锡石、钛铁矿	绿泥石化	锡/大型, Sn 含量 0.01%~0.2%	锡 20×10 ⁴ t	砂矿型	[41]
6-马来西亚坚打谷 (Kinta Valley) 锡矿田	新生代风化壳	第四系冲积-残坡积层	似层状、不规则状	锡石、钛铁矿、独居石、磷钇矿	云英岩化、绿泥石化	锡/超大型, Sn 含量 0.05%~0.1%	锡 50×10 ⁴ t	砂矿型	[41]
7-马来西亚吉隆坡 (Kuala Lumpur) 锡矿区	新生代风化壳	第四系冲积-残坡积层	似层状、透镜状	锡石、独居石、磷钇矿	云英岩化、电气石化、绿泥石化	锡/大型, Sn 含量 0.008%~0.1%	锡 20×10 ⁴ t	砂矿型	[41]
8-马来西亚克森德 (Kesend) 锡矿床	新生代风化壳	第四系冲积层	似层状、不规则状	锡石、黑钨矿、钛铁矿	云英岩化、绿泥石化	锡/大型, Sn 含量 0.1%~0.2%	锡 20×10 ⁴ t	砂矿型	[41]
9-印度尼西亚塔扬 (Tayang) 铝矿区	新生代风化壳	古近系—第四系红土风化壳	层状、似层状、透镜状	三水铝石、赤铁矿、针铁矿、高岭石	高岭土化	铝/超大型, Al ₂ O ₃ 含量 38%~43%	铝土矿 15.3×10 ⁴ t	红土型	[42]
10-印度尼西亚邦加岛 (Bangka Isl.) 锡矿床	新生代风化壳	古近系—第四系冲积-残坡积层	似层状、不规则状	锡石、黑钨矿、黄铁矿、钛铁矿	云英岩化、绿泥石化	特大型, Sn 含量 0.1%~0.5%	锡 150×10 ⁴ t	砂矿型	[43]
11-印度尼西亚克拉帕康皮特 (Kelapa Kampit) 锡矿区	新生代风化壳	古近系—第四系冲积-残坡积层	似层状	锡石、磁铁矿、黄铁矿	云英岩化、黄铁矿化、绿泥石化	锡/超大型, Sn 含量 1%~2%	锡 65×10 ⁴ t	砂矿型	[44]
12-印度尼西亚西加里曼丹 (W.Kalimantan) 铝矿区	新生代风化壳	古近系—第四系红土风化壳	似层状、条带状、不规则状	三水铝石	高岭土化	铝/超大型, Al ₂ O ₃ 含量 38.6%	铝土矿 20×10 ⁴ t	红土型	[5]

续表1

矿床名称	构造背景	主要赋矿围岩或地层	矿体特征	矿石矿物	主要围岩蚀变	规模/品位	矿产储量	类型	文献
13-菲律宾阿科杰(Acoje)铬矿田	显生宙造山带	纯橄橄榄岩、斜辉橄橄榄岩	条带状、似脉状及不规则状	铬尖晶石	蛇纹石化	铬/大型, Cr ₂ O ₃ 含量20%	铬矿石 2520×10 ⁴ t	蛇绿岩型	[45]
14-菲律宾里奥图巴(Rio Tuba)镍矿床	新生代风化壳	古近系—新近系红土风化壳	似层状、不规则状	针铁矿、针铁矿、镍蛇纹石、镍蒙脱石	蛇纹石化	镍/大型, 镍含量1.5%~2.35%	镍 234×10 ⁴ t	红土型	[46]
15-菲律宾苏里高(Surigao)镍矿床	新生代风化壳	古近系—新近系红土风化壳	似层状透镜状、不规则状	针铁矿、赤铁矿、镍蛇纹石、镍蒙脱石	蛇纹石化	镍/大型, 镍含量0.78%~1.1%	镍 500×10 ⁴ t	红土型	[42]
16-菲律宾坦珀坎(Tampakan)铜矿床	显生宙造山带	古近系—新近系闪长玢岩	似层状、层状、透镜状	黄铜矿、辉铜矿、赤铜矿、硫砷铜矿	硅化、钾化、绿泥石化	铜/大型, 铜0.75%	铜 1200×10 ⁴ t	斑岩型	[47]
17-印度尼西亚普劳塞布库(Pulau Sebuk)镍矿床	新生代风化壳	第四系红土风化壳	不规则、似层状	镍褐铁矿、针铁矿、赤铁矿、镍蛇纹石	蛇纹石化	镍/大型, 镍含量0.66%	镍 198×10 ⁴ t	红土型	[42]
18-印度尼西亚索罗阿科(Soroako)镍矿床	新生代风化壳	第四系红土风化壳	不规则状、透镜状	针铁矿、镍蛇纹石	蛇纹石化	镍/大型, 镍含量1.8%~3.0%	镍 370×10 ⁴ t	红土型	[42]
19-印度尼西亚哈马黑拉(Halmahera)镍矿床	新生代风化壳	第四系红土风化壳	不规则状、透镜状	针铁矿、镍蛇纹石、镍蒙脱石	蛇纹石化	镍/大型, 镍含量1.37%	镍 279×10 ⁴ t	红土型	[48]
20-印度尼西亚加格岛(Gag Island)镍矿床	新生代风化壳	第四系红土风化壳	不规则状、似层状	针铁矿、镍蛇纹石、赤铁矿	蛇纹石化	镍/大型, 镍含量1.51%	镍 395.6×10 ⁴ t	红土型	[49]
21-印度尼西亚格拉斯贝格(Grasberg)铜-金矿床	印支-新西兰造山带	石英—二长斑岩	透镜状、似层状、层状	黄铜矿、斑铜矿、兰辉铜矿、磁铁矿、黄铁矿、自然金	钾化、磁铁矿化、阳起石化、绢云母化	铜-金/超大型, 铜含量1.2%, 金含量1.04g/t	铜 2761×10 ⁴ t, 金 2610t	斑岩型-砂卡岩型	[50]
22-老挝普开(Phu Kham)铜-金矿床	长山褶皱带	石炭系—下二叠统石灰岩、粉砂岩	透镜状、似层状、层状	黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、斑铜矿、方铅矿、闪锌矿、自然金	石榴子石化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化	铜-金/大型, 铜含量0.55%, 金含量0.24g/t	铜 132×10 ⁴ t, 金 57.6t	砂卡岩型	[1]
23-泰国普西普(Puthep)铁-铜(金)矿床	黎府褶皱带	石炭系石灰岩	透镜状、似层状、层状	黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿	石榴子石化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化	铁-铜(金)/中型, 铜含量0.4%	铜 48×10 ⁴ t	砂卡岩型	[1]
24-泰国普隆(Phu Lon)铜-金矿床	黎府褶皱带	泥盆系石灰岩	透镜状、似层状、层状	黄铜矿、磁铁矿、黄铁矿、斑铜矿、自然金	石榴子石化、透闪石化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化	铜-金/中型, 铜含量2.4%, 金含量0.64g/t	铜 13×10 ⁴ t	砂卡岩型	[1]

钾镁盐矿体的顶部或中部夹有一至数层石盐岩, 钾镁盐矿体的顶部可见到钾镁盐矿层与石盐岩薄层互层, 钾镁盐矿体厚度 0.75~85.72m, KCl 含量 6.25%~41.72%。

矿石类型简单, 属氯化物型钾镁盐矿, 以光卤

石矿石为主, 其次为含钾石盐光卤石矿石。盐类矿物主要有光卤石、钾石盐、水氯镁石、溢晶石、石盐, 偶见方硼石、白硼钙石、硬石膏和石膏。

矿田钾盐沉积特征如下: ①蒸发岩盐类沉积以大量氯化物为主, 沉积厚度、分布面积均远超过硫

酸盐类的分布;②蒸发盐类矿物出现大量溢晶石矿物,溢晶石是一种极易溶的盐类矿物,而非正常海水蒸发的产物;③缺少正常海相沉积的碳酸盐,缺少 $MgSO_4$ 盐矿物,硬石膏层很薄;④盐类矿物中明显含有Cu、Mn、Sn、Fe、Ti、V等重金属元素,并出现少量硼酸盐矿物;⑤钾镁矿层只赋存于含盐建造下盐组的中上部,而中、上盐组无钾镁矿层分布。

目前,该矿田的成盐时代被认为是晚白垩世^[40],但关于该矿区蒸发岩的起源与沉积环境、成盐物质来源和运移,以及溢晶石的成因等问题还存在争议^[63-65]。综合现有研究资料认为,该矿田的成矿模式大致为:晚二叠世之前,现在的呵叻盆地地区处于中生代地槽发展的前期阶段,受晚海西运动的影响,地槽回返上升、遭受剥蚀,海水旋进旋退,沉积了上三叠统,并整合于二叠系之上;早侏罗世—白垩纪,受地壳升降运动的影响,形成了受深断裂控制、构造封闭条件良好的大型呵叻坳陷盆地,此时,呵叻坳陷盆地发育中生代时期形成的红色碎屑岩沉积物,并逐步演变成大面积的滨海浅水盐湖—干盐湖环境,在晚白垩世持续干旱气候条件下,形成巨厚蒸发岩矿床。

2.2 印尼格拉斯贝格(Grasberg)超大型铜—金矿床

格拉斯贝格铜金矿床位于印尼伊里安查亚省中部的中央山脉,是全球储量最大的单体金矿、亚洲最大的铜矿和世界十大铜矿之一。格拉斯贝格铜—金矿区海拔3500~4500m,该矿床勘探于1988年,1990年1月建成投产,其Cu、Au、Ag等主要成矿元素的金属储量分别为 2761×10^4 t、2610t和8862.28t,对应的平均品位分别为1.2%、1.04g/t和3.8g/t^[66](图2;表1)。

大地构造位置上,该矿床处于伊里安查亚大陆边缘弧,矿区分布地层主要有白垩系肯贝蓝甘(Kembelangan)组(有石英砂岩、钙质岩石和黑色页岩)、古近系—新近系新几内亚灰岩群、始新统福梅(Faumi)组(砂岩、泥质白云岩、砂质泥质白云岩、石英岩和赤铁矿化砂岩)和渐新统艾诺德(Ainod)组(主要为灰岩)。该矿床的所有矿体都赋存于格拉斯贝格侵入杂岩体内,格拉斯贝格侵入杂岩体面积 3km^2 ,呈圆形岩株、岩筒或岩脉(墙)产出,并发育隐爆角砾岩筒。格拉斯贝格杂岩体侵位于白垩系肯贝蓝甘群和古近系新几内亚灰岩群中,成岩过程可划分为3期岩浆活动,分别形成达兰侵入体、主格拉

斯贝格侵入体和卡里侵入体^[50]。该杂岩体的岩石类型主要有中粒斑状石英二长角砾岩、中—粗粒斑状石英二长岩和粗粒斑状石英二长岩。格拉斯贝格杂岩体的成岩年龄为3.33~3.01Ma,成矿年龄为3.06~3.01Ma^[50]。该矿床铜、金矿体赋存于格拉斯贝格杂岩体及其与围岩的接触带中,矿化从格拉斯贝格杂岩体中心向外具有分带性:岩体中心钼(铜)→铜(钼)→接触带(铜铅锌)→围岩铅锌铜金→铅锌银,角砾岩筒是矿化中心,深部呈狭长状、酒瓶状。矿化类型主要有网脉状矿化和浸染状矿化2种,以网脉状矿化为主。矿石矿物有黄铜矿、斑铜矿、蓝辉铜矿、辉铜矿、黝铜矿、自然金、硫砷铜矿、辉钼矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、孔雀石、蓝铜矿、赤铜矿、自然铜等。脉石矿物有石英、方解石、萤石、阳起石、黑云母、绿泥石、高岭石、蒙脱石、绿帘石、石榴子石、绢云母、沸石、硬石膏等。

矿区围岩蚀变强烈,蚀变围绕斑岩体成环状或半环状分布,具明显的水平分带(从内到外):钾化带→绢英带→泥化带→青磐岩化带。其中,钾化带主要为钾长石、绢云母,次为高温黑云母,绢英带为石英、绢云母、黄铁矿,泥化带为伊利石、蒙脱石、高岭石,青磐岩带为绿泥石、绿帘石、方解石。此外,还有磁铁矿化、阳起石化、泥化、硅化等蚀变。

卢焕章^[67]对格拉斯贝格矿床的铜、金网状矿脉、钾化蚀变带和石英二长岩的包裹体进行的系统研究表明,格拉斯贝格铜—金矿床的成矿流体属高盐度、高温和高成矿金属浓度的岩浆流体,格拉斯贝格杂岩体的母岩浆属基性岩浆,基性岩浆为该矿床的铜—金成矿系统提供了流体、金属成矿元素及硫,最终形成格拉斯贝格超大型斑岩型—矽卡岩型复合型铜金矿床。

2.3 马来西亚坚打谷(Kinta Valley)超大型锡矿田

坚打谷锡矿田是马来西亚锡矿带上最大的锡矿田,也是最著名的古老锡矿田。目前,该锡矿田分布有下霹雳(Lower Perak)、卡蒙延(Kamunting)、庞卡伦(Pongkalen)、端洛(Tronoh)、坚打谷(Kinta Valley)、克拉玛特(Kramat)、南方联合矿(Austra Amalganatot)、南坚打(Southern kinta)、马来央(Malayan Tin)、务边(Gopeng)和瓜拉坎帕尔(Kuala Kampar)10多个锡矿床。坚打谷锡矿田从1876年开始投产,至今共产锡金属逾 130×10^4 t,目前保有锡储量至少 50×10^4 t,约占马来西亚锡储量的40%,绝大

部分为砂矿,原生矿储量不多,Sn含量0.05%~0.1%(图2;表1)。

大地构造位置上,该锡矿田地处于新生代盆地,矿田南北长48km、东西宽5~25km,含锡冲积层厚5~30m。该矿田锡矿床的成矿时代基本为新生代。砂矿型锡矿体主要产于冲积、坡积、残积层中,呈似层状或不规则状产出。矿石矿物以锡石为主,并伴生有钛铁矿、独居石、磷钇矿等,其中锡石主要来源于风化的含锡花岗岩和印支期花岗岩与志留纪—二叠纪陆源碎屑岩及碳酸盐岩的内外接触带附近的锡石—石英脉。目前,高品位矿石已采完,现采矿石含Sn 0.005%~0.10%,主要采用挖掘船和砂砾泵进行开采。用重选和磁选法选矿,回收率90%左右,年产锡占马来西亚锡产量的30%,约占国外锡产量的10%^[41]。

2.4 缅甸赫敏之(Hermyingyi)大型钨锡矿床

赫敏之大型锡钨矿位于缅甸土瓦东北约40km处,毗邻泰缅边界的泰国比劳克(Pilok)大型钨锡矿床,为缅甸重要的钨锡矿之一。目前已有40余条矿脉被开采完,最高产时,每年产钨锡混合精矿600~1000t,近年年产量仅100t左右,锡储量约 4×10^4 t,WO₃含量0.276%~0.311%、Sn含量0.049%~0.061%^[38](图2;表1)。

大地构造位置上,该矿床地处腾冲—抹谷—拉廊岩浆弧中段,矿区出露地层主要为石炭系浅变质碎屑岩系,岩石类型有泥质板岩、粉砂质板岩及少量石英岩。矿区钨锡矿化主要与古近纪碱长细晶花岗岩体关系密切,古近纪碱长细晶花岗岩呈岩株状产出,其Rb—Sr等时线年龄为 59.5 ± 2 Ma^[68]。矿区矿化受近南北向断裂系统的控制,矿化主要呈浸染状、网状脉、脉状,含矿石英脉主要分布于长1400m、宽550m、呈北北西向分布的古近纪碱长细晶花岗岩体及其接触带中,含矿石英脉约有200余条,个体长400~600m,厚2m以上,其中主要矿脉40余条。矿脉主要分布在细晶花岗岩体顶部,部分产于接触带围岩中,前者矿化组合为锡石—黑钨矿—石英脉型,后者为锡石—黑钨矿—云英岩型。矿脉中的黑钨矿化不连续,锡石在云英岩中呈细小的晶体分布。矿石矿物主要有黑钨矿、锡石,次为黄铁矿、闪锌矿和黄铜矿,含少量磁黄铁矿、黄锡矿、辉钼矿、辉铋矿和白钨矿;脉石矿物主要有石英、白云母、电气石、绿柱石、磷灰石等。矿石WO₃: Sn=4.52: 1~6.35: 1^[38]。

Lehmann^[69]认为,缅甸赫敏之钨锡矿化是分异程度最高的晚期岩浆的产物,且这些晚期岩体相对于早期岩体在锡含量上偏低,与锡成矿呈现出元素互补的趋势,部分晚期岩体甚至具有岩浆—热液过渡成因性质,属岩浆—热液型钨锡矿床。

2.5 越南南部超大型铝土矿田

越南红土型铝土矿集中分布在越南南方西原高原地区,主要分布在多农(Dac Nong)、林同(Lam Dong)、嘉莱(Gia Lai)和昆嵩(Kontum)4个省。目前,越南南部红土型铝土矿田已发现数十个矿床,其中大型规模矿床有11个。初步探明或控制的铝土矿储量为 8.5×10^8 t,资源量近 70×10^8 t。其中,以胡志明市北200km的达农—富隆地区的铝土矿矿床分布最集中,产有6个大型铝土矿床,估算其资源量高达 27×10^8 t左右,Al₂O₃含量38.6%~53.23%(图2;表1)。越南南部红土型铝土矿需经洗矿后利用其净矿石,地质勘查程度较高,已进入规模化开采阶段。

大地构造位置上,该矿田地处于越南南部西原高原,西原高原地区分布有覆盖面积达21000km²的新生代高原玄武岩,该矿田铝土矿床的形成与这些玄武岩的风化作用有关。铝土矿主要分布在上新世—更新世拉斑玄武岩的风化壳中。赋存铝土矿体的上新世—更新世玄武岩风化壳层序分带自上而下为:①表土层(红土带):呈灰褐色、红色,为由红土角砾、砾石和腐植物组成的红土壤,含少量三水铝石;②铝土矿层:由红土结核、岩屑、岩块的褐红土壤构成,结核自上向下逐渐减少,厚1.0~1.5m,局部达60m。此带的主要组成矿物为三水铝石、针铁矿和高岭石及少量粘土矿物;③腐泥土层:由多色粘土矿物,如高岭石组成,其余有针铁矿、石英、三水铝石等,厚2~3m,此带普遍存在玄武岩的残块;④母岩层:未受风化的新鲜状玄武岩体。矿体分布于山脊、残丘的宽缓地带及缓坡上,矿体平面形态受地形控制,呈不规则状、港湾状、条带状,矿体剖面形态主要呈似层状、层状、透镜状,产状与所处地形坡向、坡度基本一致。矿石Al₂O₃含量为38.6%~55.3%。矿石矿物主要为三水铝石、针铁矿和赤铁矿,脉石矿物主要为高岭石和石英。矿石结构主要有结晶结构、豆鲕结构、泥状结构和胶状结构,矿石构造有块状构造、结核状构造、片状构造和粒状构造。西原高原广泛分布的风化玄武岩为铝土矿的成矿提供了丰富的成矿物质来源,在风

化作用和沉积作用下,形成了越南南部超大型红土型铝土矿田。

2.6 印尼塔扬(Tayan)大型铝土矿床

西加里曼丹红土型超大型铝土矿带为印尼重要的铝土矿带之一^[70],该带铝土矿由被切割、抬升的准平原的原地风化作用形成,塔扬铝土矿为该铝土矿带内最大的铝土矿床,铝土矿储量 $15.3 \times 10^8 \text{t}$, Al_2O_3 含量为 38%~43%^[42](图2;表1)。

大地构造位置上,该矿床地处苏门答腊-爪哇-加里曼丹岛弧带,矿体主要产于富长石的中酸性-基性岩、长石砂岩、片麻岩等风化壳中,赋存铝土矿体的风化壳层序分带自上而下为:①土壤层(覆盖层):主要由黄色、棕色-深红色和红棕色粘土及粉砂质粘土组成,厚 0~2m,最厚达 5m,土状,上部含大量腐殖质,下部有零星分布的三水铝石结核;②铝土矿层:红褐色、黄褐色含粘土质铝土矿带,矿体呈层状、似层状、透镜状,厚 0.5~7m,平均厚 3.6m,局部厚达 9m,矿石构造以结核状构造为主,具有明显的 2 个分带:一是上部结核带,粘土中含 20%~40%的三水铝石结核,大小为 0.3~10cm,片状、葡萄状、圆筒状和不规则状,具圆形凸起表面者为富矿,结核呈浅灰色、淡红色、砖红色和深棕色;二是下部矿层带,由形状不规则的铝质红土砾石和块矿组成,红土发育三水铝石假晶及铁锰矿物风化残余物;③腐泥土层:黄褐色、红褐色粘土、粉砂质粘土层,厚 0.5~21m,主要矿物为高岭石、针铁矿和石英;④母岩:主要为未风化的富含长石的中酸性-基性岩、长石砂岩、片麻岩等。矿体主要产于低小山丘上,山丘顶部铝土矿相对富集,矿体近于水平或缓倾斜,厚 2~5m。铝土矿单个矿体储量 $12.5 \times 10^4 \sim 2200 \times 10^8 \text{t}$ 不等。矿顶埋深 0~2m,底埋深 2.5~7.0m。矿石 Al_2O_3 含量为 38.6%~43%。矿石矿物主要为结核状、豆状三水铝石,次为赤铁矿、针铁矿;脉石矿物主要为高岭石。该铝土矿床是由中酸性-基性铝硅酸盐岩(辉长岩、橄榄辉长岩、苏长岩、辉石、闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩、石英二长闪长岩、二长辉长岩、长英质火山岩等)、长石砂岩、片麻岩等经风化作用、沉积作用形成的红土型铝土矿床,成矿时代为第四纪。

2.7 菲律宾里奥图巴(Rio Tuba)大型镍矿床

菲律宾里奥图巴镍矿床位于巴拉望岛南西部 260km,是菲律宾著名的红土型矿床之一,隶属于

Philnico 矿业公司,该矿床于 1977 年建成投产,至今共产镍金属量 $50 \times 10^8 \text{t}$,镍储量 $234 \times 10^8 \text{t}$,Ni 含量 1.5%~2.35%^[46](图2;表1)。

大地构造位置上,该矿床地处巴拉望白垩世的超镁铁质岩地段,镍矿体主要赋存在超基性岩红土风化壳内,超基性岩的原地风化作用导致红土风化壳中镍的次生富集成矿,成矿母岩主要是纯橄榄岩和方辉橄榄岩,岩浆期后蛇纹石化通常使部分橄榄石发生转变,也使部分辉石发生弱的变化,形成蛇纹石和磁铁矿。原岩中 Ni 含量通常为 0.1%~0.2%,红土化过程中,镁橄榄石中 Ni 含量可达 0.3%~0.45%。如果残积相中的全部残留下来, Ni 含量将提高 6.6~11 倍,而形成镍矿床。镍矿的分布受控于超基性岩红土风化壳的空间分布。矿体呈矿巢状、似层状和不规则状。矿区赋矿风化壳自上而下可划分为 3 个带:①残余红土带:在残余红土带中又包括 2 个不同的矿化层,褐铁矿化层:即铁帽与结核状铁氧化物层,也称铁质层,其中上部由褐色、褐红色蜂窝状、块状、皮壳状、胶状褐铁矿团块组成,厚 3~5cm,下部见结核状铁质氧化物,主要矿物有针铁矿、赤铁矿及少量次生石英、高岭土等。该层与下部的红土层多呈渐变过渡, Ni 平均含量为 1.03%;疏松红土层:由紫红色疏松粘土组成,其性脆呈土状,由强烈的完全风化的橄榄岩形成。主要矿物为蛇纹石、橄榄石,少量褐铁矿、针铁矿等,厚 1~6m,平均 3.60m,最厚达 10.4m,与上覆的褐铁矿层及下伏的硅镁镍矿层之间的界线为渐变或突变。该层 Ni 含量在 0.566%~2.58%之间;②蚀变橄榄岩带和镍富集带(又称硅镁镍矿层):由黄绿色半风化、弱风化的土块状、碎块状、块状蛇纹石化橄榄岩组成。上部风化程度较高,以土块状为主,间夹团块状蛇纹石化橄榄石,沿裂隙或节理多见翠绿色镍硅化物,向下逐渐变为碎块状、块状,岩石的硬度逐渐增加,沿节理或裂隙多见网格状次生石英细脉、翠绿色镍硅化物和褐黑色铁质薄膜,为主要的含矿层位。该层厚度一般为 2~6m,最厚大于 17.5m,与上覆粘土层及下伏的基岩之间的过渡特征较明显,为主要的含矿层位。该层 Ni 含量为 0.305%~3.32%;③母岩层:原生橄榄岩,主要由褐色、暗绿色、灰绿色块状弱蛇纹石化橄榄岩组成。岩石中的主要矿物有蛇纹石、蒙脱石及少量的辉石残余物、橄榄石等。该层 Ni 含量一般在 0.16%~1.24%之间。风化壳各层中均有不

同程度的镍矿化,在从褐铁矿化层到红土层,再到硅镁岩层的转变过程中,镍逐步富集,硅镁层Ni含量大于1.4%,为富镍矿层位。红土中镍主要赋存在纯镍硅酸盐、镍蒙脱石或镍蛇纹石。矿石结构主要有中粗粒结构、假象结构、碎裂结构和交代网格结构,矿石构造主要有土状、土块状、致密块状及胶状构造。矿石矿物主要有针铁矿、磁铁矿、赤铁矿、磁赤铁矿、褐铁矿、蛇纹石、蒙脱石、硅镁镍矿、针镍矿、滑石和绿泥石。围岩蚀变主要有蛇纹石化、绿泥石化、硅化、镍绿泥石化等,与成矿关系较密切的是蛇纹石化、镍绿泥石化和褐铁矿化。菲律宾里奥图巴镍矿床是在菲律宾独特的气候与自然地理条件下,超镁铁质岩极易发生风化,导致Ni元素进一步富集形成红土型镍矿床。

3 成矿作用与找矿潜力讨论

东南亚地区丰富的矿产资源的形成与区内地块群的构造演化关系密切,在各地块从冈瓦纳大陆边缘裂解→向北漂移→拼贴到欧亚大陆东南缘的过程中,发生了大陆裂解、海底扩张、弧/弧后盆地的形成、碰撞造山等构造变动,伴随有强烈的多期次的岩浆活动、变质变形作用和热液蚀变作用,为研究区内矿产资源的形成创造了优越的成矿条件,为矿床形成奠定了物质基础。上述7个典型矿床仅代表了东南亚地区5种成因类型矿床,即蒸发岩型矿床、斑岩型-矽卡岩型矿床、砂矿型矿床、岩浆-热液型矿床和红土型矿床(表1)。此外,东南亚地区还产有矽卡岩型矿床、热液型矿床、沉积岩容矿型矿床、造山型(金)矿床、与侵入岩有关的金矿床、VMS型矿床、MVT(密西西比型)型矿床、SEDEX(喷流沉积)型矿床、与花岗岩有关的脉状钨锡及稀土矿床、镍-铜-铂族元素矿床、IOCG型矿床、与盆地有关的贱金属矿床、与风化作用有关的稀土矿床及其他类型矿床众多矿床成因类型。其中,分布在缅甸、柬埔寨、马来西亚、菲律宾和印尼的热液型矿床、沉积岩容矿的(金)矿床、斑岩型矿床和与斑岩有关的矽卡岩型矿床拥有巨大的勘探找矿潜力。

与斑岩有关的矽卡岩型矿床主要分布在老挝长山褶皱带、泰国黎府褶皱带和越南中部的三岐-福山构造带,该类型矿床又可细分为2种类型:①氧化性矽卡岩型铜(金)矿床,代表性矿床有老挝北部

的普开(Phu Kham)铜-金矿床、泰国北部的普西普(Puthep)铁-铜(金)矿床和普隆(Phu Lon)铜-金矿床。其中,老挝北部的普开铜-金矿床和泰国北部的普西普铁-铜(金)矿床为长山褶皱带内典型的与斑岩有关的矽卡岩型铜-金矿床,其与矿化有关的斑岩均属埃达克质斑岩,这种埃达克质斑岩形成于晚二叠世(306~304Ma)—中三叠世(244~241Ma)^[71-73]俯冲作用的初始阶段。老挝普开铜金矿床(矿石量227Mt,Cu平均品位0.48%,Au平均品位0.22g/t,Ag平均品位2g/t^[1])矿体赋存于晚石炭世—早二叠世火山碎屑岩系内,火山碎屑岩内发育与矽卡岩型矿化关系密切的埃达克质斑岩侵入体,矿区英安质安山岩的全岩地球化学特征表明,该矿床形成于陆缘弧构造环境,矽卡岩化蚀变带主要分布于埃达克质斑岩体的边部及其附近,矿区最富的原生铜、金矿化主要分布在发育大量后期石英脉和赤铁矿的石榴子石矽卡岩带内,据此推测,进变质石榴子石矽卡岩与该矿区最高品位的铜、金矿化关系密切。此外,在黎府褶皱带还产有法国人矿山(French men Mine)、考沥(Khao Lek)、考帕岩(Khao Phra Ngam)、斑驳冲(Ban bothong)、锡图(Singto)等小型氧化矽卡岩型铁-铜(金)矿床^[1],在长山褶皱带的老挝丰沙湾地区产有康巴通莱(KTL),他曲(Thakhek)、玻尔通(Bohr Thong)等氧化性矽卡岩型铜-金矿床^[1]。综上所述,研究区氧化性矽卡岩型铜(金)矿床在矿物生成序列上,早期矿物主要有进变质石榴子石+辉石组合,晚期矿物主要有退变质的绿泥石、碳酸盐、石英和绿帘石组合;矿石矿物组成主要为黄铜矿和黄铁矿;成矿作用主要与二叠纪—三叠纪偏碱性-钙碱性石英闪长斑岩、闪长斑岩、二长闪长岩斑岩、闪长岩、花岗闪长岩等中-酸性侵入体有关^[1]。该类型矿床在老挝的长山褶皱带、泰国黎府褶皱带和越南中部的三岐-福山构造带具有较大的找矿潜力;②还原性矽卡岩型金(铜)矿床,代表性矿床主要有泰国东北部的普塔华(Phu Thap Fah)金矿床、泰国中部的考帕农普(Khao Phanom Pha)金矿床、西马来半岛的Mengapur铜-铁(金)矿床和缅甸中部的Khe Rin、Nui Kem、Ho Ray-Thac Trang等金矿床^[1],该类型矿床的成矿作用主要与三叠纪花岗闪长岩有关,分布在长山褶皱带和黎府褶皱带。

研究区热液型矿床主要包括2种类型,一种是

分布于泰国黎府褶皱带、老挝长山褶皱带的低温热液型金-银矿床和苏门答腊岛的低温热液型金矿床;另一种是高温热液型铜、铜-金、金矿床。代表性矿床有泰国中部的 Chatree(矿石量 81.7Mt, Au 平均品位 1.18g/t, Ag 平均品位 9g/t)^[1]和 Wang Yai 低温热液型金-银矿床、老挝 Ban Houayxai(东南亚第三大金矿床、Au 平均品位 0.82g/t, Ag 平均品位 7g/t)^[1]和 Long Chieng Track 低温热液型金-银矿床、缅甸中部的蒙育瓦(Monywa)低温高硫酸热液型铜(金)矿床和印尼苏门答腊岛 Martabe 低温高硫酸热液型金-银矿床。研究区热液型矿床主要赋存于早二叠世—晚三叠世和始新世—中新世英安质—安山质火山岩和火山碎屑岩、火山角砾岩中,金、银、铜矿化与火山作用关系密切,找矿潜力大,重点找矿区为黎府褶皱带。

沉积岩容矿/造山金矿在东南亚分布较广泛,代表性矿床有老挝 Sepon 金矿床、越南中部的 Ho Gan 和 Phuoc Son 金矿床、马来半岛 Selinsing 金矿床、泰国 Langu 和 Huai Kham On 金矿床,以及缅甸中部的 Kyaukpahto、Kwinthonze、Modi Taung、Meyon 金矿床。上述金矿床,从未变形/变质的炭质、钙质沉积岩,到高度变形的变质岩中均有产出,重点分布在褶皱带(如长山褶皱带)和构造带内部及其附近,重点找矿区为长山褶皱带。

与盆地有关的贱金属矿床主要分布在滇缅泰马苏地块内,形成了世界级的铅-锌-银成矿带。该成矿带从苏门答腊岛,经马来西亚、缅甸掸邦、泰国北部和老挝西部,一直延伸到中国华南西部地区。代表性 VMS 型矿床主要有缅甸寒武纪—奥陶纪包德温铅锌矿床;马来西亚中部珍妮胡(Tasik Chini)矿床,代表性 MVT 型矿床有老挝石炭纪琅勃拉邦铅锌矿床、苏门答腊岛晚石炭世 Diari/Sopokomil 锌-铅矿床等,在中国的云南和四川省也产有该类型矿床。这种与盆地有关的贱金属矿床的成矿作用主要与早古生代古特提斯洋从冈瓦纳大陆裂解、打开有关,但其产出受古地理环境和古构造环境的约束。

同时,研究区内表生非硫化物矿床和与风化作用有关的稀土矿床也具有较大的找矿潜力。代表性矿床为泰国西部的巴东(Padaeng)大型表生非硫化物锌矿床,矿体赋存在侏罗纪碳酸盐岩内,成矿物质主要来源于风化的、先前形成的 MVT 型矿床。

东南亚地区丰富的铜、铬、镍、铝土矿、钾盐、锡等优势矿产资源找矿潜力大,且具有区域性集中分布的特点(表2):①铜矿、镍矿主要分布在菲律宾、印尼、缅甸和老挝四国,其中,菲律宾和印尼是世界铜矿大国,2015年铜储量分别为 3800×10^4 t和 2800×10^4 t;②铬矿主要分布在菲律宾、缅甸和越南,其中,菲律宾2015年铬储量为 3020×10^4 t;③铝土矿主要分布在越南、印尼和老挝,以越南为主;④锡矿主要分布在马来西亚、印尼、缅甸和泰国,以马来西亚和印尼为主,这2个国家是世界锡矿大国,两国2015年锡储量分别为 100×10^4 t和 80×10^4 t;⑤钾盐主要分布在泰国和老挝,且以泰国为主。东南亚地区优势矿产资源区域性集中分布的特点,有利于规划投资和实施综合性找矿评价工作。综合上述分析,东南亚地区铝土矿、铜、钾盐、镍、铬、钨锡矿的已知资源储量较大,目前矿产勘查、开发程度低,进一步找矿和开发潜力大。

尽管目前东南亚矿产勘查、开发程度总体较低,但随着东南亚各国逐步放宽矿业政策、“东盟国家经济一体化建设”的推进和越南、老挝、柬埔寨、缅甸等欠发达国家经济的快速发展,东南亚地区的矿产勘查开发条件和投资环境将会得到不断的改善,该地区将成为举世瞩目的新兴大型矿产资源市场,将为推动全球经济和社会的发展注入新的活力。

4 结 论

(1)研究区大地构造格局主要由复杂的地块群、火山岛弧、弧后盆地、板块缝合带等元素共同构成,属多元拼贴型复杂大陆块。从西到东,研究区主要地块有西缅地块、滇缅泰马苏(Sibumasu)地块、他依(Inthanon)地块、素可泰(Sukhothai)地块、印支地块、苏门答腊分地块、巽他地块等,其中部分地块为冈瓦纳大陆在显生宙裂解形成的碎块,它们向北漂移,最终汇聚、镶嵌、拼接到欧亚大陆东南缘,形成现今的东南亚大陆格局。

(2)在冈瓦纳大陆裂解→碎块向北漂移→汇聚拼贴到欧亚大陆东南缘→形成现今东南亚大陆的构造演化过程中,发生了大陆裂解、弧/弧后盆地的形成、俯冲碰撞造山事件等构造活动,同时诱发了强烈的岩浆活动、变质作用、构造变形和流体流动,这些地质作用为东南亚地区矿产的成矿作用提供

表2 东南亚地区主要优势矿产资源及其分布
Table 2 The major superiority mineral resources and their distribution in Southeast Asia

矿种	分布的主要国家及其重点矿床	资源量 ^[14]
铜	菲律宾 世界铜矿资源大国,2015铜矿资源量达到3800×10 ⁴ t,主要铜矿床分布在北部吕宋山区的三描礼士省、本格特省、新比斯开省,南部棉兰老岛的北苏里高、北三宝颜省、东达沃省、南可打巴托省和中部地区的宿务省等地区,矿床类型以斑岩型为主	2.5×10 ⁴ t
	印尼 世界铜矿资源大国,2015年铜储量为2800×10 ⁴ t,主要铜矿床集中分布在巴布亚省的艾斯伯格山和格拉斯贝格地区,少量铜矿床分布在苏拉威西、苏门答腊和爪哇等地区,矿床类型以斑岩型铜矿为主	
	缅甸 2015年铜储量为1068.5×10 ⁴ t,主要分布在缅甸中央岛弧成矿带内,铜矿具有成矿时代新、矿床规模大、矿体埋深浅、矿石品位高、成矿与火山作用关系密切等特点	
	老挝 2015年铜储量为290×10 ⁴ t,主要集中分布在沙耶武里、琅勃拉邦—川圹—华潘—甘蒙—沙湾拿吉—阿速坡一带,矿床类型主要有砂岩型、砂卡岩型和斑岩型3种	
镍	印尼 世界镍矿资源大国,2015年镍储量为450×10 ⁴ t,主要分布在群岛的东部,锡矿带可以从中苏拉威西追踪到哈尔马赫拉、奥比、格贝、加格、瓦伊格奥群岛及塔纳梅拉地区,矿床类型以红土型为主	13×10 ⁴ t
	菲律宾 世界镍矿资源大国,2015年镍储量为310×10 ⁴ t,主要分布在东达沃省和巴拉望省及北苏里高省和三描礼士省,矿床类型以红土型为主(占99%)	
	越南 2015年镍储量约为152×10 ⁴ t,主要分布于越南北部版幅地区,矿床类型以蛇绿岩型为主	
	缅甸 2015年镍储量为95×10 ⁴ t,主要分布于缅甸北部的曼德勒省的Thabeikkyin镇、钦邦的Tiddim镇等地区,矿床类型以蛇绿岩型为主	
铬	菲律宾 2015年铬储量约为3020×10 ⁴ t,主要分布在三描礼士省和北苏里高省的Dinagat岛,最大铬矿床为三描礼士山中北部的阿科杰铬矿床	>55×10 ⁴ t
	缅甸 2015年铬储量为2.32×10 ⁴ t,主要分布在西部褶皱带中的三叠纪—始新世蛇绿岩混杂岩及超镁铁岩体中	
	越南 2015年铬储量为2×10 ⁴ t,主要分布于越南北部清化省市郊的古定等地区,矿床类型以砂铬矿为主	
铝土矿	越南 世界铝土矿资源大国,2015年铝土矿储量为21×10 ⁴ t,主要分布在越南中南部的多乐、达农、昆嵩、林同等省,北部地区也有分布,矿床类型以红土型为主	105×10 ⁴ t
	印尼 世界铝土矿资源大国,2015年铝土矿储量约18×10 ⁴ t,其中85%分布在西加里曼丹地区,其余15%分布在廖内群岛中的宾坦岛及其周围小岛上,矿床类型以红土型为主	
	老挝 2015年铝土矿储量为2.3×10 ⁴ t,主要分布在南部菠萝芬高原及阿速坡-色公之间的高原地带,矿床类型以红土型为主	
	柬埔寨 铝土矿资源主要分布在柬埔寨东北部,地质工作程度较低,其资源储量还不能做出统计	
锡	马来西亚 世界锡矿资源大国,2015年锡储量约为100×10 ⁴ t,主要分布在霹雳州和雪兰莪州,如世界著名的坚打谷锡矿区和吉隆坡锡矿区,矿床类型主要有砂矿型、热液型、砂卡岩型和伟晶岩型4种类型,以砂锡矿型为主	>2.8×10 ⁴ t
	印尼 世界锡矿资源大国,2015年锡储量约为80×10 ⁴ t,主要分布在苏门答腊东海岸外的廖内群岛,特别是邦加岛、勿里洞岛和新格乌,矿床类型主要有砂矿型、热液型和伟晶岩型3种,以砂锡矿型为主	
	缅甸 2015年锡储量约为70×10 ⁴ t,主要分布在德林达依省、孟邦、克伦邦、克耶邦及掸邦南部的钨、锡矿带内,主要矿床有茂奇、赫米英吉、亨达、巴达吉亚、海因达等锡矿,矿床类型以热液脉型锡(钨)矿床为主,其次为砂锡矿床	
	泰国 2015年锡储量为17×10 ⁴ t,矿床主要分布在南部地区,包括攀牙、普吉、那空是贪玛叻、拉廊等地区,在北部和中部地区也有少量分布,矿床类型以砂锡矿床为主	
	老挝 估计锡储量为6.5~8×10 ⁴ t,主要分布在甘蒙省,与中国云南省的个旧和越南的高平属同一个锡矿带	
钾盐	泰国 钾盐矿床主要分布于呵叻盆地和沙空那空盆地,呵叻盆地内有邦内那隆、孔敬、暖颂、亚索顿等钾盐矿床,沙空那空盆地内有乌隆、万象、廊开、哇农农汉等钾盐矿床	270×10 ⁴ t
	老挝 钾盐资源尚未得到开发,但开发潜力大,主要分布在万象地区的蒸发岩和碎屑沉积物盆地中	

了源动力和成矿物质基础,在褶皱带、构造岩浆弧带、地块边缘和盆地内形成了丰富的金属矿床、钾盐及其他非硫化物矿床。

(3)矿床成因类型复杂多样,大体可划分为砂卡岩型矿床、斑岩型矿床、热液型矿床、沉积岩容矿

型矿床、造山型矿床、与侵入岩有关的金矿床、VMS型矿床、MVT型矿床、SEDEX型矿床、与花岗岩有关的脉状钨锡及稀土矿床、红土型矿床、镍—铜—铂族元素矿床、IOCG型矿床、蒸发岩型矿床、砂矿型矿床、与盆地有关的贱金属矿床和与风化作用有关

的稀土矿床及其他类型矿床。其中,斑岩型矿床(铜)、矽卡岩型矿床(铜、金)、热液型矿床(金、银、铜)、沉积岩容矿的矿床(金)、砂矿型(锡)和红土型矿床(铝土矿、镍)为东南亚地区的主要矿床类型,勘探开发潜力大。

(4)铜、铬、镍、铝土矿、钾盐、锡等优势矿产资源具有区域性集中分布的特点,便于规划实施综合性找矿评价工作。

致谢:中国地质科学院矿产资源研究所赵一鸣教授对本文提出许多建设性修改意见,在此深表感谢。

参考文献

- [1]Zaw K, Meffre S, Lai C K, et al. Tectonics and metallogeny of mainland Southeast Asia—A review[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26: 5–30.
- [2]Cobbing E J, Mallick D I J, Pitfield P E J, et al. The granites of the South east Asian Tin Belt[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 1986, 143: 537–550.
- [3]Yokart B, Barr S M, Williams—Jones A E, et al. Late-stage alteration and tin—tungsten mineralization in the Khuntan Batholith, northern Thailand[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 21: 999–1018.
- [4]戴自希,王家枢.矿产勘查百年[M].北京:地震出版社,2004.
- [5]裴荣富,梅燕雄,契尔卡索夫 S V, 等.1:25000000 世界大型超大型矿床成矿图[M].北京:地质出版社,2008.
- [6]裴荣富,梅燕雄,瞿泓滢, 等.大型—超大型矿床找矿新认知[J]. *矿床地质*, 2013, 34(4): 661–672.
- [7]陈喜峰.东南亚主要优势矿产资源分布规律[J]. *矿物学报*, 2015, 35(suppl.1):1073.
- [8]李兴振,江新胜,孙志明.西南三江地区碰撞造山过程[M].北京:地质出版社,2002:1–174.
- [9]李兴振.大湄公河次地区主要结合带的对比与连接[J]. *沉积与特提斯地质*, 2004, 24(4): 1–12.
- [10]刘增乾,李兴振,叶庆同.三江地区构造岩浆带的划分与矿产分布规律[M].北京:地质出版社,1993.
- [11]刘本培,冯庆来,Chong C, 等.滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸[J]. *地学前缘*, 2002, 9(3): 161–171.
- [12]钟大赉.滇川西部古特提斯造山带[M].北京:科学出版社,1998: 1–231.
- [13]莫宣学.三江中南段火山岩—蛇绿岩与成矿[M].北京:地质出版社,1998: 1–128.
- [14]Ueno K, Wang Y, Wang X. Fusulinoidean faunal succession of a Paleoe-Tethyan oceanic seamount in the Changning—Menglian Belt, West Yunnan, Southwest China: an overview[J]. *The Island Arc*, 2003, 12: 145–161.
- [15]Wang X F, Metcalfe I, Jian P, et al. The Jinshajiang—Ailaoshan Suture Zone, China: tectonostratigraphy, age and evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18: 675–690.
- [16]陈喜峰,曾普胜,张雪亭, 等.云南永平卓潘碱性杂岩体岩石学和地球化学特征及成因研究[J]. *岩石学报*, 2015, 31(9): 2597–2608.
- [17]Metcalfe I. Gondwana dispersion and Asian accretion: tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 1–33.
- [18]张洪瑞,侯增谦,杨志明.特提斯成矿域主要金属矿床类型与成矿过程[J]. *矿床地质*, 2010, 29(1): 113–133.
- [19]Sone M, Metcalfe I. Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia: New insights for Palaeo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny[J]. *Tectonics*, 2008, 340: 166–179.
- [20]Metcalfe I. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19: 3–21.
- [21]Searle M P, Whitehouse M J, Robb L J, et al. Tectonic evolution of the Sibumasu—Indochina terrane collision zone in Thailand and Malaysia: constraints from new U—Pb zircon chronology of SE Asian tin granitoids[J]. *Journal of the Geological Society*, 2012, 169: 489–500.
- [22]Metcalfe I. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20: 551–556.
- [23]Metcalfe I. Paleozoic—Mesozoic History of SE Asia[C]//Hall R. The SE Asian Gateway: History and Tectonics of the Australia—Asia Collision. London: The Geological Society of London Special Publication, 2011: 7–36.
- [24]Maheo G. Relicts of an intra-oceanic arc in the Sapi—Shergol melange zone (Ladakh, NW Himalaya, India): implications for the closure of the Neo-Tethys Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26: 695–707.
- [25]Bertrand G, Rangina C. Tectonics of the western margin of the Shan plateau (central Myanmar): implication for the India—Indochina oblique convergence since the Oligocene[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 21: 1139–1157.
- [26]Morley C K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia[J]. *Tectonophysics*, 2002, 347: 189–215.
- [27]Morley C K. Nested strike-slip duplexes, and other evidence for Late Cretaceous—Palaeogene transpressional tectonics before and during India—Eurasia collision, in Thailand, Myanmar and Malaysia[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 2004, 161: 799–812.
- [28]卢映祥,刘洪光,黄静宁, 等.东南亚中南半岛成矿带初步划分与区域成矿特征[J]. *地质通报*, 2009, 28(2/3): 314–325.
- [29]Panjasawatwong Y, Phajuy B, Hada S. Tectonic setting of the Permo-Triassic Chiang Khong volcanic rocks, northern Thailand based on petrochemical characteristics[J]. *Gondwana Research*, 2003, 6: 743–755.
- [30]Tran T H, Anh T T, Phuong N T, et al. Permo-Triassic intermediate-felsic magmatism of the Truong Son belt, eastern margin of Indochina[J]. *Geoscience*, 2008, 340: 112–126.
- [31]Liu J, Tran M D, Tang Y, et al. Permo-Triassic granitoids in the

- northern part of the Truong Son belt, NW Vietnam: geochronology, geochemistry and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22: 628–644.
- [32]Phajuy B, Panjasawatwong Y, Osatporn P. Preliminary geochemical study of volcanic rocks in the Pang Mayo area, Phrao, Chiang Mai, northern Thailand: tectonic setting of formation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 765–776.
- [33]Fan W M, Wang Y J, Zhang A M, et al. Permian arc-backarc basin development along the Ailaoshan tectonic zone: geochemical, isotopic and geochronological evidence from the Mojiang volcanic rocks, Southwest China[J]. *Lithos*, 2010, 119: 553–568.
- [34]Singharajwarapan S, Berry R. Tectonic implications of the Nan Suture Zone and its relationship to the Sukhothai Fold Belt, Northern Thailand[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18: 663–673.
- [35]Yumul G P, Zhou M F, Wang Y C, et al. Geology and geochemistry of the Shuanggou Ophiolite (Ailao Shan ophiolitic belt), Yunnan Province, SW China: evidence for a slow-spreading oceanic basin origin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 385–395.
- [36]Khin Z. Metallogeny of mainland SE Asia. Keynote address [C]//11th Regional Congress on Geology, Mineral and Energy Resources of Southeast Asia (GEOSEA), Kuala Lumpur, Malaysia, 2009.
- [37]Khin Z. Tectonics, magmatism and mineral deposit types in SE Asia[C]//Invited Keynote address: Geomyanmar 2012. First International Conference on Regional Geology, Stratigraphy and Tectonics of Myanmar and neighbouring countries and Economic Geology (petroleum and mineral resources) of Myanmar, 1–2 March, 2012.
- [38]王宏,林方成,施美凤,等.滇缅腾冲-毛淡棉构造岩浆岩带钨锡成矿系统与典型矿床研究[J]. *地质与勘探*, 2013, 49(1): 89–98.
- [39]陈喜峰,向运川,叶锦华,等.东南亚中南半岛锡矿成矿特征[J]. *地质通报*, 2015, 34(4): 734–745.
- [40]张西营,马海州,韩元红.泰国-老挝呵叻高原钾盐矿床研究现状及展望[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(5): 549–556.
- [41]Yeap E B. Tin and gold mineralizations in Peninsular Malaysia and their relationships to the tectonic development[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1993, 8(1/4): 329–348.
- [42]中国有色金属工业总公司北京矿产地质研究所.国外主要有色金属矿产[M].北京:冶金工业出版社, 1987.
- [43]Katili J A. Structure and age of the Indonesian tin belt with special reference to Bangka[J]. *Tectonophysics*, 1967, 4(4/6), 403–418.
- [44]Michael O S. The Strata-Bound Tin Deposit Nam Salu, Kelapa Kampit, Indonesia[J]. *Economic Geology*, 1990, 85: 76–98.
- [45]George C B J, Robert W K, Allan K G. Platinum-group element abundance and distribution in chromite deposits of the Acoje Block, Zambales Ophiolite Complex, Philippines[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1990, 37(1): 113–145.
- [46]Yoshio O, Katsuyuki M, Michio I. Relation between chemical composition and particle-size distribution of ores in the profile of nickeliferous laterite deposits of the Rio Tuba Mine, Philippines[J]. *Chemical Geology*, 1987, 60(1/4): 259–271.
- [47]Senior G D, Guy P J, Bruckard W J. The selective flotation of enargite from other copper minerals—a single mineral study in relation to beneficiation of the Tampakan deposit in the Philippines[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2006, 81: 15–26.
- [48]Carlile J C, Davey G R, Kadir I, et al. Discovery and exploration of the Gosowong epithermal gold deposit, Halmahera, Indonesia[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1998, 60: 207–227.
- [49]Febri E P, Setyawan S, Yudi A S, et al. Backfilling Strategy at Gag Island, PT Gag Nickel, Subsidiary of PT ANTAM (Persero) Tbk[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013, 6: 319–325.
- [50]Pollard P J, Taylor R G, Peters L. Ages of Intrusion, Alteration, and Mineralization at the Grasberg Cu–Au Deposit, Papua, Indonesia[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(5): 1005–1020.
- [51]Lai C K, Meffre S, Crawford A J, et al. The Western Ailaoshan volcanic belts and their SE Asia connection: a new tectonic model for the Eastern Indochina Block[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(1): 52–74.
- [52]Cromie P, Zaw K, Ryan C. Geological setting, gold-ore paragenesis and trace element geochemistry of the gold and copper deposits in the Sepon mineral district, Lao PDR[C]//13th Quadrennial International Association on Genesis of Ore Deposits (IAGOD) Symposium, 2010.
- [53]Boonsoong A, Panjasawatwong Y, Metparsopsan K. Petrochemistry and tectonic setting of mafic volcanic rocks in the Chon Daen-Wang Pong area, Phetchabun, Thailand[J]. *Island Arc*, 2011, 20: 107–124.
- [54]Salam A, Zaw K, Meffre S, et al. Geochemistry and geochronology of the Chatree epithermal gold-silver deposit: Implications for the tectonic setting of the Loei Fold Belt, central Thailand[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(1): 198–217.
- [55]Barber A J, Ridd M, Crow M J. The origin, movement and assembly of pre-Tertiary tectonic units of Thailand[C]//Ridd M J, Barber M F, Crow A J. *The Geology of Thailand*. The Geological Society, London, 2011: 507–537.
- [56]Oliver G, Khin Z, Hotson M D. Dating rocks in Singapore: plate tectonics between 280 and 200 million years ago[J]. *Innovation Magazine*, 2011, 10(2): 22–25.
- [57]Hall R, Sevastjanova I. Australian crust in Indonesia[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2012, 59: 827–844.
- [58]Burrett C, Khin Z, Meffre S, et al. The configuration of Greater Gondwana—evidence from LA ICPMS, U–Pb geochronology of detrital zircons from Southeast Asia and China[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(1): 31–51.
- [59]Metcalfe I. Late Palaeozoic and Mesozoic tectonic and palaeogeographical evolution of SE Asia[J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 2009, 315: 7–23.
- [60]Mitchell A H G. Guides to metal provinces in the central Himalaya collision belt; the value of regional stratigraphic correlations and tectonic analogies[J]. *Memoir of the Geological Society of China*, 1979, 3: 167–194.

- [61]Barley M E, Pickard A L, Khin Z ,et al. Jurassic to Miocene magmatism and metamorphism in the Mogok metamorphic belt and the India-Eurasia collision in Myanmar[J]. Tectonics, 2003, 22(3): 1019-1029.
- [62]Otofujii Y I, Tung V D, Fujihara M, et al. Tectonic deformation of the southeastern tip of the Indochina Peninsula during its southward displacement in the Cenozoic time[J]. Gondwana Research, 2012, 22: 615-627.
- [63]Sattayarak N, Polachan S. Rock salt beneath the Khorat Plateau[C]// Proceedings on Mineral Management. Bangkok: Department of Mineral Resources, 1990: 1-14.
- [64]Hardie L A. The roles of rifting and hydrothermal CaCl₂ brines in the origin of potash evaporites: An hypothesis[J]. American Journal of Science, 1990, 290: 43-106.
- [65]Bunopas S, Vella P. Tectonic and geologic evolution of Thailand[C]//Natalaya P. Proceeding of the Workshop on Stratigraphic Correlation of Thailand and Malaysia. Bangkok: Department of Mineral Resources of Thailand, 1983: 307-322.
- [66]施俊法,李友枝,金庆花,等.世界矿情:亚洲卷[M].北京:地质出版社,2006.
- [67]卢焕章. 高盐度、高温和高成矿金属的岩浆成矿流体:以格拉斯伯格 Cu-Au 矿为例[J].岩石学报,2000,16(4):465-473.
- [68]Lehmann B, Mahawat C. Metallogeny of tin in central Thadand: a genetic concept[J]. Geology, 1989, 17: 426-429.
- [69]Lehmann B. The tin-tungsten ore system of Pilok, Thailand[J]. Journal of southeast Asian Earth Sciences, 1994, 10(1/2): 51-63.
- [70]Bardossy G, Aleva G J J. 顾皓民译.红土型铝土矿[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1994.
- [71]Kamvong T, Zaw K, Meffre S, et al. Adakites in the Truong Son and Loei fold belts, Thailand and Laos: genesis and implications for geodynamics and metallogeny[J]. Gondwana Research, 2014, 26(1): 165-184.
- [72]陈喜峰.东南亚中南半岛大地构造单元划分研究现状与存在问题[J].矿物学报, 2015, 35(suppl.1):1071-1072.
- [73]陈喜峰.东南亚中南半岛构造演化与成矿作用初步探讨[J].矿床地质, 2014, 33(Supp.):615-616.
- [74]U.S. Department of the Interior ,U.S. Geological Survey. Mineral Comodity Summaries 2016[EB/OL].(2016-01-30)[2016-04-25] <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/index.html>.2016.
- ①李方夏,赵应龙,王卓之,等.东南亚地质矿产与矿业经济.云南省地质矿产局、云南省计划委员会,1995.