

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.03.001

引用格式:王天刚,郑璐,朱意萍,等.澳大利亚前寒武纪超大陆演化与成矿作用[J].华东地质,2022,43(3):255-267.(WANG T G, ZHENG L, ZHU Y P, et al. Precambrian supercontinent evolution and metallogeny of Australia[J]. East China Geology, 2022, 43(3):255-267.)

## 澳大利亚前寒武纪超大陆演化与成矿作用

王天刚<sup>1</sup>, 郑璐<sup>1</sup>, 朱意萍<sup>1</sup>, Anthony Reid<sup>2</sup>, 赵宇浩<sup>1</sup>, 姚仲友<sup>1</sup>

(1. 美洲和大洋洲地质调查合作中心, 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

2. 澳大利亚南澳大利亚州地质调查局, 南澳大利亚州 阿德莱德 5000)

**摘要:** 澳大利亚前寒武纪地质演化与超大陆旋回密切相关, 大多数地质和成矿事件与超大陆聚合、裂解有关。自太古代以来, 澳大利亚大陆主要由西向东生长。澳大利亚早前寒武纪古陆核为太古代皮尔巴拉和伊尔岗克拉通, 古元古代—中元古代时南北克拉通和西澳大利亚克拉通在哥伦比亚超大陆聚合时拼贴在一起, 并在其后的罗迪尼亚超大陆演化过程中最终形成澳大利亚中西部的中元古代克拉通。澳大利亚前寒武纪成矿作用与克拉通构造演化和超大陆旋回有关, 与绿岩带有关的造山型金矿是凯诺兰大陆聚合过程中的产物, 而沉积岩容矿的铅锌矿床、不整合面型铀矿、铁氧化物型铜金矿床则在哥伦比亚超大陆裂解过程中形成。不同超大陆聚散过程中表现出不同的成矿特征, 为今后的矿产勘查提供了丰富的信息。

**关键词:** 超大陆演化; 成矿规律; 聚散; 前寒武纪克拉通; 澳大利亚

**中图分类号:** P534.41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2022)03-255-13

地球的演化历史是一部超大陆旋回性聚合、裂解的构造演化史<sup>[1-4]</sup>。自太古代以来, 众多类型的矿床周期性地出现于超大陆演化的不同阶段, 表明成矿过程受到超大陆演化的显著控制<sup>[4]</sup>。从超大陆演化的角度系统地研究区域成矿作用, 进而系统地揭示矿床的形成机制和分布规律, 为成矿规律研究带来了新的视角, 并逐渐引起国内外学者的重视<sup>[5-12]</sup>。澳大利亚前寒武纪克拉通位于现今中西部地区, 占其大陆面积的三分之二, 包括西澳克拉通、北澳克拉通、南澳克拉通及夹持其间的中澳结合带。西澳克拉通纳里(Narryer)地块出露世界最古老的岩石和已知最古老的锆石( $3\,731\pm 4\text{ Ma}$ 和 $4\,404\text{ Ma}$ )<sup>[1]</sup>, 地壳演化过程已经历了44亿年, 完整出露了太古代以来的岩石地层, 较好地记录了前寒武纪凯诺兰(Kenorland)( $3\,500\sim 2\,100\text{ Ma}$ )、哥伦比亚(Columbia)( $2\,200\sim 1\,300\text{ Ma}$ )和罗迪尼亚(Rodinia)

( $1\,300\sim 700\text{ Ma}$ )超大陆的演化过程, 是全球前寒武纪地质研究的热点地区<sup>[13-15]</sup>。区内矿产资源丰富, 金、镍、铁等矿产资源储量巨大, 是澳大利亚最重要的成矿区<sup>[16]</sup>。

与全球同期的前寒武纪克拉通类似<sup>[11]</sup>, 澳大利亚前寒武纪克拉通的地质演化及矿产分布与超大陆的聚散具有密切联系, 超大陆的演化过程不仅控制了矿产资源的分布, 还造就了现今澳大利亚独一无二的区域地质特征<sup>[13-15]</sup>。本文从超大陆演化的角度, 在系统描述澳大利亚前寒武纪克拉通地质演化过程与成矿作用的基础上, 总结了区域超大陆演化与成矿作用的耦合关系, 对于区域成矿规律研究与成矿预测具有指导意义。

### 1 地质概况

澳大利亚主要由中西部前寒武纪克拉通和东

\* 收稿日期: 2021-11-29 修订日期: 2022-03-07 责任编辑: 谭桂丽

**基金项目:** 中国地质调查局“玻利维亚—古巴镍钴锂油气资源调查(编号: DD20190441)”和国家自然科学基金“西秦岭地区西成盆地铅锌矿床成矿流体特征研究(编号: 41202068)”项目联合资助。

**第一作者简介:** 王天刚, 1983年生, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事区域成矿规律、矿床成因及勘查技术方法研究。Email: wtiangang@mail.cgs.gov.cn。

**通信作者简介:** 郑璐, 1989年生, 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事矿业投资环境及矿业政策研究。Email: zlu@mail.cgs.gov.cn。

部显生宙造山带组成(图 1,表 1)。中西部为太古代—元古代结晶基底,其中太古代主要分布于西澳克拉通、北澳克拉通和南澳克拉通,为基性和超基性火山岩组成的绿岩带及花岗片麻岩带。古元古代最早的沉积盖层发育于西澳克拉通的皮尔巴拉克拉通南部,主要为一套巨厚的含铁沉积建造。中

元古代沉积盖层出露在北澳克拉通,主要为碳酸盐岩建造。新元古代沉积盖层在区内广泛分布,以南澳克拉通东部最为典型,主要为砂岩、泥质岩、碳酸盐岩、蒸发岩和冰川沉积物。东部显生宙造山带以古生代的海陆交互沉积物为主,中生代沉积在造山带内的部分盆地中发育。

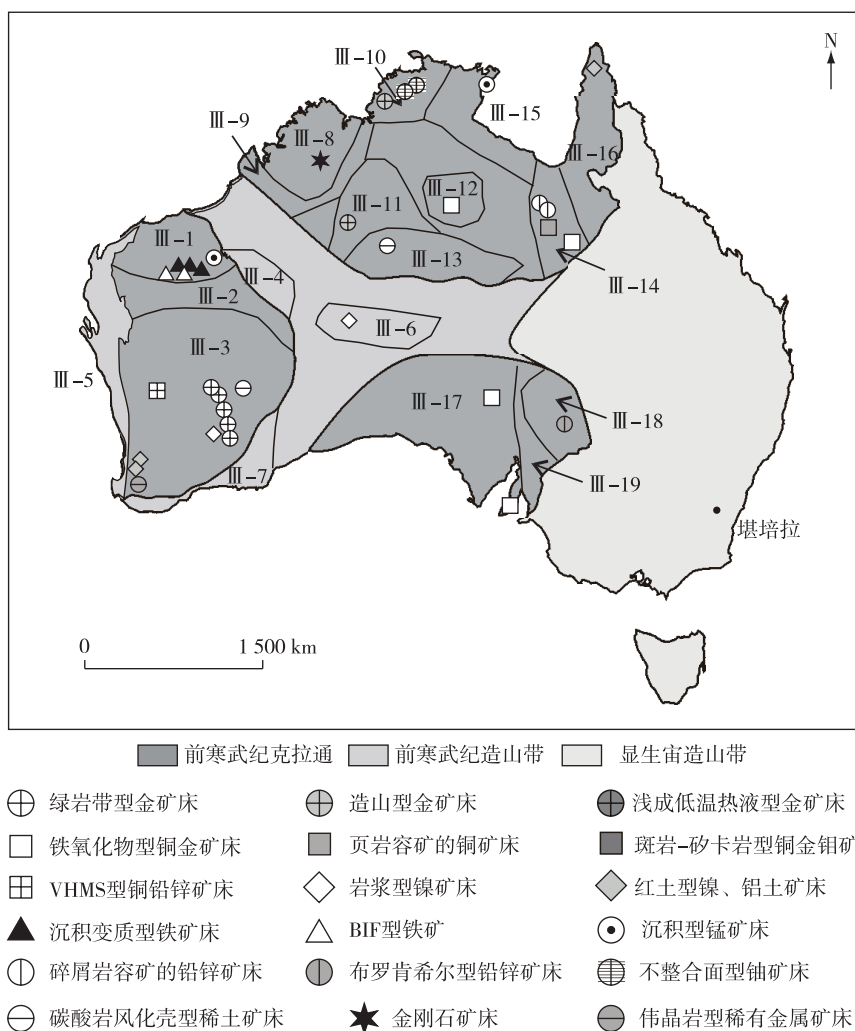


图 1 澳大利亚前寒武纪大地构造格局与主要类型矿床分布图<sup>[16]</sup>

Fig. 1 Precambrian tectonic of Australia and distribution of selected mineralization types<sup>[16]</sup>

澳大利亚岩浆活动频繁。在西澳克拉通内出露多期次的太古代花岗岩(3.50~3.43 Ga, 3.32 和 2.8 Ga),早期主要为 TTG 质花岗岩,并伴有绿岩带侵入,晚期则以造山期后花岗岩为主,呈岩基或岩株侵入到早期花岗岩和绿岩带中;南澳克拉通太古代岩浆活动集中在 2.60~2.55 Ga,元古代的岩浆活动时间与北澳克拉通

基本一致;北澳克拉通的岩浆活动集中在元古代,多与相应的增生和碰撞事件相关。东部显生宙造山带岩浆活动分为古生代、中生代和新生代三期,从超基性到酸性岩浆岩均有分布,其中以古生代的五期构造-岩浆活动最为重要,形成向东逐渐变新的火山岩-侵入岩带,记录了造山带的生长过程<sup>[17]</sup>。

表 1 澳大利亚前寒武纪克拉通构造单元划分<sup>[16]</sup>  
Table 1 Tectonic elements of Precambrian Australia Craton<sup>[16]</sup>

一级	二级	三级
I-1 澳大利亚 中西部前寒 武纪克拉通	II-1 西澳 克拉通	III-1 皮尔巴拉地块
		III-2 南回归线造山带
		III-3 伊尔岗地块
	II-2 中澳 结合带	III-4 派特森造山带
		III-5 平贾拉造山带
		III-6 玛斯格雷夫造山带
		III-7 阿尔巴尼—弗雷泽造山带
		III-8 金伯利地块
		III-9 金利奥波德—霍尔斯 克里克造山带
	II-3 北澳 克拉通	III-10 派恩克里克造山带
		III-11 塔纳米造山带
		III-12 滕南特克里克造山带
		III-13 阿伦塔造山带
		III-14 芒特艾萨造山带
		III-15 麦克阿瑟盆地
	II-4 南澳 克拉通	III-16 乔治敦—科恩造山带
		III-17 高勒地块
		III-18 柯纳莫纳地块
		III-19 阿德莱德褶皱带

## 2 凯诺兰超大陆旋回与澳大利亚古陆核形成演化及成矿作用

凯诺兰超大陆在 2.66 Ga 以前形成,大约在 2.48 Ga 前开始裂解<sup>[18]</sup>。构成澳大利亚西部古陆核的伊尔岗克拉通和皮尔巴拉克拉通均是凯诺兰大陆的重要组成部分<sup>[15]</sup>,在其形成、演化过程中发育了大规模的成矿作用,是目前已知的矿化最发育的太古代克拉通<sup>[19-20]</sup>,该时期也是西澳克拉通最重要的成矿期。

### 2.1 皮尔巴拉克拉通

皮尔巴拉克拉通的构造活动时代从 3.72 Ga 一直持续到 2.4 Ga,可分为北部的元古代花岗绿岩带基底(3.72~2.85 Ga)和南部的哈默斯利盆地(2.77~2.40 Ga)。

克拉通基底的东西两侧具有显著不同的演化历史。克拉通东北部早期地层主要为皮尔巴拉超群,以变质拉斑玄武岩、科马提岩、钙碱性玄武岩和碎屑化

学沉积物为主,形成时代为 3.52~3.16 Ga<sup>[21]</sup>,其中的海相火山岩是块状硫化物矿床的重要赋矿围岩<sup>[22]</sup>(图 2)。该超群被 3.50~3.16 Ga 的五期花岗质岩浆活动侵入,在克拉通东北部形成了大面积的花岗绿岩带。克拉通西北部出露 3.27~3.11 Ga 的科马提岩、拉斑玄武岩、钙碱性火山岩和碎屑沉积物,被 3.07 Ga、3.025~3.01 Ga 和 3.0~2.98 Ga 三期花岗质岩浆活动侵入,并被 3 Ga 左右的火山沉积物覆盖<sup>[23-24]</sup>。克拉通的构造变形一直持续到 2.85 Ga,造山期后的高分异花岗岩随之侵入<sup>[25]</sup>,形成了大量与伟晶岩有关的铌钽锂矿床<sup>[26]</sup>。

南部的哈默斯利盆地形成于晚太古代—古元古代时期(2.77~2.40 Ga)<sup>[27]</sup>,此时皮尔巴拉克拉通南缘处于大陆边缘环境下,形成了以福蒂斯丘(Fortescue)群为代表的大量条带状铁建造,为该区后期大规模的沉积变质型铁矿成矿奠定了物质基础<sup>[28-29]</sup>(图 2)。

### 2.2 伊尔岗克拉通

伊尔岗克拉通主要由低级到高级变质的花岗绿岩带组成,形成时代为 3.73~2.55 Ga,由尤安米、纳里、西南地块和东部金矿省 4 个地块组成,由西向东时代逐渐变新<sup>[30]</sup>。

西部的尤安米、纳里和西南地块(由格雷斯湖、伯丁顿、贝林尔普 3 个地块组成)形成于 3 730~2 900 Ma,由变形花岗岩、片麻岩和变质沉积岩、绿岩带和高级角闪岩相-麻粒岩相变质的层状基性侵入岩组成<sup>[30]</sup>。

东部金矿省地块由伯特维尔、库纳尔皮、卡尔古利等地块在 2.94~2.66 Ga 通过一系列拼贴增生事件逐步形成(图 3),沿拼贴带同时形成了大量的绿岩带<sup>[30-31]</sup>。BARLEY ME 等<sup>[32]</sup>认为这一构造拼贴过程与现代俯冲过程相似,同时引发了地幔物质的上涌,从而在拼贴带两侧形成了大量的绿岩带型金矿,在拼贴带两侧的壳幔韧性剪切带对于金矿的形成具有重要的意义<sup>[33]</sup>。地块底部地层主要为高镁玄武岩和科马提岩夹硅铝质火山岩、火山碎屑岩和碎屑岩,其上为科马提岩、玄武岩和浊积岩,顶部为复理石和磨拉石。东部金矿省是全球两大太古代脉状金矿的超级金成矿省之一,总资源量约 8 500 t,同时也是一个重要的镍成矿省,绿岩带中的科马提岩为其主要赋矿围岩<sup>[34]</sup>(图 2)。

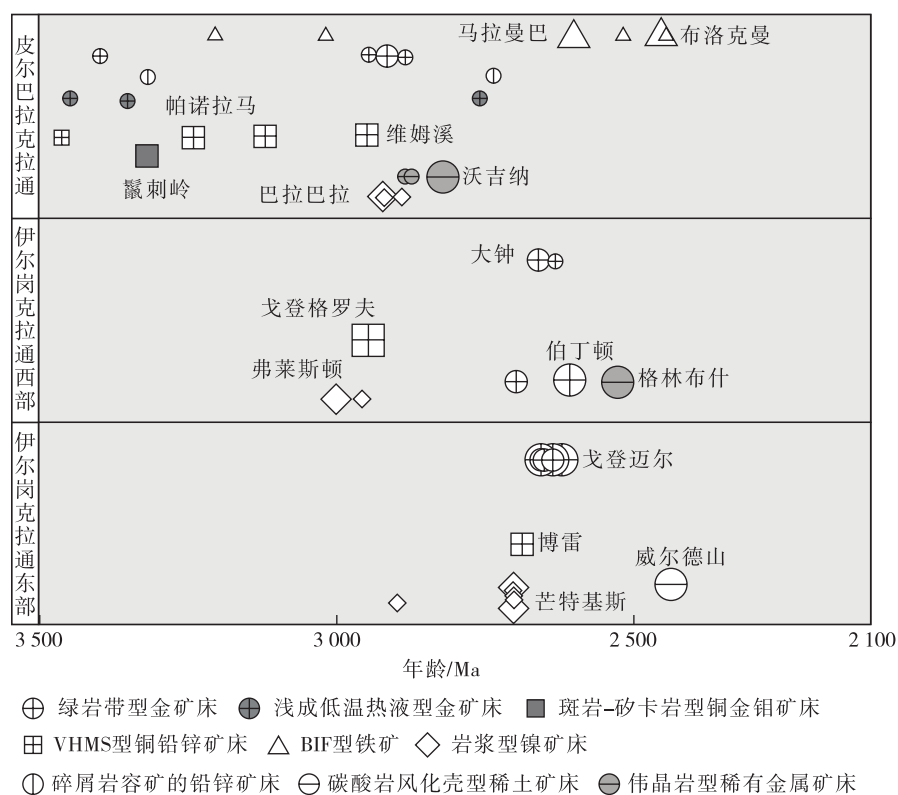


图2 凯诺兰超大陆演化有关的大型金属矿床

Fig. 2 Giant mineral deposits associated with the evolution of Kenorland supercontinent

### 2.3 高勒地块

高勒地块作为南澳克拉通的主要组成部分,其基底主要为 3.52~3.15 Ga, 2.95~2.80 Ga 和 2.60~2.55 Ga 的麻粒岩相变质岩,以马尔加辛 (Mulgathing) 杂岩体为代表。该地块与凯诺兰超大陆的联系尚不清楚,在同期也未形成大规模的成矿作用<sup>[35]</sup>。

## 3 哥伦比亚超大陆旋回与澳大利亚中西部前寒武纪克拉通形成、演化及成矿作用

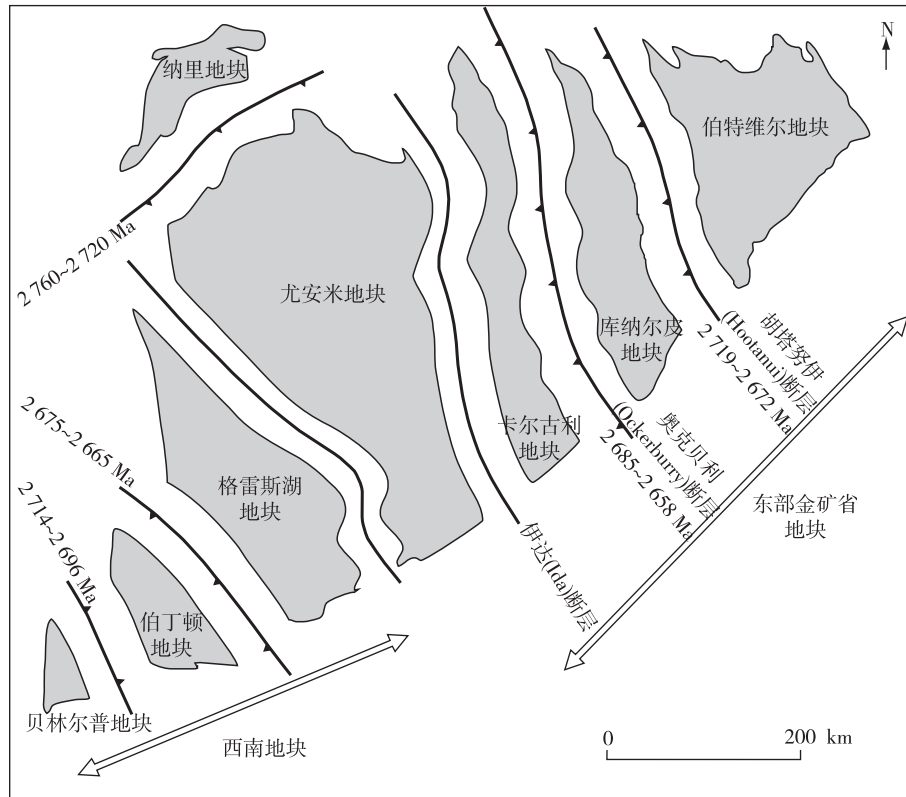
哥伦比亚超大陆旋回发生在 2.2~1.3 Ga, 其中 2.2~1.7 Ga 为超大陆的形成时期,该时期也是澳大利亚中西部前寒武纪克拉通的主要形成时期。此后澳大利亚中西部前寒武纪克拉通伴随着哥伦比亚超大陆分裂而逐渐裂解<sup>[14,36-37]</sup>。伴随着哥伦比亚超大陆聚散过程,澳大利亚中西部前寒武纪克拉通内形成了大量的造山型金矿、铁氧化物矿床、不整合面型铀矿、沉积岩容矿的铅锌矿床,该时期是澳大利亚前寒武纪时期矿化事件最多、范围最广的

时期。

### 3.1 哥伦比亚超大陆聚合过程及成矿作用

作为哥伦比亚超大陆的重要组成部分,中西部前寒武纪克拉通在哥伦比亚超大陆旋回聚合过程中形成(图4)。

西澳克拉通由皮尔巴拉克拉通和伊尔岗克拉通在 2 215~1 950 Ma 时期的一系列构造事件拼贴形成,构造运动在两个克拉通的边缘及南回归线造山带内发育,主要的构造事件包括沿南回归线造山带北缘发生的奥赛米尔造山运动(约 2.2 Ga)<sup>[38]</sup>、影响南缘的哥伦比亚造山运动(2~1.96 Ga)、影响整个造山带的南回归线造山运动(1.83~1.78 Ga)<sup>[39]</sup>(图4)。南回归线造山带的基底由南部哥伦比亚地块和中北部中高级变质岩组成,其中哥伦比亚地块由太古代—古元古代片麻岩、花岗岩、角闪岩和变质泥质沉积岩组成<sup>[40]</sup>;中北部中高级变质岩由泥质、砂屑片岩、钙硅质片岩、角闪岩和石英岩组成。造山带内还发育同期及后期的沉积盆地,众多的造山型金矿、火山岩容矿的块状硫化物矿床均于该时期形成。在皮尔巴拉克拉通和哥伦比亚地块的汇聚过程

图 3 伊尔岗克拉通形成模型示意图<sup>[30]</sup>Fig. 3 A model for the assembly of the Yilgarn Craton<sup>[30]</sup>

中,哈默斯利盆地发生了变质变形<sup>[40-41]</sup>,盆地内古元古代沉积的条带状铁建造被改造后更加富集<sup>[42]</sup>(图 5)。

北澳克拉通在 1.84 Ga 左右由初始北澳克拉通(包括塔纳米造山带、滕南特克里克造山带)、芒特艾萨地块与金伯利地块、派恩克里克造山带拼合形成<sup>[43]</sup>,艾勒朗地块(阿伦塔造山带的一部分)同时从南部增生到北澳大利亚克拉通之上<sup>[44]</sup>,而努米尔—科万亚马—阿宾顿地块(乔治敦—科恩造山带基底)在 1.85 Ga 以前从东部增生到北澳大利亚克拉通之上<sup>[45]</sup>(图 4)。克拉通基底主要为太古代—古元古代变质火山岩、侵入岩,盖层沉积物主要为中元古代及更年轻的陆相、海相、冰川沉积物<sup>[17]</sup>。伴随着北澳克拉通形成的构造事件,在滕南特克里克造山带内形成了铁氧化物型金铜铋矿床<sup>[46]</sup>。

南澳克拉通的高勒地块通过 1.86~1.85 Ga 的科尼安构造事件与北东高勒地块拼贴生长,与构造事件同时形成了以道宁顿(Donington)花岗岩为代表的岩浆活动,但是同期的构造事件在该地区未形成大规模的矿化<sup>[17]</sup>。

西澳克拉通与北澳克拉通通过 1.81~1.79 Ga 及其后的亚旁库—南回归线造山运动(1.79~1.78 Ga)拼贴在一起(图 4)<sup>[47]</sup>。伴随着该次拼贴过程,在北澳克拉通西南部的塔纳米地块形成了与造山型金矿成矿系统,矿化时间为 1 805~1 790 Ma,造山过程中的构造变形及同期的格林姆韦德岩套为代表的岩浆侵入事件对于矿床形成具有重要意义<sup>[48]</sup>。北澳克拉通与南澳克拉通通过金班造山运动(1.74 Ga)开始拼贴(图 4),本期构造事件在两个克拉通内未形成大规模的成矿作用<sup>[49]</sup>。

### 3.2 哥伦比亚超大陆裂解过程及成矿作用

1.7 Ga 以后,哥伦比亚超大陆开始裂解,同时伴随着劳伦古陆的裂解,澳大利亚前寒武纪克拉通开始了长期的伸展过程,一直持续到 1 575 Ma(图 6)<sup>[50-52]</sup>,南澳克拉通的柯纳莫纳地块在该时期形成,同时,在北澳克拉通的芒特艾萨造山带、麦克阿瑟盆地等形成了超级盆地,该期伸展过程在柯纳莫纳地块、芒特艾萨造山带和麦克阿瑟盆地形成了全球知名的喷流沉积型铅锌成矿带(图 5)<sup>[53]</sup>。努米

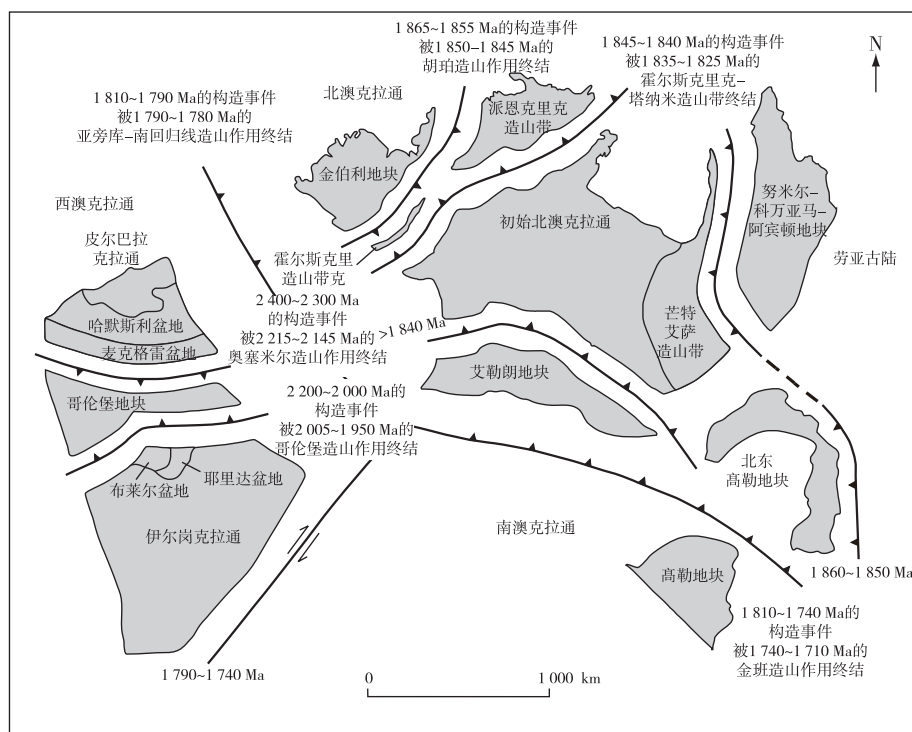
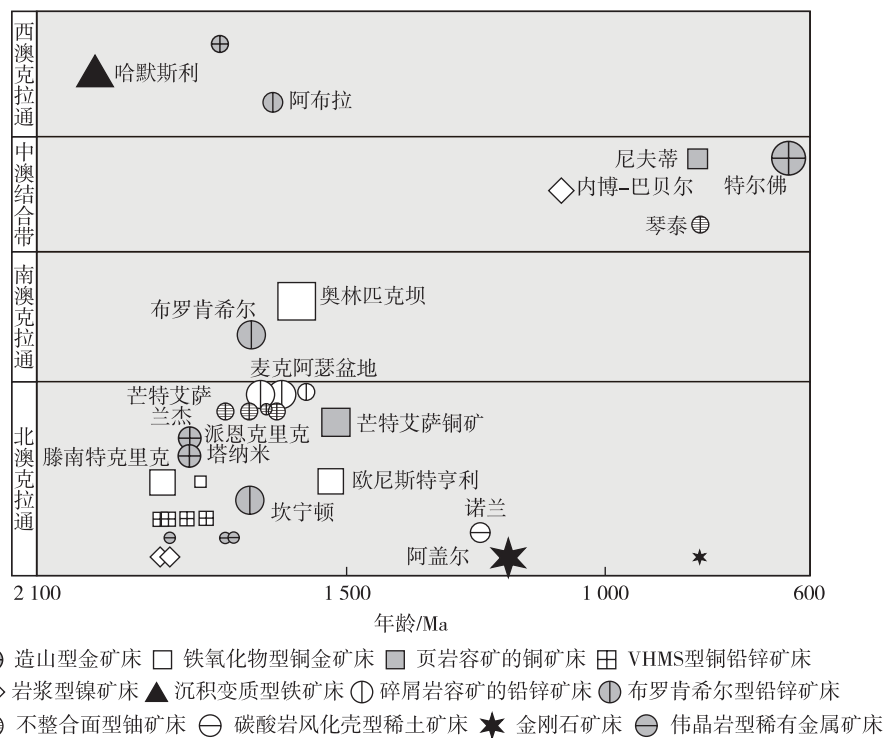
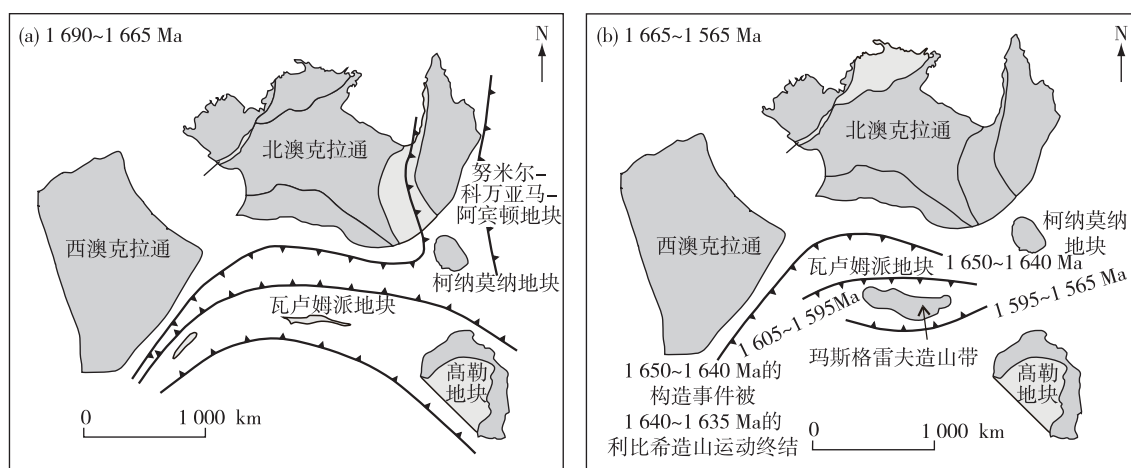
图 4 澳大利亚前寒武纪克拉通形成过程(2.2~1.7 Ga)图<sup>[12,14]</sup>Fig. 4 Assembly of Australia Precambrian craton (2.2~1.7 Ga) <sup>[12, 14]</sup>

图 5 哥伦比亚和罗迪尼亚超大陆演化有关的大型金属矿床

Fig. 5 Large mineral deposits associated with the evolution of Columbia and Rodinia supercontinents

图 6 澳大利亚前寒武纪克拉通演化过程(1 690~1 565 Ma)<sup>[13,15]</sup>Fig. 6 Evolution of Australia Precambrian Craton (1 690~1 565 Ma) <sup>[13,15]</sup>

尔—科万亚马—阿宾顿地块也伴随着哥伦比亚超大陆的裂解过程,从澳大利亚前寒武纪克拉通裂解出来,并引发了澳大利亚前寒武纪克拉通从劳伦古陆分离<sup>[54]</sup>。

澳大利亚前寒武纪克拉通内部此时依然发育小规模拼贴增生过程。瓦卢姆派地块在 1.64 Ga 左右通过利比希造山运动开始拼贴到北澳克拉通南部的阿伦塔造山带之上<sup>[55]</sup>。马斯格雷夫造山带、高勒地块、柯纳莫纳地块等分别在 1.59~1.56 Ga 陆续拼贴到北澳大利亚克拉通之上<sup>[30]</sup>。

1.60~1.58 Ga 时期,在澳大利亚前寒武纪克拉通的东部边缘,特别是在南澳克拉通和北澳克拉通南部,发育希尔塔巴(Hiltaba)构造岩浆事件。该期构造岩浆事件在澳大利亚前寒武纪克拉通的高勒地块、柯纳莫纳地块和芒特艾萨造山带内形成了大规模的双峰式火山岩,并伴随着大规模的花岗岩侵入,在这些地区形成了长度达上千千米的铁氧化物型矿床成矿带<sup>[56]</sup>。该时期的高热能花岗质岩浆和火山活动对于后期的铀、钍矿化也具有重要意义,为后期的表生矿化作用提供了充足的成矿物质来源<sup>[57]</sup>(图 5)。

#### 4 罗迪尼亚超大陆演化与澳大利亚中西部前寒武纪克拉通演化及成矿作用

罗迪尼亚超大陆的汇聚时间为 1.3~0.9 Ga,其在澳大利亚前寒武纪克拉通内部影响较小,仅在克拉通内部中澳结合带内的派特森造山带、阿尔巴

尼—弗雷泽造山带、平贾拉造山带和马斯格雷夫造山带内发育了多期变质、变形事件和岩浆活动。该时期的成矿作用大多与岩浆活动有关,成矿规模相对较小,典型的有北澳克拉通内与碳酸盐岩有关的诺兰稀土矿(1.24 Ga)<sup>[58]</sup>、与地幔柱活动有关的阿盖尔金刚石矿(1.18 Ga)<sup>[59]</sup>,以及位于中澳活动带的马斯格雷夫造山带的内博—巴贝尔岩浆型镍矿<sup>[60]</sup>(图 5)。

罗迪尼亚超大陆裂解开始于 850 Ma,在澳大利亚前寒武纪克拉通内形成了一系列的火成岩省,以 830 Ma 的加德纳火成岩省为代表的,侵入到北澳克拉通、南澳克拉通以及中澳活动带的派特森造山带西北部,该阶段在克拉通内未形成大规模的矿化作用<sup>[61]</sup>。

#### 5 讨论

澳大利亚前寒武纪克拉通不同程度地记录了凯诺兰超大陆、哥伦比亚超大陆、罗迪尼亚超大陆等前寒武纪超大陆的聚合、裂解过程,在各个时期相应发育了不同类型、规模和组合方式(图 7)。

在超大陆聚合过程中,以发育造山型金矿、火山岩容矿的块状硫化物矿床、岩浆活动有关的镍矿等成矿作用为特色。造山型金矿在不同时期的超大陆聚散过程中展现出显著不同的特点:凯诺兰大陆汇聚过程在西澳克拉通形成了大规模的与绿岩带有关的造山型金矿床,同时期在加拿大、芬兰、南非、印度等地区的绿岩带内也发育同类型金

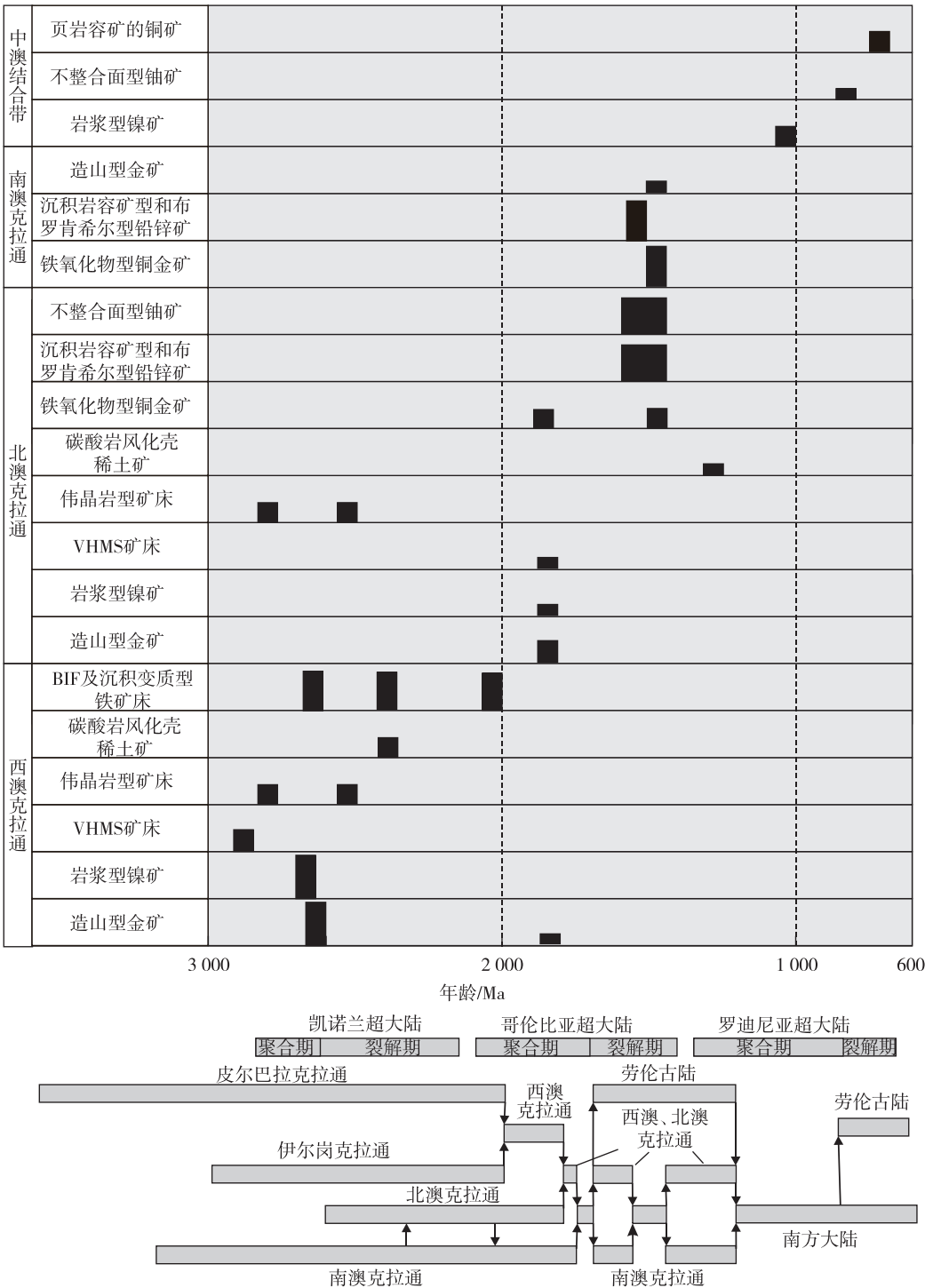


图7 澳大利亚前寒武纪克拉通超大陆演化及其与成矿作用的对应关系<sup>[4]</sup>

Fig. 7 Supercontinent evolution of Precambrian Australia Craton and its relationship with mineralization<sup>[4]</sup>

矿<sup>[62-63]</sup>,后期哥伦比亚超大陆聚合过程中在北澳克拉通内形成的造山型金矿在赋矿围岩、成矿规模上存在显著差异,成矿作用重要性逐渐降低<sup>[63]</sup>。早期形成的火山岩容矿的块状硫化物矿床在成矿作用

的规模和强度上也呈现逐渐降低的特点。在成矿类型上,也存在着显著的差异,科马提岩有关的岩浆型镍矿仅见于西澳克拉通等凯诺兰超大陆演化期形成的克拉通内,在后期超大陆的演化过程中因

其不发育绿岩带而不再产出,以发育岩浆镍铜铂族矿床为特征。这些特征均与早期地壳较薄,壳幔交互作用更强烈密切相关。

在超大陆裂解过程中,以发育条带状铁建造有关的铁矿、沉积岩容矿的铅锌矿床、不整合面型铀矿、铁氧化物型铜金矿床等成矿作用为特征,岩浆型铜镍硫化物矿床也有发育。与澳大利亚前寒武纪条带状铁建造有关的铁矿主要形成于凯诺兰超大陆裂解过程中,可能与早期地幔柱活动较活跃有关<sup>[64]</sup>,此后的超大陆演化中再无大规模的条带状铁建造产出。相比较而言,在哥伦比亚超大陆裂解过程中大量发育的沉积岩容矿的铅锌成矿作用,以及伴随盆地发育形成的不整合面型铀矿在凯诺兰超大陆裂解过程中基本不发育,可能与凯诺兰超大陆演化时期陆地面积较小,不具备发育大规模地壳有关的矿床有关,澳大利亚前寒武纪克拉通东缘与裂解有关的大规模铁氧化物成矿作用可能也与此相关。裂解过程中形成的岩浆型铜镍硫化物矿床呈分散分布的特点,主要与地幔柱活动有关<sup>[4]</sup>,与凯诺兰大陆聚合期形成的大规模岩浆型镍矿展现出显著不同的特点。此外,从全球角度看,罗迪尼亚超大陆裂解时期非洲中部形成了大规模的与页岩有关的铜钴矿床,而南澳克拉通阿德莱德裂谷在同时期也发育同类型的矿化,可能预示着后者具有发育大规模该类型矿化的潜力。

## 6 结论

(1)澳大利亚前寒武纪克拉通的生长过程与全球超大陆聚散过程展现出密切的联系:在凯诺兰超大陆时期,克拉通陆核皮尔巴拉克拉通和伊尔岗克拉通形成;在哥伦比亚超大陆演化过程中,澳大利亚前寒武纪克拉通基本形成;在罗迪尼亚超大陆演化过程中,克拉通最终定形。

(2)超大陆聚散对澳大利亚前寒武纪克拉通成矿作用具有显著的控制作用。凯诺兰超大陆的聚合、裂解导致在西澳克拉通内形成了大量的造山型金矿、岩浆型镍矿以及条带状铁建造有关的铁矿。哥伦比亚超大陆聚合、裂解过程的成矿作用主要集中在北澳克拉通和南澳克拉通,其中在超大陆聚合过程中形成了大规模的造山型金矿,而在裂解过程中则在克拉通东部边缘形成了铁氧化物型铜金矿、

沉积岩容矿的铅锌矿、不整合面型铀矿等大规模成矿作用。罗迪尼亚超大陆聚合过程仅形成了少量的造山型金矿化,其裂解过程则在克拉通内形成了与地幔柱有关的岩浆型镍矿床。

(3)不同时期超大陆的聚合、裂解过程形成的矿床具有显著差异。早期凯诺兰超大陆聚合裂解过程中因壳幔相互作用强烈,形成了以科马提岩有关的镍矿、绿岩带型金矿为代表的成矿作用;哥伦比亚及其后的超大陆裂解过程中,地壳面积的不断扩大,为形成大规模的沉积岩容矿的铅锌矿、不整合面型铀矿等成矿作用奠定了基础。

## 参考文献

- [1] MAAS R. The Earth's oldest known crust: A geochronological and geochemical study of 3 900—4 200 Ma old detrital zircons from Mt. Narryer and Jack Hills, Western Australia [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56(3): 1281-1300.
- [2] MITCHELL R N, ZHANG N, SALMINEN J, et al. The supercontinent cycle [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(5): 358-374.
- [3] BRADLEY D C. Secular trends in the geologic record and the supercontinent cycle [J]. *Earth Science Reviews*, 2011, 108(1/2): 16-33.
- [4] NANCE R D, MURPHY J B, SANTOSH M. The supercontinent cycle: a retrospective essay [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 4-29.
- [5] KERRICH R R, GOLDFARB J, RICHARDS. Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework [J]. *Economic Geology*, 2005, 100: 1097-1136.
- [6] 李文渊. 超大陆旋回与成矿作用 [J]. *西北地质*, 2012, 45(2): 27-42.  
LI W Y. Active Global Tectonics and Ore-Forming Processes [J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(2): 27-42.
- [7] 翟明国. 中国主要古陆与联合大陆的形成——综述与展望 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1583-1606.  
ZHAI M G. The main old lands in China and assembly of Chinese unified continent [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(10): 1583-1606.
- [8] 李献华, 李武显, 何斌. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解——观察、解释与检验 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(6): 543-559.

- LI X H, LI W X, HE B. Building of the south china block and its relevance to assembly and breakup of ro-dinia supercontinent: observations, interpretations and tests[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geo-chemistry*, 2012, 31(6), 543-559.
- [9] BARLEY M E, GROVES D I. Supercontinent cycles and the distribution of metal deposits through time[J]. *Geology*, 1992, 20 (4): 291-294.
- [10] TKACHEV A V, RUNDQVIST D V. Global trends in the evolution of metallogenic processes as a reflection of supercontinent cyclicity[J]. *Geology of Ore Deposits*, 2016, 58(4): 263-283.
- [11] TEIXEIRA J B G, MISI A, DA SILVA M D G. Su-percontinent evolution and the Proterozoic metallogeny of South America[J]. *Gondwana Research*, 2007, 11 (3): 346-361.
- [12] KAUR P, CHAUDHRI N. Metallogeny associated with the Palaeo-Mesoproterozoic Columbia superconti-nent cycle: a synthesis of major metallic deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 56: 415-422.
- [13] BETTS P G, GILES D, LISTER G S, et al. Evolution of the Australian lithosphere[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2002, 49(4): 661-695.
- [14] MYERS J, SHAW R D, TYLER I M. Tectonic evo-lution of Proterozoic Australia[J]. *Tectonics*, 1996, 15 (6): 1431-1446.
- [15] HUSTON D L, BLEWETT R S, CHAMPION D C. Australia through time: a summary of its tectonic and metallogenic evolution [J]. *Episodes*, 2012, 35 (1): 23-43.
- [16] 姚仲友, 王天刚, 傅朝义, 等. 大洋洲地区大地构造格架与优势矿产资源[J]. *地质通报*, 2014, 33(1/2): 143-158.
- YAO Z Y, WANG T G, FU C Y, et al. Geological framework and dominant mineral resources of Oceania [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33 (1/2): 143-158.
- [17] 姚仲友, 王天刚, 王国平, 等. 大洋洲地区优势矿产资-源潜力评价[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 255.
- YAO Z Y, WANG T G, WANG G P, et al. Potential assessment of advantageous mineral resources in Oceania [M]. Beijing: Science Press, 2015: 255.
- [18] BARLEY M E, BEKKER, KRAPEŽ B. Late Archean to Early Paleoproterozoic global tectonics, environ-mental change and the rise of atmospheric oxygen[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 238(1/2): 156-171.
- [19] DITTRICH T, SEIFERT T, SCHULZ B, et al. Ar-chean rare-metal pegmatites in Zimbabwe and Western Australia: Geology and metallogeny of pollucite mine-ralisations[M]. Berlin: Springer, 2019.
- [20] MOLE D, FIORENTINI M, CASSIDY K, et al. Crustal evolution, intra-cratonic architecture and the metallogeny of an Archaean craton[J]. *Geological Soci-ety*, 2015, 393(1): 23-80.
- [21] BARLEY M, LOADER S, MCNAUGHTON N. 3 430 to 3 417 Ma calc-alkaline volcanism in the McPhee Dome and Kelly Belt, and growth of the eastern Pilbara Craton [J]. *Precambrian Research*, 1998, 88(1): 3-23.
- [22] VEARNCOMBES, KERRICH R. Geochemistry and geodynamic setting of volcanic and plutonic rocks as-sociated with Early Archaean volcanogenic massive sulphide mineralization, Pilbara Craton [J]. *Precambrian Research*, 1999, 98(3/4): 243-270.
- [23] BUICKR, THORNETT J, MCNAUGHTON N, et al. Record of emergent continental crust ~ 3.5 billion years ago in the Pilbara craton of Australia [J]. *Nature*, 1995, 375: 574-577.
- [24] SMITH J, BARLEY M, GROVES D, et al. The Sholl Shear Zone, West Pilbara: evidence for a domain boundary structure from integrated tectonostratigraphic analyses, SHRIMP U-Pb dating and isotopic and geo-chemical data of granitoids[J]. *Precambrian Research*, 1998, 88(1): 143-171.
- [25] COLLINS W, GRAY C. Rb-Sr isotopic systematics of an Archaean granite-gneiss terrain: The Mount Edgar Batholith, Pilbara Block, Western Australia[J]. *Aus-tralian Journal of Earth Sciences*, 1990, 37(1): 9-22.
- [26] SWEETAPPLE M T, COLLINS P L. Genetic frame-work for the classification and distribution of Archaean rare metal pegmatites in the North Pilbara Craton, Western Australia[J]. *Economic Geology*, 2002, 97 (4): 873-895.
- [27] MARTIN D M B, LI Z, NEMCHIN A, et al. A pre-2.2 Ga age for giant hematite ores of the Hamersley Province, Australia[J]. *Economic Geology*, 1998, 93 (7): 1084-1090.
- [28] 姚仲友, 王天刚, 汪建宁. 与前寒武纪含铁建造有关的铁矿床基本特征及研究进展[J]. *华东地质*, 2012, 33 (4): 261-267.
- YAO Z Y, WANG T G, WANG J N. Characteristics and research progress of iron deposits related to pre-cambrian iron-bearing formation[J]. *East China Geolo-*

- gy, 2012, 33(4): 261-267.
- [29] MORRIS R, KNEESHAW M. Genesis modelling for the Hamersley BIF-hosted iron ores of Western Australia: a critical review[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2011, 58(5): 417-451.
- [30] MYERS J S. Precambrian Tectonic History of the West Australian Craton and Adjacent Orogens[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1993, 21: 453-485.
- [31] KORSCH R, KOSITCIN N, CHAMPION D. Australian isls and arcs through time: geodynamic implications for the Archean and Proterozoic[J]. Gondwana Research, 2011, 19(3): 716-734.
- [32] BARLEY M E, EISENLOHR B N, GROVES D I, et al. Late Archean convergent margin tectonics and gold mineralization: a new look at the Norseman-Wiluna Belt, Western Australia[J]. Geology, 1989, 17(9): 826-829.
- [33] BLEWETT R, HENSON P, ROY I, et al. Scale-integrated architecture of a world-class gold mineral system: the Archean eastern Yilgarn Craton, Western Australia[J]. Precambrian Research, 2010, 183(2): 230-250.
- [34] NISBET E, CHEADLE M, ARNDT N, et al. Constraining the potential temperature of the Archean mantle: a review of the evidence from komatiites[J]. Lithos, 1993, 30(3/4): 291-307.
- [35] REID A J, JAGODZINSKI E A, FRASER G L, et al. SHRIMP U-Pb zircon age constraints on the tectonics of the Neoproterozoic to early Paleoproterozoic transition within the Mulgaibar Complex, Gawler Craton, South Australia [J]. Precambrian Research, 2014, 250: 27-49.
- [36] BETTS P G, GILES D. The 1 800—1 100 Ma tectonic evolution of Australia [J]. Precambrian Research, 2006, 144(1/2): 92-125.
- [37] CAWOOD P A, KORSCH R. Assembling Australia: Proterozoic building of a continent[J]. Precambrian Research, 2008, 166(1/4): 1-35.
- [38] CAWOOD P A, TYLER I M. Assembling and reactivating the Proterozoic Capricorn Orogen: lithotectonic elements, orogenies, and significance[J]. Precambrian Research, 2004, 128(3/4): 201-218.
- [39] OCCHIPINTI S, SHEPPARD S, PASSCHIER C, et al. Palaeoproterozoic crustal accretion and collision in the southern Capricorn Orogen: the Glenburgh Orogeny[J]. Precambrian Research, 2004, 128(3): 237-255.
- [40] OCCHIPINTI S, SWAGER C, PIRAJNO F. Structural-metamorphic evolution of the Palaeoproterozoic Bryah and Padbury Groups during the Capricorn orogeny, Western Australia[J]. Precambrian Research, 1998, 90(3): 141-158.
- [41] TYLER I, GRIFFIN T. Structural development of the King Leopold Orogen, Kimberley region, Western Australia[J]. Journal of Structural Geology, 1990, 12(5): 703-714.
- [42] MÜLLER S G, KRAPEZ B, BARLEY M E, et al. Giant iron-ore deposits of the Hamersley province related to the breakup of Paleoproterozoic Australia: new insights from in situ SHRIMP dating of baddeleyite from mafic intrusions[J]. Geology, 2005, 33(7): 577-580.
- [43] SHEPPARD S, TYLER I, GRIFFIN T, et al. Palaeoproterozoic subduction-related and passive margin basalts in the Halls Creek Orogen, northwest Australia [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1999, 46(5): 679-690.
- [44] GOLEBY B R, HUSTON D L, LYONS P, et al. The Tanami deep seismic reflection experiment: An insight into gold mineralization and Paleoproterozoic collision in the North Australian Craton[J]. Tectonophysics, 2009, 472(1/4): 169-182.
- [45] KORSCH R, HUSTON D, HENDERSON R, et al. Crustal architecture and geodynamics of North Queensland, Australia: insights from deep seismic reflection profiling[J]. Tectonophysics, 2012, 572: 76-99.
- [46] SKIRROW, WALSH. Reduced and oxidized Au-Cu-Bi iron oxide deposits of the Tennant Creek Inlier, Australia: an integrated geologic and chemical model [J]. Economic Geology, 2002, 97(6): 1167-1202.
- [47] BAGAS L. Proterozoic evolution and tectonic setting of the northwest Paterson Orogen, Western Australia [J]. Precambrian Research, 2004, 128(3/4): 475-496.
- [48] HUSTON D L, ANDENBERG L V, WYGRALAK A S, et al. Lode-gold mineralization in the Tanami region, northern Australia[J]. Mineralium Deposita, 2007, 42(1/2): 175-204.
- [49] BETTS P G, GILES D, SCHAEFER B F. Comparing 1 800—1 600 Ma accretionary and basin processes in Australia and Laurentia: Possible geographic connections in Columbia[J]. Precambrian Research, 2008, 166(1/4): 81-92.

- [50] SCOTT D, RAWLINGS D, PAGE R, et al. Basement framework and geodynamic evolution of the Palaeoproterozoic superbasins of north-central Australia: an integrated review of geochemical, geochronological and geophysical data[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2000, 47(3): 341-380.
- [51] BEARDSMORE T, NEWBERY S, LAING W. The Maronan Supergroup: an inferred early volcanosedimentary rift sequence in the Mount Isa Inlier, and its implications for ensialic rifting in the Middle Proterozoic of northwest Queensland[J]. *Precambrian Research*, 1988, 40: 487-507.
- [52] GIBSON G, RUBENACH M, NEUMANN N, et al. Syn-and post-extensional tectonic activity in the Palaeoproterozoic sequences of Broken Hill and Mount Isa and its bearing on reconstructions of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 2008, 166(1/4): 350-369.
- [53] SOUTHGATE P, BRADSHAW B, DOMAGALA J, et al. Chronostratigraphic basin framework for Palaeoproterozoic rocks (1 730~1 575 Ma) in northern Australia and implications for base-metal mineralisation[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2000, 47(3): 461-483.
- [54] BETTS P G, GILES D, LISTER G S. Tectonic environment of shale-hosted massive sulfide Pb-Zn-Ag deposits of Proterozoic northeastern Australia[J]. *Economic Geology*, 2003, 98(3): 557-576.
- [55] SCRIMGEOUR I R, KINNY P D, CLOSE D F, et al. High-T granulites and polymetamorphism in the southern Arunta Region, central Australia: evidence for a 1.64 Ga accretional event[J]. *Precambrian Research*, 2005, 142(1/2): 1-27.
- [56] WILLIAMSP J, BARTON M, JOHNSON D A, et al. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin[M]. In: GOLDFARB R J, RICHARDS J P. *Economic Geology*, 2005.
- [57] POLITO PA, KYSER T K, MARLATT J, et al. Significance of alteration assemblages for the origin and evolution of the Proterozoic Nabarlek unconformity-related uranium deposit, Northern Territory, Australia[J]. *Economic Geology*, 2004, 99(1): 113-139.
- [58] SCHONEVELD L, SPANDLER C, HUSSEY K. Genesis of the central zone of the Nolans Bore rare earth element deposit, Northern Territory, Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2015, 170(2): 1-22.
- [59] LUGUET A, JAQUES A, PEARSON D, et al. An integrated petrological, geochemical and Re-Os isotope study of peridotite xenoliths from the Argyle lamproite, Western Australia and implications for cratonic diamond occurrences[J]. *Lithos*, 2009, 112: 1096-1108.
- [60] HOWARD H, SMITHIES R, KIRKL C, et al. Age and geochemistry of the Alcurra Suite in the west Musgrave Province and implications for orthomagmatic Ni-Cu-PGE mineralization during the Giles Event[R]. Perth: Geological Survey of Western Australia, 2009: 16.
- [61] PIRAJNO F, HOATSON D M. A review of Australia's Large Igneous Provinces and associated mineral systems: Implications for mantle dynamics through geological time[J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 48: 2-54.
- [62] KERRICH R, CASSIDY K F. Temporal relationships of lode gold mineralization to accretion, magmatism, metamorphism and deformation—Archean to present: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 1994, 9(4): 263-310.
- [63] GOLDFARB R J, GROVES D I, GARDOLL S. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2001, 18(1): 1-75.
- [64] ISLEY A E, ABBOTT D H. Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B7): 15461-15477.

## Precambrian supercontinent evolution and metallogeny of Australia

WANG Tiangang<sup>1</sup>, ZHENG Lu<sup>1</sup>, ZHU Yiping<sup>1</sup>, Anthony Reid<sup>2</sup>, ZHAO Yuhao<sup>1</sup>, YAO Zhongyou<sup>1</sup>

(1. *The Cooperative Center for American and Oceanian Geological Survey, Nanjing Center, China Geological Survey,*

*Nanjing 210016, Jiangsu, China;*

*2. Geological Survey of South Australia, Adelaide, 5000, South Australia, Australia)*

**Abstract:** The Precambrian geological evolution of Australia was closely linked to supercontinent cycles, with most geological and metallogenic events relating to supercontinent assembly and breakup. Australia mainly grew from west to east since Archean. The nuclei of Australian Precambrian craton consist of two Archean cratons, the Yilgarn and Pilbara cratons, which forming the oldest part of the continent. In Paleoproterozoic-Mesoproterozoic, North Australian craton, South Australian craton and West Australian craton initially assembled during the Paleoproterozoic amalgamation of Columbia, and then Middle-west Australian Precambrian craton came into shape in the process of the amalgamation of Rodinia. The metallogeny of Australian Precambrian craton are linked to the tectonic evolution and the supercontinent cycle, with orogenic gold province as a product of the assembly of Kenorland, whereas major sediment-hosted Zn-Pb deposits, iron oxide-Cu-Au deposits and unconformity-associated uranium deposits formed in the process of Columbia supercontinent breakup. The diverse supercontinent evolution shows different characteristics of metallogeny during supercontinent assembly and breakup which may provide fruitful information for future mineral exploration.

**Key words:** supercontinent evolution; metallogeny; assembly and breakup; Precambrian craton; Australian