

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2020.03.001

引用格式: 杨明桂, 王光辉. 华南新元古代晚期地层层序与南华间冰期—冰后期大规模沉积成矿作用[J]. 华东地质, 2020, 41(3): 197-208.

# 华南新元古代晚期地层层序与南华间冰期—冰后期大规模沉积成矿作用

杨明桂, 王光辉

(江西省地质矿产勘查开发局, 南昌 330002)

**摘要:** 文章综述了扬子陆块东南缘与华南裂谷系新元古代晚期地层划分研究取得的新进展。通过研究区域标志地层、沉积与沉积成矿事件并结合同位素测年资料, 对争议较多的“板溪期”地层、南华系底界、南华冰期地层及武夷—云开一带元古宙构造、岩石、地层时代和层序进行了系统划分与对比, 进一步厘清南华间冰期—冰后期大规模沉积成矿作用形成的铁、锰、磷、滑石及页岩气、黑色碳质页岩(石墨)等矿产成矿及生物大爆发事件链, 探讨了区域地质构造、沉积与雪球事件等气候环境对沉积成矿规律的约束作用。

**关键词:** 华南地区; 新元古代晚期; 南华冰期; 地层对比; 沉积成矿作用

**中图分类号:** P534.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2020)03-197-12

新元古代晚青白口世晋宁期华南洋消亡, 扬子板块与华夏板块对接(~820 Ma)形成陆块, 稍后(~815 Ma)陆壳强烈伸展形成扬子—加里东期华南裂谷系, 华南陆区被分割为“北台地、中坳垒、南裂谷海盆”构造格局和复杂的沉积环境<sup>[1]</sup>。目前, 对早古生代化石地层划分研究程度较高, 但对晚青白口世晚期—震旦纪地层与沉积矿产层位(序)研究存在不同的认识, 特别是鄂、赣、皖、浙、川、滇、湘、桂、黔南华冰期的期次、南华系底界划分存在分歧。近期, 虽然南华加里东期造山带元古宙地层划分对比取得了较大进展, 但仍存在一些问题。2013年以来, 笔者等在“华南洋—滨太平洋构造演化与成矿”项目研究中, 在前人工作的基础上, 运用区域标志地层与沉积成矿事件, 结合已有的同位素测年资料, 对上述地层作了进一步对比研究, 在基本厘清了地层、矿层沉积序列的基础上, 认识到该区大规模沉积成矿作用发生在南华间冰期—冰后期, 是一场沉积成矿大爆发事件, 此时还发生了生物大爆发, 冰球事件导致的环境效应和构造格局控制着区

域沉积成矿规律, 现提出与同行们探讨。

## 1 晚青白口世晚期—早古生代区域构造-沉积特征

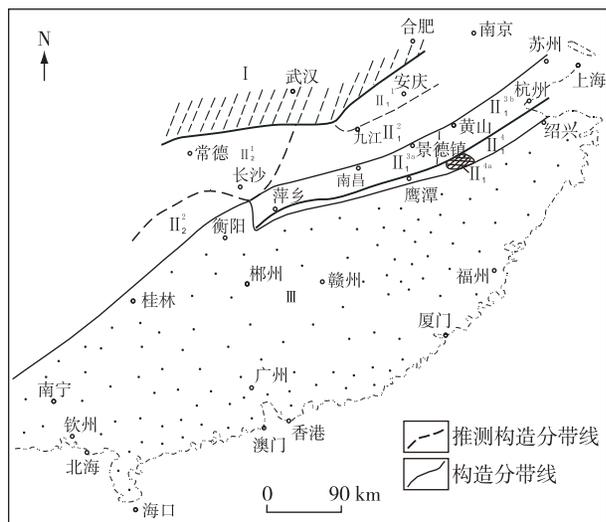
华南晋宁期扬子陆块东南部与华夏陆块在晚青白口世晚期裂解, 形成华南裂谷系复杂的构造格局和沉积环境。裂谷系北侧为相对稳定的中、下扬子地块, 以台盆沉积为主; 南部为南华裂谷海盆, 以海相沉积为主; 北部为江南—信(江)钱(塘)区, 经历坳垒、裂谷和台盆构造沉积环境; 东部皖浙赣区由下扬子、江南东段、钦杭北段、信江—钱塘等构造沉积带组成, 在晚青白口世晚期强烈伸展, 形成以钦杭裂谷海槽为中轴的火山坳垒区(图1)。

青白口纪末(~780 Ma), 经休宁运动, 钦杭裂谷海槽东部闭合, 成为坳拉谷, 除乐平以西仍处于裂谷海槽外, 皖浙赣区信江—钱塘、钦杭带东部、江南东段、下扬子区连为一体, 形成“东北高、西南向海”的以浅海台地为主的沉积环境; 西部湘桂黔区, 晚青白口世晚期处于南华裂谷海盆西北缘斜坡带,

\* 收稿日期: 2019-09-19 修订日期: 2019-11-08 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 中国地质调查局“《中国矿产地质志》(编号: DD20160346)”子项目“华南洋—滨太平洋构造演化与成矿”项目资助。

第一作者简介: 杨明桂, 1933年生, 男, 教授级高级工程师, 主要从事区域地质调查、矿产勘查和科研工作。



I. 中下扬子北区; II. 江南—信(江)钱(塘)区; II<sub>1</sub>. 皖浙赣区; II<sub>1</sub><sup>a</sup>. 长江下游带; II<sub>1</sub><sup>b</sup>. 江南东段; II<sub>1</sub><sup>3a</sup>. 钦杭带中段; II<sub>1</sub><sup>3b</sup>. 钦杭带东段; II<sub>1</sub><sup>4</sup>. 信江—钱塘区; II<sub>1</sub><sup>4a</sup>. 广丰微陆块; II<sub>2</sub>. 湘黔桂区; II<sub>2</sub><sup>1</sup>. 江南西段带; II<sub>2</sub><sup>2</sup>. 雪峰带; III. 南华裂谷海盆

图1 华南陆区晚青白口世晚期—早古生代构造-沉积分区略图

Fig. 1 Structural-sedimentary division map of the late Qingbaikou to Early Paleozoic in South China

北部为江南西段“红板溪”斜坡,南部为雪峰“黑板溪”斜坡。青白口纪末,皖浙赣区转化为台盆时,湘黔桂区伸展,形成南华纪坳垒构造(图2)。

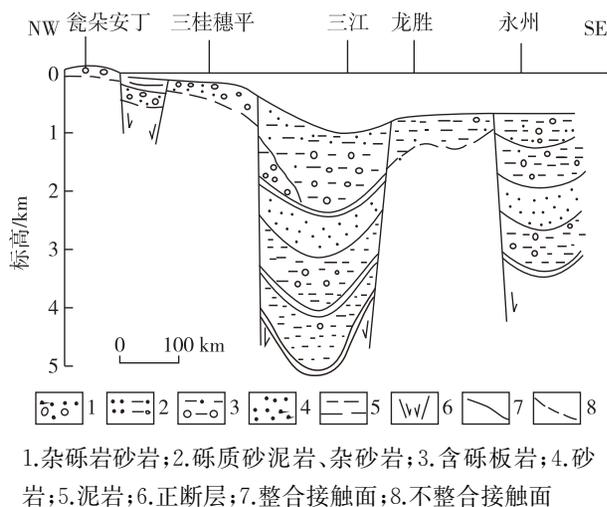


图2 早南华世湘黔桂地区地堑型盆地横剖面图<sup>[2]</sup>

Fig. 2 Cross section of graben basins in the Hunan-Guangxi-Guizhou area during early Nanhua period<sup>[2]</sup>

## 2 华南北部新元古代晚期地层对比

在武夷—云开北西地区,华南地区新元古代晚期地层基本成层有序,但是各地区的时代划分不同。武夷—云开一带由于广泛出露加里东期造山带,其下部和根部岩层变质较深,构造复杂,多为构造岩片堆叠式构造混杂结构,新元古界包括造山带根部出露的古元古界,层序与时代划分存在较多分歧。笔者在前人工作的基础上,通过综合研究,将华南北部新元古代晚期地层和华南南部元古宙地层进行划分(表1,表2)。

需要说明的是,华南地区长期以来以南华冰期前的莲沱组、澄江组和与之相当的地层作为南华系下统,只有湘黔桂地区以长安冰期地层作为南华系底界,或以富禄组与莲沱组相当。全国地层委员会将2014年版中国地层表存在争议的南沱组、大塘坡组、古城组置于富禄组之上,以长安组为下统,与国际成冰组对接,但对莲沱组层位如何处理未见说明。笔者认为问题的关键是华南南华纪是2个冰期还是3个冰期? 扬子地区以莲沱组为代表的第一沉积盖层是冰期前还是冰期—间冰期地层? 在上述问题尚未取得共识的情况下,笔者暂以莲沱组和与之相当的地层为南华系下统。现根据地层特征,分区进行划分、对比。

## 3 晚青白口世晚期地层层序

晚青白口世晚期(780~815 Ma)地层习惯上称“红板溪”地层,在上扬子地块东部仅零星出露于鄂北,称马槽园组、花山组,岩性主要为砾岩、砂砾岩、白云岩。该期地层在华南裂谷系广泛发育,北部裂陷区形成准盖区,南华裂谷海盆区形成加里东期褶皱。由于各地构造背景与沉积环境不同,岩性差异较大,可大致分为“红板溪”型地层、“钦杭裂谷”型地层和“黑板溪”型地层。

### 3.1 “红板溪”型地层

“红板溪”型是一套紫红色陆相地层,主要分布在江南—信(江)钱(塘)地区,湘北为“红板溪”命名地,由横路冲组、马底驿组和通塔湾组构成,以紫红色马底驿组为标志地层,局部底部出现宝林冲组火山角砾岩或横路冲组砾岩。

表 1 华南北部新元古代晚期地层划分对比<sup>[3]</sup>

Table 1 Stratigraphic correlation of the late Neoproterozoic strata in northern South China<sup>[3]</sup>

Table with columns for geological periods (震旦纪, 南华纪, 青白口纪) and regional units (中扬子, 下扬子, 江南, 钱(塘)—信(江)). Rows show stratigraphic units like 灯影组, 皮园村组, 陡山沱组, etc., with corresponding ages in Ma.

表 2 华南南部元古宙地层划分对比<sup>[3]</sup>

Table 2 Stratigraphic correlation of the Proterozoic strata in southern South China<sup>[3]</sup>

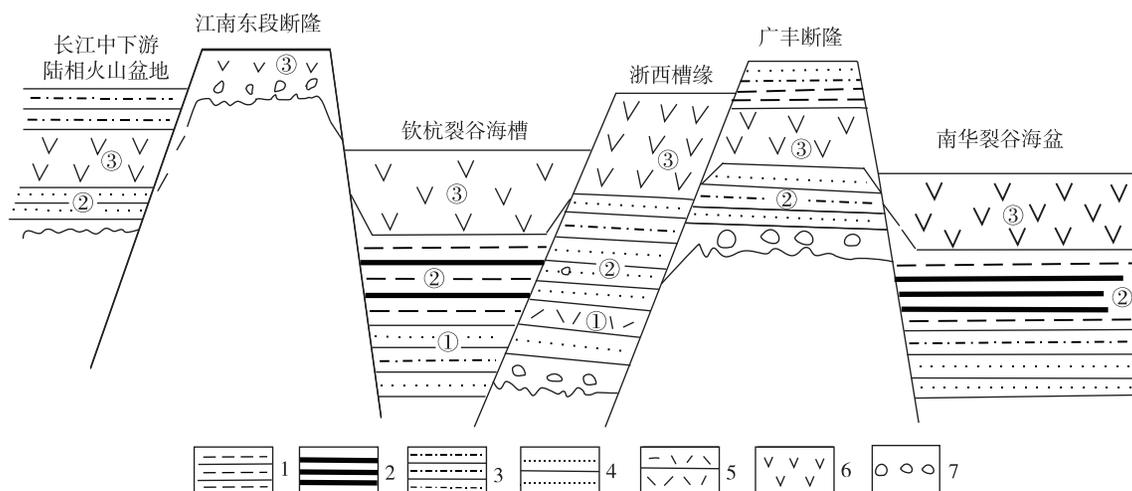
Table with columns for geological periods (震旦纪, 南华纪, 青白口纪) and regional units (双峰, 湖南, 罗霄山, etc.). Rows show stratigraphic units like 牛蹄塘组, 香楠组, 牛角河组, etc., with corresponding ages in Ma.

▼ 硅钙层 ○ 含磷、含锰层 △ 冰积或似冰积砾岩层 ▲ 磁铁矿石英岩层 C 含碳石墨质层 v 含海相火山岩层

皖浙赣地区,该期地层受壑垒构造控制(图 3),是以紫红色为主的陆相碎屑-火山沉积。长江中下游地区被较新地层覆盖,晚青白口世晚期地层零星出露于赣北庐山(汉阳峰组)和都昌(马涧桥组),在皖南石台、祁门、休宁一带分布较广,称为历口群。当时江南东段为断隆,仅在修水—武宁复向斜南翼有一小块落可崇组,广丰微陆块为钦杭裂谷南侧的

小断隆,发育一套底砾岩、钾玄岩系列火山碎屑岩,称为广丰群。

上述“红板溪”型地层除了广丰群不整合于中元古代田里岩组之上以外,其他地层均不整合覆于青白口系上统下部晋宁期褶皱基底之上,其上被早南华世莲沱组或与其相当的砂(砾)岩覆盖。马涧桥组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 823 Ma 和



①. 骆家门期地层; ②. 虹赤村期地层; ③. 上墅期地层; 1. 泥岩; 2. 碳质泥岩; 3. 粉砂岩; 4. 砂岩; 5. 火山凝灰质砂岩; 6. 火山岩; 7. 砾岩

图3 皖浙赣晚青白口世坳垒区结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of graben horst area in Anhui, Zhejiang and Jiangxi during late Qingbaikou period

729 Ma<sup>[4]</sup>, 广丰群桃源组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $818 \pm 12$  Ma<sup>[5]</sup>, 宝林冲组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $827$  Ma<sup>[6]</sup> 和  $814 \pm 12$  Ma<sup>[7]</sup>。

### 3.2 “钦杭裂谷”型地层

钦杭裂谷是华南裂谷系 1 条主干裂谷带, 具有复杂的沉积发展过程, 是“红板溪”型地层与“黑板溪”型地层的过渡。由于大部分地层被构造叠覆, 或被新地层覆盖, 北段长期被认为是江南古陆或古岛。现查明, 该带在晚青白口世晚期沿钦杭古板块结合带及其旁侧(包括信—钱地块)分布, 为 1 条裂谷海槽。由早到晚, 浙皖赣地区海槽总体由深到浅, 最后闭合成陆。早期, 以深海沉积为主, 赣东北登山群下部高山组为青灰色、深灰色相间的含凝灰质条纹状深海浊积岩, 与皖南昌前组相当, 均未见底。在浙西裂谷槽缘为河上镇群下部骆家门组, 不整合于上青白口统下部双溪坞组之上, 属于由浅到深的海相沉积。中期, 海水变浅, 赣东北拔竹坑组自下而上为紫红色砾岩、灰色板岩、基性-中酸性火山岩, 与皖南周家村组、井潭组下部相近, 浙西虹赤村组为复陆屑杂砂岩。晚期, 赣东北登山群上部叶家组、浙西上墅组均以浅滨海相双峰式火山岩为主, 其上被南华系下统莲沱组或休宁组平行不整合覆盖。上述早、中期地层近似于“黑板溪”型地层岩性特点, 晚期近似于“红板溪”型地层岩性特点, 骆家门组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $832 \pm 6$  Ma

和  $791 \pm 15$  Ma, 虹赤村组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $807$  Ma<sup>[8]</sup>, 上墅组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $766 \pm 5$  Ma<sup>[9]</sup>。

钦杭裂谷在赣西被较新的地层覆盖, 根据残留在上高一带的下南华统次深海浊积相漫田岩片推测, 晚青白口世晚期—震旦纪可能为深海-次深海环境。钦杭裂谷南段已进入南华裂谷海盆, 在湘南桂阳一带局部出露大江边组灰色、灰黑色板岩夹白云质大理岩, 整合覆于中南华世泗州山组冰期地层之下, 归于“黑板溪”型地层<sup>[10]</sup>。根据层位特点, 推测其可能为早南华世地层, 与赣南上施组含白云岩层位相当, 尚需进一步研究。值得一提的是, 笔者发现湖南双峰高涧群剖面整合于石桥铺组之下的“冷家溪群”浅变质碎屑岩, 其层位可能相当于钦杭裂谷带高山组或昌前组。因此, 通过“整合现象”认为该区未发生晋宁运动的观点是值得商榷的。

### 3.3 “黑板溪”型地层

与“红板溪”型地层不同, “黑板溪”型地层是以浅变质灰色为主含灰黑色组段的海相沉积, 分布于南华裂谷海盆北部, 与南华系分界存在不同认识, 笔者拟在下文与南华系底界问题一同探讨。

湘中高涧群主要为一套灰色碎屑岩, 下部石桥铺组底部含火山角砾岩, 在隆回一带不整合于青白口系上统下部雷神庙组之上, 中部黄狮洞组夹大理岩, 上部砖墙湾组含灰黑色板岩。黔东南、桂东北

下江群、丹洲群不整合于青白口系下部梵净山群和四堡群之上,自下而上由含钙(甲路组、白竹组)、灰黑色(乌叶组、合桐组)和含火山岩(清水江组、三门街组)组成。赣中南潭头群下部神山组下段浒岭段为灰绿色浊积岩,上段为“黑神山段”,以灰黑色含碳千枚岩为主,上部库里组以凝灰质千枚岩为主,含石英角斑岩夹层。

上述各群以“下黑上火”标志大致可比,下江群 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $814 \pm 12 \text{ Ma}$ <sup>[6]</sup>、黄狮洞组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $828 \pm 10 \text{ Ma}$ <sup>[10]</sup>。

### 4 南华纪—震旦纪地层层序

#### 4.1 皖浙赣地区

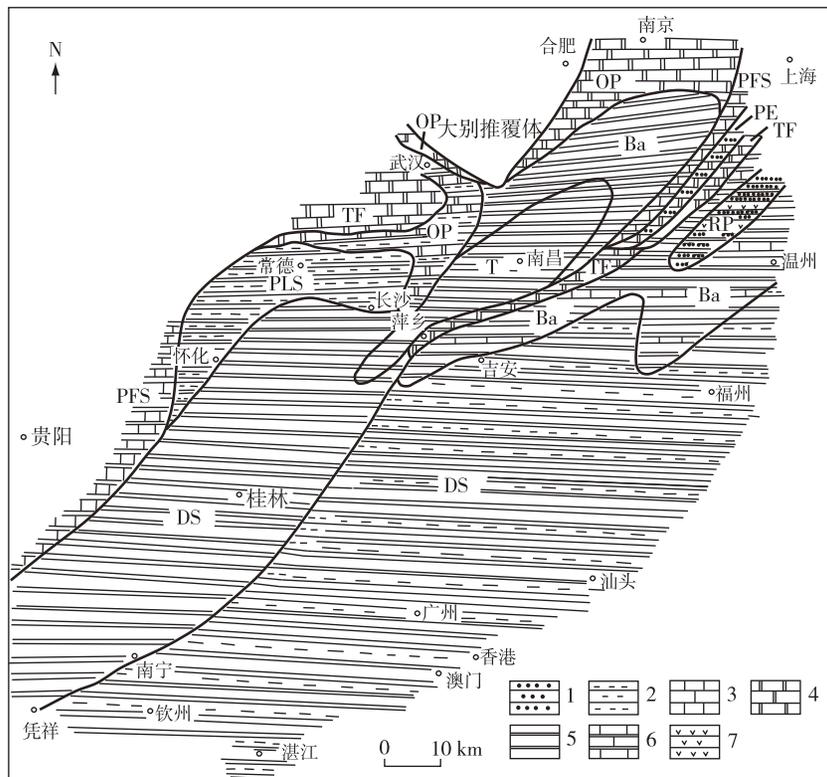
该区南华系—震旦系主要为陆表海沉积,与“红板溪”地层分布基本一致,以三峡序列为标准,与晚寒武世黑色页岩分界。上震旦统分为以碳酸盐岩为主的灯影组和以硅质岩为主的皮园村组、留茶坡组(图 4),下部含磷,上部产滑石,为埃迪卡拉

生物群形成期。早震旦世陡山沱组中下部为含锰碳酸盐岩层,上部为含磷层,出现瓮安生物群。南华系上统为南沱组冰碛层,中统为间冰期大塘坡组、古城组冰碛层,下南华统为莲沱组或休宁组砂岩,层序清楚,厚度不大。其中,冰期地层一般厚数十米,赣北彭山矿区坑道揭露厚度仅约 3 m。该区浅海相间冰期地层为含锰碳酸盐岩、碳质泥岩,陆相间冰期地层主要为厚度不大的灰黑色泥砾岩。

赣中南、闽西南、粤东北南华裂谷海盆的南华系、震旦系以赣中为代表,称杨家桥群,上震旦统为老虎塘组硅质岩,下震旦统为坝里组砂泥质碎屑岩,在宜黄—金溪一带含磷块岩薄层。南华系下统为上施组变质砂岩、凝灰质粉砂岩、板岩,中—上统下坊组下段古家组以含冰筏落石沉积为特征,厚度极不稳定;中段为间冰期沉积,下部为“新余式”磁铁石英岩,在区域上可相变为硫铁矿层,其上为灰黑色碳质泥岩夹碳酸锰薄层;上段大沙江段为沉凝灰岩、板岩。

#### 4.2 湘桂黔地区

该区震旦系划分与鄂皖赣浙地区基本相同。



1.砂岩;2.泥岩、粉砂岩;3.灰岩;4.白云岩;5.硅质岩;6.灰岩、硅质岩;7.火山岩;DS.深海裂谷盆地;Ba.次深海裂谷盆地;OP.开阔浅海台地;TF.潮坪;PFS.台缘斜坡;PE.台地边缘浅滩;PLS.台前斜坡;T.后期推覆体;RP.浅海水下隆起

图 4 华南陆区晚震旦世岩相古地理略图<sup>[11]</sup>

Fig. 4 Sketch map of lithofacies and paleogeography of the late Sinian in south China<sup>[11]</sup>

早南华世,该区发生强烈伸展作用,形成了堑垒带(图4),沉积岩相厚度变化较大,时代划分对比存在的问题也较多。

笔者认为,湘北江南地块北区南华系与鄂皖浙赣地区完全可以对比。南华冰期地层之下现归于“板溪期”溧水河组,张家湾组岩性层位均与下南华统莲沱组相当,其上为中一晚南华世古城组、大塘坡组、南沱组。溧水河组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 726~788 Ma<sup>[10]</sup>,江南地块南部“红板溪”区五强溪组—牛牯坪组也与莲沱组相当,宜归于下南华统。

湘桂黔南华纪地堑区南华系沉积巨厚,卢定彪等<sup>[12]</sup>研究表明,黎家坡组可与南沱冰期地层对比。长安组为南华纪第一冰期,分“下、间、上”3个岩段。富禄组间冰期地层自下而上分为铁质岩段、砂岩段、古城冰段、大塘坡(含锰白云岩)间冰段。笔者认为,该区冰段划分有助于冰期地质进一步研究。富禄组“下铁上锰”与南华裂谷海盆区赣中下坊组可以对比。该期气候冷暖波动较大,但古城冰段、大塘坡间冰段并不相当于华南地区古城组与大塘坡组,即大塘坡组相当于富禄组,只是扬子—钱塘区缺少“下铁”,一般认为与海底火山活动微弱、缺少铁质有关。古城组相当于长安组,其下的隆里组与莲沱组相当,如此可以取得华南地区冰期划分的统一,也可与全球玛利诺和斯图特冰期对比。

## 5 武夷—云开及其东南侧元古宙构造岩石地层

武夷、云开隆起历经多期隆升剥蚀,出现加里东期造山带下-根部,暴露出古元古代结晶基底残块,新元古代晚期地层变质较深,或遭受混合岩化与韧性剪切变形,多处形成构造岩片堆叠或构造混杂地层。该带东南侧白垩纪火山岩广泛分布,新元古代晚期地层零星出露,给地层划分及对比造成较大困难,迄今仍有较多不同认识。笔者通过对比研究华南地区新元古代晚期有序地层和构造岩石地层的整体性,发现了一系列具有区域对比意义的标志层序,且发现其中主要沉积(变质)矿(化)层也具有较好的对比意义。由早至晚,序列为“板溪期”“砾、钙、黑、火”、南华纪“砂、下冰、间冰、铁、碳、钙、锰、上冰”、早震旦世“锰、磷”、晚震旦世“钙、铁或硅”,上与早寒武世碳质(或石墨)层分界,结合已有同位素年龄对该区元古宙地层进行归时、归序。

### 5.1 北武夷—会稽加里东期造山带前缘地带

加里东造山期,该带沿萍乡—绍兴断裂带向内陆逆冲推覆拼贴,自西段武功山到会稽山,新元古界—下古生界地层变质、变形不断增强,在浙南、闽北出露造山带根部。自西向东,出露岩层由中深变质区向深变质区过渡。

#### 5.1.1 赣东北弋阳县周潭—洪山地区

该区位于北武夷西部,新元古代晚期地层为中深变质岩<sup>[3]</sup>。中南华世—震旦纪洪山组下部有间冰期“新余式”磁铁矿层,经此东延至上饶南部,铁矿层上下有相当于“下冰”与“上冰”的不稳定砾岩层。该组上部为变质碎屑岩和白云岩,邻区发现了磷块岩层,应属下震旦统;顶部为石英岩、硅质板岩,应属上震旦统,与早寒武世外管坑组碳硅质层分界。洪山群之下为万源组,以低角闪岩相变粒岩、片岩为主,基本成层有序,原岩为砂岩、泥岩,夹中酸性火山岩和含钙泥砂质地层,时代为早南华世。万源组之下的周潭岩组以角闪岩相片麻岩为主,含斜长角闪岩、绿帘绿泥片岩和阳起绿泥片岩,原岩为陆屑浊积岩夹中基性、中酸性火山岩和含碳酸盐岩薄层,韧性剪切变形发育,未见底,应属“板溪期”地层。

#### 5.1.2 闽北地区

该区出露加里东期造山带下-根部,下古生界几乎剥蚀殆尽。古元古代结晶基底岩片出露较多,新元古代晚期地层出露较广,构造复杂。

(1)古元古代—新元古代早期地层。古元古代天井岩组出露于闽赣交界建宁—广昌地区,被加里东期花岗岩围绕。麻源岩群大金山岩组出露较广,见于浦城、建阳、建瓯等地区,岩性以变粒岩和片岩为主,夹斜长角闪岩、石英岩,混合岩化发育,以含石墨层为特征。天井坪岩组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $1\ 766 \pm 19\ \text{Ma}$ <sup>[13]</sup>、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $1\ 776 \pm 16\ \text{Ma}$ ;大金山岩组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $2.34 \sim 1.8\ \text{Ga}$ <sup>[14]</sup>,侵入于天井坪岩组上坪变英云闪长岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $1\ 714 \pm 20\ \text{Ma}$ <sup>[15]</sup>。陈润生<sup>[16]</sup>在大金山岩组中发现了吕梁期花岗岩,其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $1\ 879 \sim 1\ 841\ \text{Ma}$ 。天井坪岩组 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $733 \pm 10\ \text{Ma}$  和  $680.5 \pm 9.7\ \text{Ma}$ ,大金山岩组 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $887 \sim 827\ \text{Ma}$ 。据此分析,天井坪岩组和大金山岩组结构复杂,主体应属古元古界,年轻年龄值是受后期构造影响还是受混入新的地层影响?这有待进一步研究。

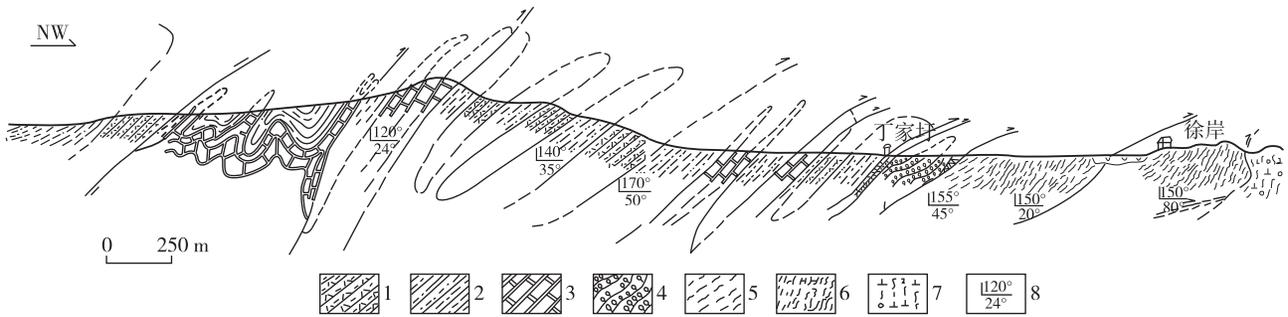
麻源岩群上部南山岩组和局部出露于南平地区的迪口岩群也以变粒岩和片岩为主。南山岩组锆石 U-Pb 年龄为  $859.1 \pm 9.2$  Ma 或  $783 \pm 31$  Ma<sup>[17]</sup>,迪口岩组 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $0.8 \sim 1$  Ga<sup>[18]</sup>,时代暂归于中元古代晚期—新元古代早期。

(2)新元古代晚期地层。闽西北万全岩群时代多变,《中国区域地质志·福建志》<sup>[17]</sup>将其归于青白口纪—南华纪。该群岩性主要为变粒岩和片岩,夹“宝石组”碳酸盐岩层、石墨片岩、砾岩层,下未见底,上以断层与震旦纪西溪组分界。韧性剪切构造发育,层序尚未理顺,其下部黄潭组变粒岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $787 \pm 24$  Ma<sup>[17]</sup>, SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $728 \pm 8$  Ma<sup>[14]</sup>,主体时代暂归于南华纪,可能夹震旦纪岩片。北武夷地区震旦纪楼前组为以流纹质为主的大型火山岩楔,锆石 U-Pb 年龄为 665 Ma,晚震旦世西溪组以碎屑沉积岩为主,夹少量硅质岩<sup>[17]</sup>,与南华裂谷海盆上震旦统为硅质层不同,表明该区晚震旦世海水较浅。西溪组沉凝灰岩锆石 U-Pb 年龄为 643 Ma<sup>[19]</sup>。

5.1.3 浙南地区

古元古代地层为八都岩群,岩性为变粒岩、片

岩、石英岩含石墨片岩,年龄为  $2\ 080 \sim 1\ 870$  Ma<sup>[20]</sup>。侵入该地层的淡竹花岗岩年龄为  $1\ 837 \pm 67$  Ma<sup>[21]</sup>。新元古代地层为陈蔡岩群,高林志等<sup>[22]</sup>获得斜长片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $848 \pm 10$  Ma 和  $845 \pm 9$  Ma。包超民等<sup>[20]</sup>获得片麻状副片麻岩中的变辉长岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 1 780 Ma,应属混入八都岩群的构造小岩片。该群地层序列的划分各有不同,水涛等<sup>[23]</sup>对诸暨丁家坞陈蔡岩群地质剖面研究表明,这是一套遭受角闪岩相变质的叠加褶皱与堆叠构造岩片,层序混杂,岩层重复(图 5),两次出现的含大理岩层段应为同一地层的重复。笔者依次与弋阳县周潭剖面进行对比,初步整理出 3 个岩组(图 6),剖面下部徐岸岩组片麻岩相当于晚青白口世周潭岩组,剖面中部变粒岩、片岩、角闪片岩相当于早南华世万源组。丁家坞一带下河图岩组以含大理岩为特征,底部变质杂砾岩成分复杂,分布广,厚数米至二十几米,该组含石英岩、磁铁石英岩和石墨石英片岩,均为南华裂谷海盆中—晚南华世长安下冰碛与富禄间冰期的沉积层标志,与弋阳洪山组相似,可能还包含震旦纪地层。



1.黑云斜长角闪片岩;2.变粒岩、长石石英片岩、二云石英片岩、二云变粒岩;3.含角闪石大理岩、透辉橄榄大理岩、白云质大理岩;4.含砾黑云石英片岩、黑云石英砾岩;5.砂线黑云斜长片麻岩、石榴黑云斜长片麻岩;6.糜棱岩、千糜岩;7.片理化石英闪长岩;8.产状

图 5 浙江诸暨丁家坞陈蔡岩群构造剖面<sup>[23]</sup>

Fig. 5 Structural section of Chencai rock group in Dingjiawu, Zhuji, Zhejiang<sup>[23]</sup>

5.2 闽中南地区

闽中马面山岩群为一套绿片岩、高绿片岩相构造岩片堆叠岩层,岩片堆叠序列经多次变化<sup>[17]</sup>,自下而上分为东岩岩组、大岭岩组和龙北溪岩组。

(1)东岩岩组。主要由(斜长)角闪片岩、阳起片岩、角闪绿帘片岩及少量云母斜长变粒岩、石英岩、透辉石岩组成。绿片岩类岩石原岩为(中)基性

火山岩,云母斜长变粒岩原岩为砂泥质岩,透辉石岩原岩为泥灰岩。东岩岩组为夹砂泥质、泥灰质碎屑岩的中基性-基性火山岩建造,为海底火山热水喷流沉积铅锌矿床(梅仙式)的主要层位,也是华南青白口纪晚期的一个重要成矿事件。

(2)大岭岩组。以变粒岩为主,夹少量浅粒岩、片岩、石英岩、透辉石岩等,为砂泥质夹泥灰质碎屑

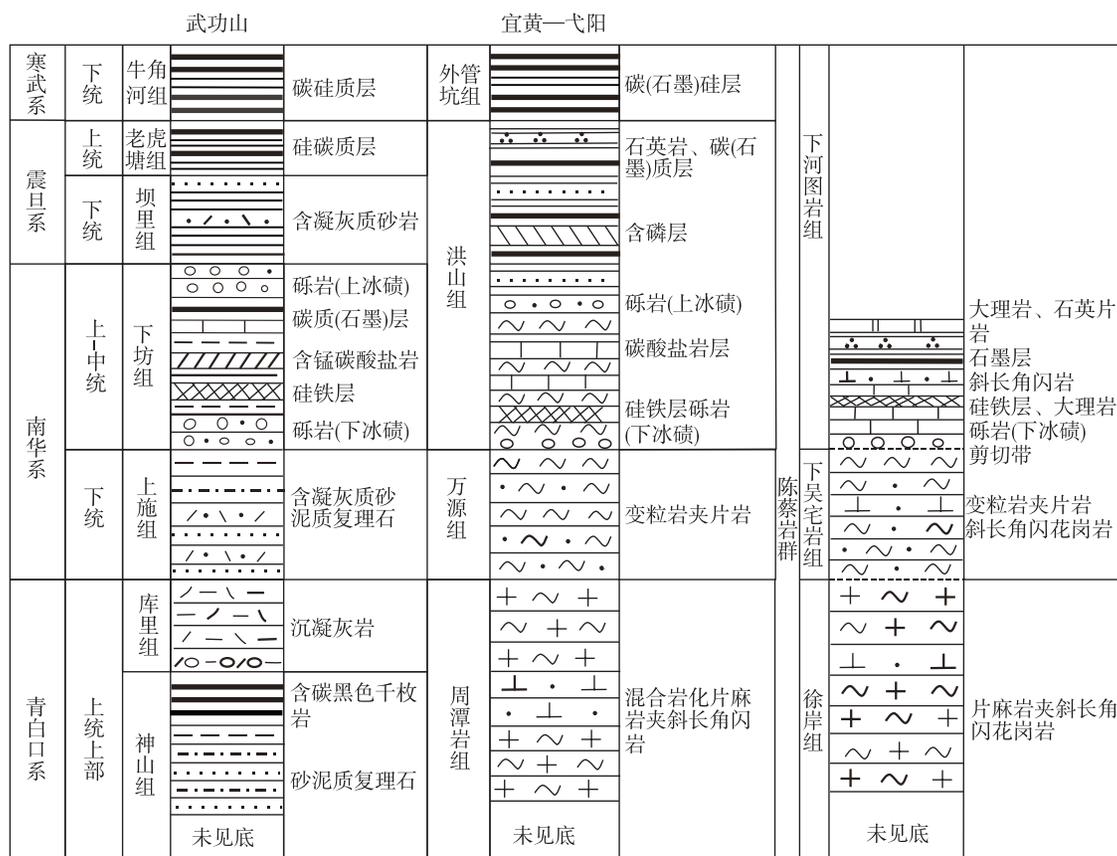


图6 加里东期造山带北缘青白口系上统上部—震旦系对比图

Fig. 6 Comparison of the upper Upper Qingbaikou System and Sinian System in the northern margin of Caledonian orogenic belt

岩及中酸-酸性火山岩建造,为金矿源层。

(3)龙北溪岩组。由云母(石英)片岩、云母(斜长)变粒岩及少量黑云母二长变粒岩、二云钠长变粒岩、角闪斜长变粒岩、绿片岩、石英岩、大理岩、白云岩、钙镁硅酸盐岩组成,夹磁铁石英岩、滑石石英岩、微晶石墨层、含磷层,为铅锌矿床的次要含矿层位。

综上所述,东岩火山岩、大岭变粒岩组、龙北溪含硅、磷、钙、镁、碳、铁、磷层位可依次与区域地层序列的青白口系上部、下南华统、中—上南华统一震旦系相比。

闽西南地区变质的南华系称楼子坝组,为由灰绿色变质砂岩、千枚岩、板岩组成的韵律层,夹碳酸盐岩层,上部见硅质岩层。早震旦世南岩组或三溪寨组为千枚岩、变质砂岩夹薄层硅质岩,偶夹灰岩、黄铁矿层,上部夹磷块岩条带;晚震旦世黄连组或龙头组主要为硅质岩,夹变质砂岩、千枚岩、板岩,

地层标志明显。

闽西南桃溪岩组出露在会昌环形构造中心部位,曾归于古元古界,东部进入赣西南称寻乌岩组,岩性为变粒岩、片岩夹石英岩,钻孔还见碳酸盐岩夹层,有混合岩化。王丽娟等<sup>[24]</sup>及于津海等<sup>[25]</sup>认为其时代晚于615 Ma。张爱梅等<sup>[26]</sup>获得该区花岗片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为491~496 Ma,结晶年龄为641~657 Ma和799 Ma,确定成岩年龄约为600 Ma。结合岩性特点,其时代暂归于晚南华世—震旦纪,属加里东期造山带下部深变质地质体。

### 5.3 云开地区

该区为加里东期造山带的根-下部带,青白口纪晚世晚期—震旦纪地层称为云开岩群。该套地层虽变形变质强烈,地层序列有待进一步厘清,但划分的4个岩组大多有明显标志,区域上可对比。自下而上,罗罨组以石英云母片岩、含石榴石石英云

母片岩、十字石片岩为主,夹阳起绿帘石岩、斜长角闪岩、变基性火山岩、阳起透闪透辉石岩;丰垌口组为含碳质浅变质的长石石英砂岩、粉砂岩、千枚岩;兰坑组以石英云母片岩、云母石英片岩为主,夹长石石英砂岩,中上部夹条带状赤铁矿,含铁石英岩及白云质大理岩透镜体;沙湾坪组为浅变质砂泥质碎屑岩,底部以微粒石英岩为标志,中间夹黑色含碳质云母片岩及底层硅质岩。从岩性上进行对比,发现兰坑组为以铁、大理岩为标志的南华纪冰期地层,沙湾坪组以碳质、硅质层为标志,应为震旦纪地层,丰垌口组以含碳为标志,可能属“黑板溪”层位,与罗罉组均为晚青白口世晚期地层。云开地区西部天子堂一带为加里东期以来多期次花岗岩活动和造山带根部中心,变质作用强烈,其中天子堂群获得古元古代同位素年龄<sup>[27]</sup>,其时代需进一步研究。

### 6 南华间冰期与冰后期大规模沉积成矿作用

通过新元古代晚期区域标志地层、含矿层划分对比,进一步梳理南华间冰期与冰后期震旦纪—早寒武世沉积成矿事件链与大规模沉积成矿作用,发现该期形成了大量铁、锰、磷、滑石、铀、钒、重晶石、页岩气(或石墨)等矿床(图 7),是一场与冰球事件密切相关的沉积成矿大爆发和生物大爆发事件。

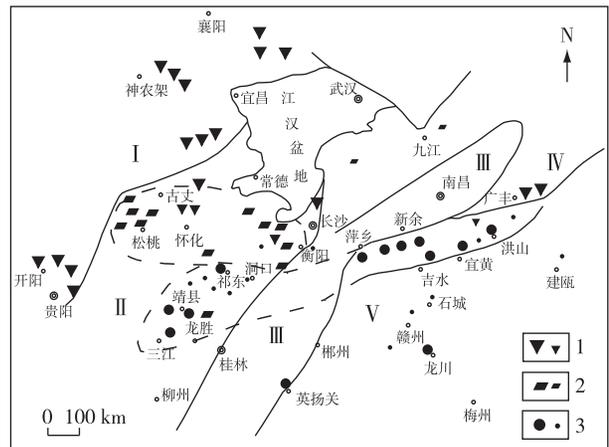
#### 6.1 中南华世间冰期“下铁上锰”成矿事件

(1)南华间冰期早期硅铁质沉积广泛分布于华南海南部的南华裂谷海盆区,北缘湘中—赣中是最重要的铁矿带,大致呈近 EW 向展布,长约 900 km,湘中以赤铁矿为主,称江口式,赣中称新余式,以磁铁石英岩为主。此外,桂东英扬关、粤东龙川、粤北连山、赣南兴国、石城等地区与闽中龙北溪岩组也有同期中小型铁矿床(点)分布。浙西南龙泉青坑铁矿也可能属于“新余式”铁矿。

(2)华南地区广泛分布南华间冰期晚期含锰碳酸盐沉积,在湘桂黔地区南华纪坳垒区形成了巨大的锰成矿区,在松桃—古丈、小茶园、万山—芷江、黔阳—芷江等地坳带形成一批大型、超大型锰矿床。在江南东段修水、彭泽、赣中新余铁矿田也见该期含锰碳酸盐岩层,风化后形成锰帽,局部可采。

#### 6.2 雪球事件碳酸盐岩帽锰磷滑石成矿事件

南华冰期后早震旦世陡山沱组为黑色页岩、钙



I. 扬子台盆锰、磷成矿区; II. 湘桂黔斜坡带锰、铁、磷成矿区; III. 钦杭裂谷带; IV. 广丰微陆块磷矿田; V. 东南裂谷海盆; 1. 早震旦世陡山沱组沉积型磷矿床(点); 2. 中南华世大塘坡间冰期沉积型锰矿床(点); 3. 中南华世富禄组、下坊组间冰期沉积-变质型铁矿床(点)

图 7 华南裂谷系南华间冰期—早震旦世铁、锰、磷沉积矿产分布略图

Fig. 7 Distribution of iron, manganese and phosphorus deposits of Nanhua interglacial to early Sinian in rift system of South China

质碳酸盐岩建造,底部或中部含锰碳酸盐岩层分布较广,在湖南沅陵等地区有锰矿床,该组为华南次要含锰地层。但华南是全国最重要的含磷地层,在稳定性较好的扬子陆块滇黔湘鄂地区形成一批大型、超大型磷矿床。在下扬子地区,南华裂谷海盆含磷层分布较广,尚未发现工业矿床。在残留的广丰微陆块形成了震旦纪磷、滑石矿田,在陡山沱组底部有含锰碳酸盐岩层、陡山沱组上部含磷层形成大型磷矿田,灯影组形成超大型黑滑石矿田。纵观华南地区,上震旦统碳酸盐岩建造灯影组是其下陡山沱组的富磷标志,硅质建造之下的下震旦统一般仅有磷矿化层。

#### 6.3 始—早寒武世铀、钒、镍、铜、硒、重晶石、磷、页岩气、碳质(石墨)泥岩沉积成矿事件

该期碳质泥岩成矿作用主要发育于扬子陆块南部台盆与陆缘斜坡地带,铀、钒矿分布较广,铜、镍、硒、钼局部富集,是页岩气的重要目的层位,底部常含磷结核或薄层,在川黔鄂地区已获找气突破。南华裂谷海盆底—下寒武统碳硅泥岩普遍发育,发现少量铀矿床(点),钒矿化一般较贫,是重晶石成矿层位,底部常见重晶石结核。在福建永安李

坊有大型重晶石矿床,是晶质石墨的重要成矿地层,资源潜力较大。

纵观南华间冰期与冰后期大规模沉积成矿作用,呈现“铁-锰-磷-碳”序列与由南向北、由活动区向稳定区迁移、由硅铁质建造向含锰磷镁质碳酸盐岩建造演化的趋势,构成“南铁、中锰、北磷”成矿分区的总体格局,其成矿与海底火山活动、古构造、古地理、古气候环境演化密切相关。

青白口纪晚期一早南华世为华南裂谷系强烈扩张期,海底火山活动频发。新余式磁铁矿石中钒、镍、铬、钴、镁、钛含量均较高<sup>[28]</sup>,说明火山物质源自上地幔或下地壳火山作用,使海水中铁、锰、硅、镁等离子浓度升高。南华间冰期,气候炎热,伴随局部海底火山活动,海水增温,微古生物繁盛,在早期氧化环境下,沉积硅铁质建造,在盆地还原环境形成硫铁矿床。间冰期晚期,在温暖、富碱、弱氧化海水中,广泛沉积页岩和含锰白云岩建造,皖浙赣(北)地区海水浅,对成锰不利,仅有小型锰帽矿床(点)。南华裂谷海盆含锰白云岩层较薄,在黔湘斜坡坳垒区形成“大塘坡式”锰成矿区,以早南华世地坳带成矿最有利。

南沱冰期后,气候再次变暖,海水升温,生物再次繁衍。早震旦世、晚震旦世晚期至寒武纪先后出现瓮安生物群、埃迪卡拉小壳生物群和澄江生物群,从震旦纪早世至始一早寒武世,沉积含磷、镁,主要分布于构造环境较稳定的扬子台盆区,以早震旦世陡山沱组“开阳式”磷矿最重要。独特的是,在广丰微陆块也形成了“朝阳式”磷矿床,并在震旦系上统形成“溪滩式”黑滑石矿床。

始一早寒武世,华南出现生命大爆发,形成广泛分布的含磷、重晶石、碳质黑色页岩建造,其中沉积吸附大量钒、铀、铜、镍、银、硒等金属元素,以钒、铀分布最广,主要发育在扬子陆块与南华裂谷海盆之间的斜坡地带,其中引人关注的页岩气资源主要分布于中上扬子地块。下扬子与信一钱地块受构造岩浆活动影响,下寒武统不同程度发生低级变质作用,不利于烃类保存,而东南加里东期造山带下寒武统主要形成晶质石墨。

## 7 结 论

(1)晚震旦世,华南北部为以灯影组为代表的

代表的硅质岩建造。早震旦世有重要的含磷建造,是区域地层划分对比的重要标志。

(2)晚南华世是以南沱组为代表的“上冰碛层”,中南华世晚期间冰期北部以大塘坡组为代表,南部以富禄组、下坊组为代表;中南华世早期北部是以古城组为代表,南部为以长安组为代表的“下冰碛层”。

(3)湘桂黔地区原归于“板溪期”的张家湾组、溁水河组、五强溪组、隆里组、拱洞组宜归于下南华统。晚青白口世晚期“板溪期”地层自北向南分别为“红板溪”型地层、“钦杭裂谷型”地层和“黑板溪”型地层。

(4)南华间冰期与冰后期大规模沉积成矿作用的重要原因,一是华南裂谷系在青白口纪晚期一早南华世强烈伸展,来自上地幔或下地壳的海底火山爆发,海水中的铁、锰、硅、镁离子浓集,为成矿之源;二是长安、古城冰期之后,气候变暖,海水升温,古生物繁衍,是沉积成矿的有利环境,形成“铁、锰、磷、镁多元素碳质沉积”事件链;三是构造是沉积成矿的约束条件。区内先南后北,由构造活动区向相对稳定区迁移,由硅铁质建造向含锰、磷镁质碳酸盐岩建造演化,构成“南铁、中锰、北磷”、“北页岩气、南石墨”的成矿分区格局;四是随着冰球事件演化,沉积成矿与生物大爆发相继演化,特别是冰后期陡山沱、灯影和筇竹寺3期成磷与瓮安、埃迪卡拉、澄江3个生物群密切相伴

致谢:本文英文由龙梅梅翻译,谨致感谢!

## 参考文献

- [1] 杨明桂,祝平俊,熊清华,等. 新元古代一早古生代华南裂谷系的格局及其演化[J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1367-1376.
- [2] 赵自强,丁起秀. 中南区区域地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1996.
- [3] 杨明桂,刘亚光,黄志忠,等. 江西中新元古代地层的划分及其与邻区对比[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 43-54.
- [4] 江西省地质矿产勘查开发局. 中国区域地质志·江西志[M]. 北京:地质出版社,2017:13-62.
- [5] WANG Y J, FAN W M, CAWOOD P A, et al. Sr-Nd-Pb isotopic constraints on multiple mantle domains for Mesozoic mafic rocks beneath the South China Block hinterland [J]. Lithos, 2008, 106(3/4): 297-308.

- [6] 高林志,丁孝忠,曹茜,等.中国晚前寒武纪年表和年代地层序列[J].中国地质,2010,37(4):1014-1020.
- [7] 王剑,李献华, DUNA T Z, 等. 沧水铺火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 法年龄及“南华系”底界新证据[J]. 科学通报,2003,46(16):1726-1731.
- [8] 王剑.华南新元古代裂谷盆地沉积演化[M].北京:地质出版社,2000.
- [9] 高林志,杨明桂,丁孝忠,等.华南双桥山群和河上镇群凝灰岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——对江南新元古代造山带演化的制约[J].地质通报,2008,27(10):1744-1751.
- [10] 湖南省地质调查研究院.中国区域地质志·湖南志[M].北京:地质出版社,2017:579-617.
- [11] 刘宝珺,许效松.中国南方岩相古地理图集[M].北京:科学出版社,1994.
- [12] 卢定彪,肖加飞,林树基,等.黔湘桂交界地区南华系划分[J].地质通报,2019,38(2/3):200-207.
- [13] 李献华,王一先,赵振华,等.闽浙古元古代斜长角闪岩的离子探针锆石 U-Pb 年代学[J].地球化学,1998,27(4):327-334.
- [14] WANG Y S, LIU D Y, XU M H et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in Northwestern Fujian, Cathaysia block, China: Tectonic implications and the need to redefine lithostratigraphic units[J]. Gondwana Research, 2007, 12(1/2): 166-183.
- [15] 程裕淇.中国区域地质概论[M].北京:地质出版社,1994:327-458.
- [16] 陈润生.福建基础地质调查研究进展与方向[J].福建地质,2018,37(2):83-108.
- [17] 福建省地质调查研究院.中国区域地质志·福建志[M].北京:地质出版社,2017:504-527.
- [18] 傅志超,马金清,林亨财.福建省中级变质岩岩石(构造)地层单位新划分[J].地质通报,2010,29(8):1152-1159.
- [19] 葛如庚,黄德贤.福建省清流、宁化泉上地区震旦系上统火山岩分布及其特征[J].福建地质,1984(2):25-36.
- [20] 包超民,邢光福,周宁章,等.华东地区前寒武纪地层划分综述[C]//2006年华东六省一市地学科技论坛.南昌:江西科学技术出版社,2006:10-17.
- [21] 王银喜,胡雄健.浙江龙泉早元古代花岗岩的发现及其底时代的讨论[J].地质论评,1992,38(6):525-531.
- [22] 高林志,张恒,丁孝忠,等.江山—绍兴断裂带构造格局的新元古代 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄证据[J].地质通报,2014,33(6):763-775.
- [23] 水涛,徐步台,梁如华,等.中国浙闽变质基底地质[M].北京:科学出版社,1988:59-82.
- [24] 王丽娟,于津海, O'REILLY Y S, 等. 华夏南部可能存在 Grenville 期造山作用:来自基底变质岩中锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素信息[J].科学通报,2008,53(14):1680-1692.
- [25] 于津海,周新民, O'REILLY Y S, 等. 南岭东段基底麻粒岩相变质岩的形成时代和原岩性质:锆石 U-Pb-Hf 同位素研究[J].科学通报,2005,50(16):1758-1767.
- [26] 张爱梅,王岳军,范蔚茗,等.福建武平地区桃溪群混合岩 U-Pb 定年及其 Hf 同位素组成:对桃溪群时代及郁南运动的约束[J].大地构造与成矿学,2011,35(1):64-72.
- [27] 覃小锋,周府生,胡贵昂,等.云开地块北缘 MORB 型火山岩的首次发现及其大地构造意义[J].地质科技情报,2005,24(3):20-24.
- [28] 江西省地质矿产勘查开发局.中国矿产地质志·江西卷[M].北京:地质出版社,2015:165-208.

## Late Neoproterozoic stratigraphic sequence and large-scale sedimentary mineralization in South China during the Nanhua interglacial-post glacial periods

YANG Ming-gui, WANG Guang-hui

(Jiangxi Bureau of Exploration & Development for Geology and Mineral Resources, Nanchang 330002, China)

**Abstract:** This paper summarized research progress on the late Neoproterozoic stratigraphic division between the western margin of the Yangtze block and the South China rift system. Based on regional index strata, sedimentary and sedimentary mineralization events, and isotopic dating data, previously controver-

sial “Banxi stage” stratigraphy, bottom margin of the Nanhua System, stratigraphy of the Nanhua ice age, as well as the Proterozoic structure, rock, stratigraphic age and sequence along the Wuyi-Yunkai area were further compared and classified. Large-scale sedimentary mineralization during the interglacial and post glacial periods, which resulted in the formation of mineral deposits such as Fe, Mn, P, talc, and shale gas and black carbonaceous shale (graphite), was also determined. Constraint effect of regional geological structure, sedimentation and snowball events, as well as climate environment on the regularity of sedimentary mineralization was analyzed in this study.

**Key words:** South China; late Neoproterozoic; Nanhua period; stratigraphic correlation; large-scale sedimentary mineralization

## 南京地质调查中心合作科研成果获 2019 年度 江苏省科学技术奖

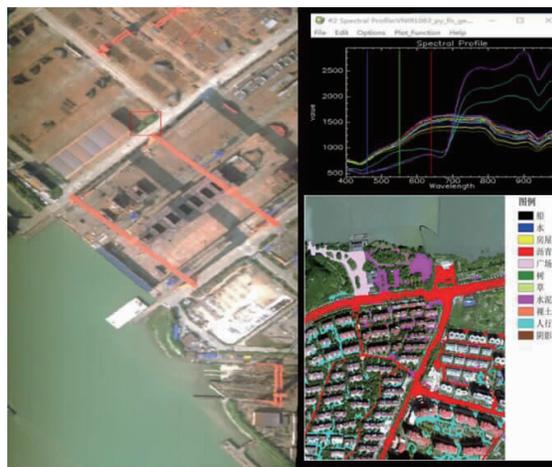
南京地质调查中心与南京理工大学合作完成的“基于空谱联合结构化特征的高光谱图像分析方法与应用技术”成果,获 2019 年度江苏省科学技术奖二等奖。该项成果包括基于空谱相关性及几何结构的高光谱图像融合超分辨率模型与算法、基于结构化稀疏和低秩表示的高光谱图像地物精细分类理论与方法、联合整体与局部结构化稀疏低秩特征的高光谱解混与目标检测模型及算法、基于多级协同并行优化的高光谱图像快速处理方法,开发了应用于国产高光谱遥感仪器的数据处理与信息提取软件。

近年来,南京地质调查中心自主研发成功的小型机载高光谱成像仪、桌面应用高光谱成像系统和岩心光谱扫描仪等光谱地质仪器,结合该项成果已经在地质、环境、遥感调查和岩心精细矿物分析中发挥了重要作用,未来将在自然资源遥感调查领域发挥更广泛的应用。

(中国地质调查局南京地质调查中心 郑志忠,所颖萍)



搭载于无人机的小型机载高光谱成像系统



高光谱遥感图谱数据应用于长江流域环境调查