

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.11001

林方成, 李生, 曾琴琴, 任光明, 王冬兵, 张启跃, 葛华, 顾鸿宇, 2022. 中国西南地区地质调查工作十年(2011—2020)进展综述. 沉积与特提斯地质, 42(4):507-528. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.11001

LIN F C, LI S, ZENG Q Q, REN G M, WANG D B, ZHANG Q Y, GE H, GU H Y, 2022. Review on the progress of geological survey works in Southwest China in the past ten years (2011—2020). Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(4):507-528. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.11001

中国西南地区地质调查工作十年(2011—2020)进展综述

林方成, 李生, 曾琴琴, 任光明, 王冬兵, 张启跃, 葛华, 顾鸿宇

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要:近十年(2011—2020年),随着我国工业化的持续推进,对矿产资源的需求旺盛,生态文明建设日益受到重视,地质工作适应需求变化历经深度的转型发展,西南地区地质调查工作取得一系列重大进展和成果。本文作者基于中国地质调查局西南地区地质调查项目管理和地质调查研究掌握的情况,结合西南各省(市、区)找矿突破战略行动(2011—2020年)评估报告、油气企业勘查成果,并查阅各专业领域大量文献资料,对西南地区地质调查(含矿产勘查等)进展进行较全面地总结和阐述,并提出未来十年西南地区地质调查展望。近十年的重要进展包括较大幅度提高了1:5万为主的区域地质调查程度;提出了特提斯构造演化、上扬子陆块前寒武纪构造—地层格架等新认识;提交新发现矿产地1400多处,实现了铜、锰、铝、金、锂、铅锌、铍、晶质石墨、磷、天然气等战略性矿产勘查突破和多个新区、新类型、新层系页岩气的重要发现;提高了西南山区地质灾害早期识别和监测预警水平;查明了重点地区和流域的水文地质和水资源状况,解决了乌蒙山等贫困缺水地区大批群众的用水困难;圈定了约53600平方千米富硒土地资源;新兴了生态地质调查、城市地质调查、资源环境承载能力评价和国土空间开发适宜性评价、自然资源综合调查等诸多调查新领域,探索建立了相关的调查理论与技术方法。调查成果提高了我国部分能源和矿产资源的安全保障,有效地支撑服务区域内重大工程规划建设、脱贫攻坚、国土空间规划、城市地质安全、生态环境建设和自然资源管理等工作,地质调查转型发展的成效显著。预计未来十年的地质调查会在支撑服务能源和矿产资源安全、地质安全风险防范、自然资源综合调查监测、生态环境整治、国土空间利用、区域地球科学理论、地质调查信息化建设等方面不断取得创新发展。本文可为同行了解西南地区地质调查进展和理解新时期地质工作转型发展提供重要参考。

关键词:西南地区;地质调查;找矿突破;进展和成果;转型发展;展望

中图分类号:P624

文献标识码:A

Review on the progress of geological survey works in Southwest China in the past ten years (2011 – 2020)

LIN Fangcheng, LI Sheng, ZENG Qinqin, REN Guangming, WANG Dongbing,
ZHANG Qiyue, GE Hua, GU Hongyu

(Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: Over the past ten years (2011 – 2020), with the continuous industrialization in China, there has been a strong demand for energy and mineral resources, meanwhile, the development of ecological civilization has been

收稿日期: 2022-04-26; 改回日期: 2022-05-08 责任编辑: 郭秀梅 科学编辑: 曹华文

作者简介: 林方成(1963—), 博士, 研究员, 主要从事中国西南地区和东南亚地区矿产地质研究及地质调查项目管理。

E-mail: linfc@126.com

资助项目: 中国地质调查局基础性公益性地质矿产调查项目(DD20160020)、基础地质调查项目(DD20190053、DD20190054)

highly emphasized, the geological works has accordingly gone through transformation and development. A series of significant progresses and achievements have been achieved in geological survey in Southwest China. The authors of this paper, based on the geological project management of China Geological Survey and geological study in Southwest China, combined with the evaluation reports on breakthrough action of strategic mineral prospecting (2011–2020) of the related provinces and the exploration results of oil and gas enterprises, as well as consulting a large number of literatures of various professional fields, comprehensively summarize the progress of geological survey in Southwest China in the past ten years, and the prospect of geological survey in the next decade is put forward. The significant progresses in the past ten years includes: the covered areas of regional geological survey on main scale of 1:50000 has increased to a greater degree; the understanding of Tethys tectonic structures and evolution and the reconstruction of the Precambrian tectonic and stratigraphic framework of the upper Yangtze block has been deepened; over 1400 new mineral occurrences have been discovered, and the strategic mineral exploration has achieved great breakthroughs such as copper, manganese, aluminum, gold, lithium, crystalline graphite, lead-zinc, phosphorus and natural gas; a number of new areas, new types, new hosting strata of shale gas have been discovered; the early identification, monitoring and early warning of geological disasters in the mountainous areas have been improved; the conditions of hydrogeology and water resources in some key areas and basins have been identified, the difficulties of water supplying of a large number of people in the water deficient areas has been solved; about 53600 square kilometers of selenium-rich land resources has been delineated; some new fields such as ecological geological survey, urban geological survey, resource and environment carrying capacity evaluation and suitability evaluation of land and space development, as well as comprehensive survey of natural resources have emerged, and the related theoretics and technology and methods have been initially practiced and established. The results of the survey have improved the security of some energy and mineral resources of China, and effectively supported and served such areas as the planning and construction of the major engineering projects, the poverty alleviation, the national territory spatial planning, the urban underground space utilization, the ecological environment construction, and the natural resource management, and so on. The transformation and development of geological survey has achieved remarkable results. It can be expected that the geological survey in the next decade will achieve innovative and development in supporting and serving energy and mineral resources security, geological security risk prevention, natural resources comprehensive investigation and monitoring system construction, ecological environment improvement, territorial space utilization, regional geosciences theory, information technology construction of geological survey, and other aspects. This paper can provide an important reference for readers to understand the progress of geological survey and mineral exploration in Southwest China in the past decade and understand the transformation and development of geological works in the new era.

Key words: Southwest China; geological survey; mineral prospecting breakthroughs; progresses and achievements; transformation and development; expectation

0 引言

中国西南地区包括四川、贵州、云南、重庆和西藏五省(市、区),面积约 235 万平方千米,占我国陆域面积近四分之一。西南地区在地质构造背景上复杂且独特,主体处于青藏高原及其东南缘,是研究特提斯构造演化、印度–欧亚板块碰撞过程及陆内变形、青藏高原隆升及生长的理想区域,是实现地球系统科学理论创新的热点地区。在成矿地质背景上,位于全球特提斯成矿域与滨太平洋成矿域

的交汇地区,是我国能源、矿产和水资源的重要分布区。在地势上处在我国第一阶梯和第二阶梯,地形高差大,地质灾害频发,是防灾减灾的关键区域,青藏高原也是长江上游、黄河上游的重要生态安全屏障。西南地区是西部大开发、长江经济带、成渝双城经济圈、“一带一路”倡议等国家重大战略实施以及铁路和水电站等重大工程规划建设集中分布地区。西南地区的地质工作对于保障国家能源、矿产、水和其它战略资源安全、支撑服务生态文明建设和自然资源管理中心工作具有十分重要的

地位。

“十二五”至“十三五”(2011—2020 年)期间,我国经济从高速发展转向高质量发展,能源和矿产资源需求强劲,生态文明建设日益受到重视,自然资源管理职能发生重大变化,与此相应,地质调查处在大发展和转型发展的阶段。根据西南五省(市、区)自然资源管理部门统计的数据,这十年累计投入地质勘查资金 513.31 亿元(含中央财政、地方财政及社会资金),地质勘查投入从历史高峰期(2013 年达最高峰)到“十三五”末低谷期的回落过程。地质调查专业领域除了延续传统的区域地质、矿产地质、物化遥、地质灾害、水工环地质等调查外,还兴起了土地质量地球化学调查、城市地质调查、生态地质调查、资源环境承载力评价和国土空间适宜性评价(“双评价”)、自然资源综合调查等,以支撑服务自然资源管理和经济社会发展,并取得一系列重大进展和丰硕成果。部分学者对近年来地质调查某些方面的进展进行了总结,如王立全等(2021)、王冬兵等(2021)总结了东特提斯和西南三江特提斯研究进展与展望;杜金虎等(2016)、冯建辉等(2016)总结了“十二五”油气勘探进展和“十三五”展望;蔡勋育等(2021a, 2021b)、郭旭升等(2021)、何海清等(2021)总结了“十三五”油气勘探进展和“十四五”前景展望;张文浩等(2021)总结分析了公益性油气基础地质调查的进展与发展方向;李括等(2019)总结了全国土地质量地球化学调查二十年进展;聂洪峰等(2021)总结了生态地质研究进展与展望;铁永波等(2020)总结了南方山地丘陵区地质灾害调查进展;熊江等(2021)总结了泥石流早期识别与监测预警研究进展等。

本文作者基于中国地质调查局西南地区地质调查项目管理和地质调查研究工作掌握的情况,结合各省(市、区)找矿突破战略行动(2011—2020 年)评估报告、油气企业勘探成果,并查阅各专业领域大量文献资料,对中国西南地区近十年的地质调查(包括能源和矿产勘查)重大进展和成果按照基础地质、矿产、油气、地质灾害和水工环等专业领域进行较全面地总结和阐述,并分析提出未来十年西南地区地质调查展望,可为读者了解相关进展和理解地质调查转型发展提供重要参考。

1 基础地质调查程度提高

西南地区 1:20 万(1:25 万)和更小比例尺的区

域地质调查大多在 2010 年前完成^①。近十年主要开展 1:5 万区域地质调查以及 1:25 万土地质量地球化学调查,较大幅度地提高了基础地质调查程度(表 1)。现对近十年主要专业领域的调查部署及完成情况概述如下。

1.1 区域地质调查

1:5 万区域地质调查主要部署在重要成矿带、重大地质科学问题区(特提斯构造演化、扬子陆块西缘前寒武纪地质演化、南盘江盆地北缘古生物群等)、川藏铁路国家重大工程规划建设区等,完成调查面积 51.2 万平方千米(1167 个图幅),至 2020 年底累计完成 89.35 万平方千米(2041 个图幅),覆盖率(占西南地区国土面积的比率)37.7%(表 1、图 1)。新增大批区域地质调查资料,为能源矿产勘查、铁路和水电站等工程规划建设、生态环境保护等相关领域提供了重要的基础地质数据。

1.2 矿产地质调查和勘查

1:5 万矿产地质调查重点部署在冈底斯—喜马拉雅成矿带、班公湖—怒江成矿带、西南三江成矿带、川西锂矿集中区、乌蒙山连片贫困地区、龙门山—滇中成矿带、南盘江—右江成矿带等,着重围绕战略性矿产开展调查,完成调查面积 26.65 万平方千米(600 个图幅),至 2020 年底累计完成 41.47 万平方千米(941 个图幅),覆盖率约 17.52%(图 2)。矿产地质调查圈定大量物化探异常和找矿靶区,新发现一批矿产地,为进一步的矿产勘查提供了重要依据。开展了整装勘查区和老矿山深边部勘查,取得了一批战略性矿产勘查突破和重要成果。

1.3 油气地质调查和勘探

重点开展了四川盆地(川东高陡构造带、川西南沐川地区、滇东北大关—永善地区)、滇黔(桂)相邻区(滇西北宁蒗地区、兰坪—思茅地区、黔东—黔西地区)、武陵山区(渝东地区)页岩气调查,针对页岩气有利层系开展页岩气条件和勘查选区评价,实现了多个新区、新类型、新层系、新成藏模式的页岩气突破或重要发现;开展西藏羌塘盆地、措勤盆地油气地质调查,在羌塘盆地实施了第一口油气深井——羌科 1 井(深 4692 米)。经过调查,进一步查明了主要含油气盆地的盆地结构、生—储—盖组合、烃源岩等油气地质条件,评价了油气资源潜力,优选了一批油气勘探有利区。中石油、中石化等企业在四川盆地开展了大规模的天然气(含页岩气等非常规气)勘探,获得天然气勘探重大突破性成果。

表 1 西南地区 2011—2020 年完成的区域地质调查统计表

Table 1 The statistical list of basic geological survey accomplished in period of 2011 – 2020 in Southwest China

序号	调查内容	2010年以前完成			2011—2020年完成			至 2020年累计完成			备注
		完成面积 (万平方 千米)	图幅数 (幅)	面积覆盖 率 (%)	完成面积 (万平方 千米)	图幅数 (幅)	面积覆盖 率 (%)	完成面积 (万平方 千米)	图幅数 (幅)	面积覆盖 率 (%)	
1	1:5 万区域地质调查	38.15	875	16.12	51.2	1168	21.63	89.35	2043	37.75	图幅 数含 不完 整图 幅。
2	1:5 万矿产地质调查	14.81	341	6.26	26.65	600	11.26	41.46	941	17.52	
3	1:5 万水文地质调查	0.35	8	0.15	19.63	437	8.29	19.98	445	8.44	
4	1:5 万灾害地质调查	0.04	1	0.02	7.1	160	3	7.14	161	3.02	
5	1:5 万环境地质调查	1.4	31	0.59	4.7	106	1.99	6.1	137	2.58	
6	1:5 万工程地质调查	0.54	12	0.23	2.27	51	0.96	2.81	63	1.19	
7	1:5 万地球化学调查	14.62	336	6.18	16.69	378	7.05	31.31	714	13.23	
8	1:5 万土地质量地球 化学调查							1.04		0.44	
9	1:25 万土地质量地 球化学调查							36.08		15.24	

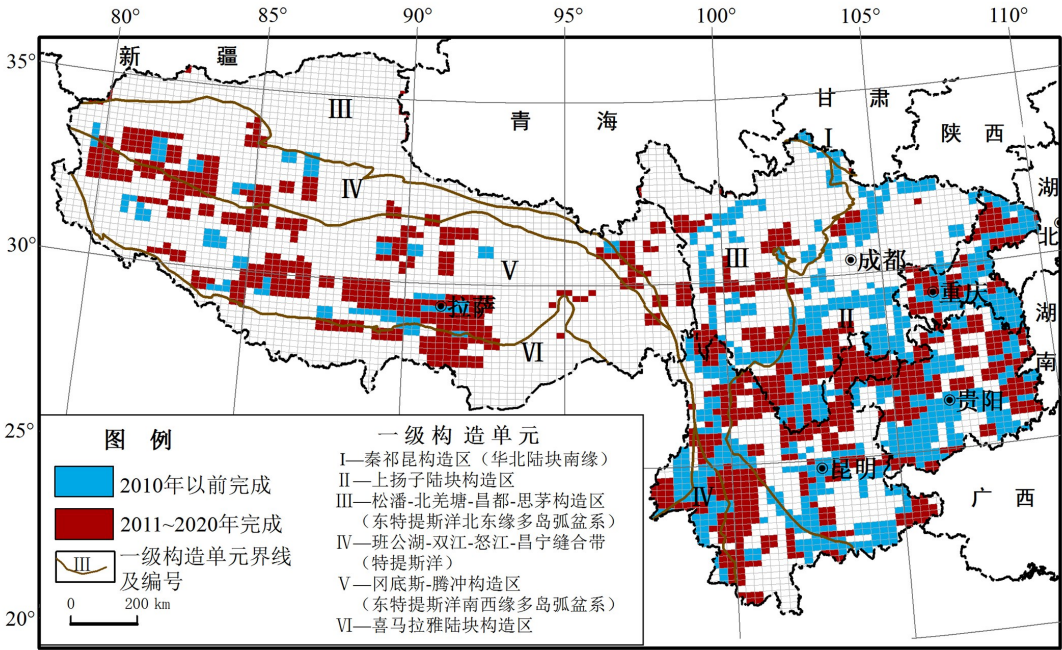


图 1 西南地区 1:5 万区域地质调查工作程度图(一级构造单元据尹福光等,2019)

Fig. 1 The status of regional geological survey on scale of 1:50000 in Southwest China

1.4 地质灾害和水工环地质调查

主要开展青藏高原、岩溶缺水地区、乌蒙山扶贫区、重要流域的水文地质调查;重要城镇、交通干线、川藏铁路等重大工程规划建设区的灾害地质调查和工程地质调查;成都市、黔中城市群等城市地质调查;四川大凉山区、滇西北洱海地区等生态地质调查;重庆市、西藏自治区等资源环境承载能力评价和国土空间开发适宜性评价;四川省广安市等自然资源综合调查。完成调查面积 1:5 万灾害地质

调查 7.10 万平方千米(160 图幅,不包括县市域的灾害地质调查)、1:5 万水文地质调查 19.63 万平方千米(437 图幅;图 3)、1:5 万工程地质调查 2.27 万平方千米(51 个图幅)、1:5 万环境地质调查 4.70 万平方千米(106 个图幅)、1:25 万生态地质调查 3.9 万平方千米、1:5 万生态地质调查 6030 平方千米。为促进解决缺水地区用水困难、水资源管理和开发利用、地质灾害监测预警、重大工程规划建设、生态保护、国土空间规划、城市地质安全、自然资源督察

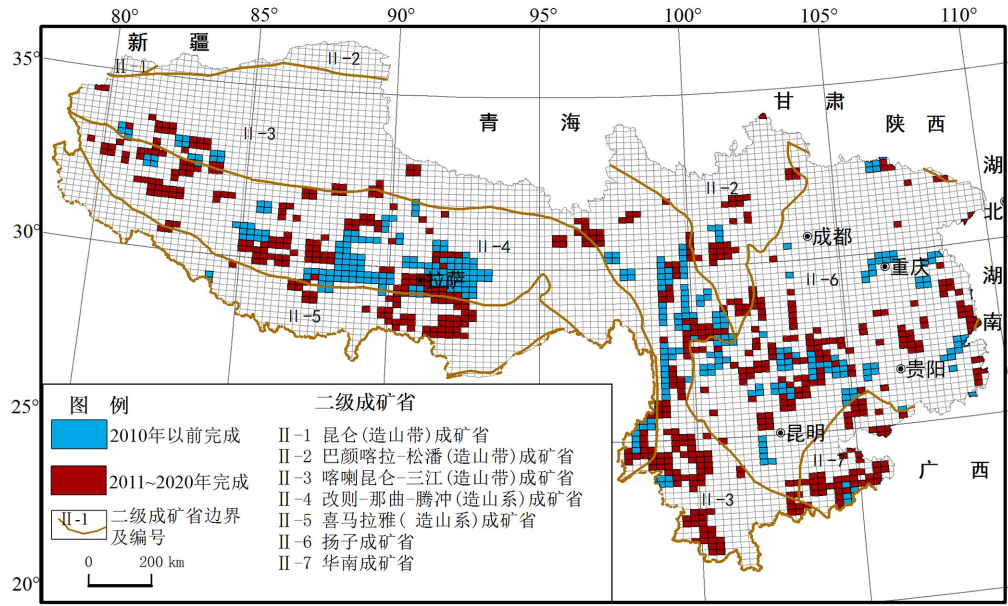


图2 西南地区1:5万矿产地质调查工作程度图(二级成矿省的划分据徐志刚等,2008)

Fig.2 The status of regional mineral geological survey on scale of 1: 50000 in Southwest China

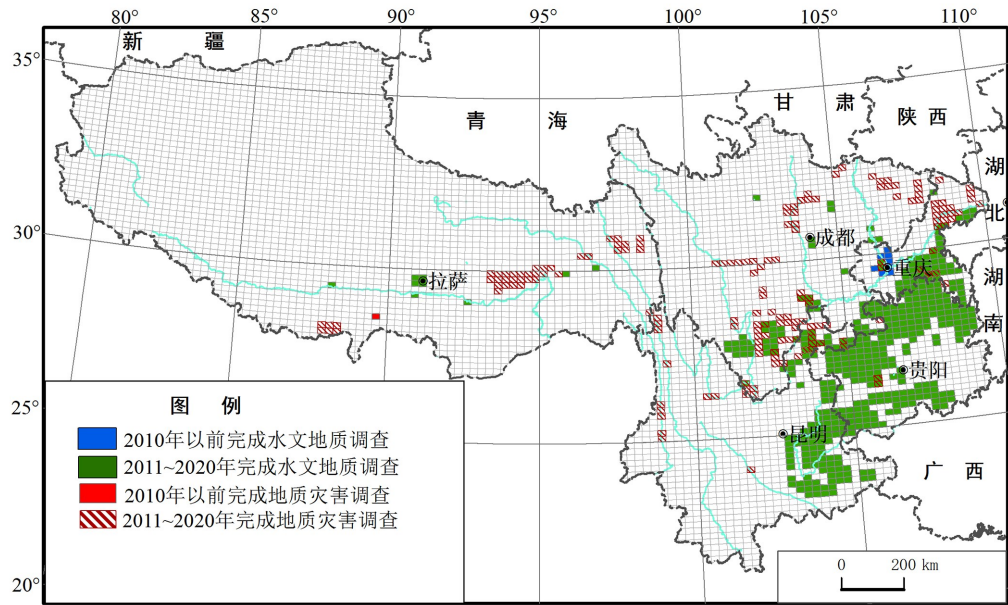


图3 西南地区1:5万水文地质和地质灾害调查工作程度图

Fig.3 The status of hydrogeological and geological disaster survey on scale of 1: 50000 in Southwest China

执法等提供了水工环基础地质资料。水工环地质工作程度除了重庆市和贵州省较高外,其它省区还较低。

1.5 土地质量地球化学调查

在乌蒙山区、四川自贡—泸州、巴中—南充—广安、重庆酉阳—秀山、滇中楚雄、滇西边地区、西藏拉萨、藏东昌都等地区开展1:25万土地质量地球化学调查,至2020年累计完成36.08万平方千

米;并在耕地、园地、富硒土地、特色农业种植区、土地利用规划调整区、重要城镇区、重点污染区、重要生态地球化学问题区、关键科学问题区等,开展了1:5万或更大比例尺的土地质量地球化学调查,其中1:5万土地质量地球化学调查累计完成1.04万平方千米。查明土地资源数量、质量和生态状况,摸清了30余县重点耕地区土地质量地球化学状况,圈出富硒土地资源5.36万平方千米,占调查区面积的

14.9%;圈定连片分布可直接开发利用的特色土地资源开发基地150余块,发现富硒农产品10余种。调查成果助推形成乌蒙山区等一批特色农业示范基地(四川屏山富硒特色农业基地、古蔺富硒水稻基地、普格富硒水稻基地、昭觉火龙果种植基地、云南鲁甸特色农业基地、昭通富硒苹果基地、贵州黔西特色农业基地、七星关现代高效农业基地、大方—织金特色农业基地等),带动上百万的农民增收实现稳定脱贫。调查成果对支撑服务地方国土空间规划、土地资源管理和精准扶贫等工作成效显著(李括等,2019)。

1.6 系统编撰和出版西南地区 and 各省(市、区)地质志、矿产地质志

在中国地质志、中国矿产地质志编制的总体框架下,大规模系统性地编制了西南地区 and 各省(市、区)地质志、矿产地质志。应用新技术、新方法,以活动论为指导,开展区域地质调查、矿产勘查成果综合提升与集成创新研究,编制系列地质志、矿产地质志、地质图件,建立地质、矿产数据库。为地质调查、矿产勘查、工程规划建设、地质灾害防治和环境保护等提供较全面系统的基础地质和矿产地质资料。具体包括:

(1)中国地质志——四川卷、贵州卷、云南卷、重庆卷、西藏卷、西南地区卷,及各省(市、区)地质图、西南地区1:150万地质图、岩浆岩地质图、变质岩地质图、构造地质图、第四纪地质与地貌图、航磁异常图、地质图数据库。

(2)中国矿产地质志——四川卷、贵州卷、云南卷、重庆卷、西藏卷;以各省级矿产地质志普及本。

(3)跨省成矿带(Ⅲ级成矿带)矿产地质志:包括冈底斯、三江、喀喇昆仑—羌北、班戈—腾冲、龙门山—大巴山、四川盆地、康滇隆起成矿带、上扬子东部、桂西—黔西南—滇东南北部和滇东南南部等各个成矿带卷。

(4)省级单矿种矿产地质志:包括云南省贵金属卷、铅锌矿卷、锑铋汞铝土矿稀土稀有分散元素及水气矿产卷、铜钼镍钴矿卷、四川省黑色岩系矿产志卷等。

(5)包含西南地区在内的全国单矿种矿产地质志:中国建材非金属、化工矿产、铀矿产、油气矿产、煤炭/煤层气矿产、镍锡矿产、锡矿产、钨锡矿产、宝玉石矿产等地质志,以及全国典型矿床总述卷、全国矿产分布图、中国地球物理场与成矿关系等。

(6)专题研究报告:寒武纪早期黑色岩系中镍钼钒富集机制与成矿规律。

上述地质志、矿产地质志大部分已完成编制,部分已正式出版。

2 重要地质发现和理论创新

近十年区域地质调查在特提斯构造及其演化、扬子西缘前寒武纪地质构造、中生代古生物群新发现及深入研究等方面,取得了一系列重要进展,提高了区域地质调查总体认知水平。

2.1 深化特提斯构造格局和形成演化规律认识

青藏高原及其东南缘是东特提斯构造域的重要组成部分,在全球特提斯域重建、板块构造研究及关键金属矿产和油气资源勘查等方面具有重要意义。近十年的调查研究在特提斯时空格局及形成演化等方面获得了一批重要成果,深化了特提斯构造格局和演化规律的认识。

2.1.1 提出昌宁—孟连构造带原—古特提斯连续演化新认识

传统认为滇西昌宁—孟连结合带代表的是晚古生代的古特提斯洋。近年来,在蛇绿岩、岛弧岩浆岩和俯冲增生杂岩方面均发现有早古生代物质记录。蛇绿岩方面,在昌宁—孟连结合带南汀河(Wang et al.,2013)、勐库(刘桂春等,2017)、牛井山(王冬兵等,2016)、曼信(王保弟等,2018)等地发现了大量早古生代的蛇绿岩和洋壳俯冲成因英云闪长岩。岛弧岩浆岩方面,在云县蚂蚁堆(罗波和谢建,2016)、临沧老五山(Xiao et al.,2018)、双江忙糯(彭智敏等,2018)、勐海布朗山(孙载波等,2018)等地从三叠纪临沧花岗岩基解体出大量奥陶纪花岗岩,具有陆缘弧地球化学性质,很可能是早古生代特提斯洋向东俯冲引起的陆壳物质重熔产物。俯冲增生杂岩方面,澜沧岩群传统上被认为是中元古代结晶基底岩石,但近期调查研究表明其是早古生代俯冲增生杂岩(王冬兵等,2021,及其有关文献)。此外,昌宁—孟连蛇绿岩带西侧的保山地块发育有晚寒武世—二叠纪稳定的浅海陆棚碳酸盐岩和滨海—浅海相砂泥质岩,指示保山地块以东长期存在一个洋盆。因此,从综合区内多学科证据,昌宁—孟连结合带代表的是原—古特提斯连续演化残余记录,而不仅限于晚古生代古特提斯。

2.1.2 提出南冈底斯构造带古—新特提斯连续演化新认识

麦拉-米拉山-洛巴堆断裂以南、雅鲁藏布江结合带以北的南冈底斯构造带东段,长期以来被认为是受控于雅鲁藏布江新特提斯洋北向俯冲作用形成的晚侏罗世—古近纪岩浆弧。近年来,1:5万区域地质调查及研究,在南冈底斯构造带东段中部唐加-松多识别出石炭纪—二叠纪蛇绿岩和洋岛火山岩、三叠纪—侏罗纪洋岛及洋内弧火山岩、三叠纪—白垩纪弧岩浆岩等地质体,新发现的洋板块地层单元(洋岛、海山、洋内弧、楔顶盆地、大洋盆地等)被认为是雅鲁藏布江结合带东段在特提斯洋演化过程俯冲消减而形成增生杂岩带的重要组成部分,进而提出了南冈底斯东段增生杂岩带及古—新特提斯连续演化新认识(李光明等,2020;王立全等,2021及其中参考文献)。

2.1.3 多处新发现榴辉岩夯实了青藏高原多岛弧盆系古构造格局

造山带中榴辉岩既可以确定古板块结合带,又能提供丰富的深俯冲及折返动力学过程信息,因而地质意义重大。最近,在昌宁-孟连原—古特提斯结合带(滇西澜沧变质带)、金沙江古特提斯结合带和南冈底斯唐加—松多等地发现榴辉岩。滇西双江—景洪地区新发现榴辉岩带自北向南长达300千米,原岩性质主要有富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)型和洋岛玄武岩(OIB)型,原岩时代有ca. 460 Ma、ca. 430 Ma、ca. 300 Ma、ca. 270 Ma,变质时代集中在245~230 Ma,变质温度-压力(P - T)条件表明是一条高压低温变质带,对应俯冲深度达到70~80千米,该榴辉岩带和其西侧的蛇绿混杂岩带共同构成了冈瓦纳大陆与泛华夏大陆板块分界线(王冬兵等,2021及其中参考文献)。另外,从折返的深俯冲洋壳的原岩时代看,昌宁-孟连古特提斯洋演化可上溯至早古生代。藏东金沙江古特提斯结合带贡觉三岩地区亦首次发现了榴辉岩,其原岩地球化学性质有N-MORB和OIB两种类型,榴辉岩相峰期变质时代为245 Ma左右,榴辉岩相峰期变质作用的 P - T 条件为 $P=2.2\sim 2.34$ GPa, $T=622\sim 688^{\circ}\text{C}$ (Tang et al.,2020)。南冈底斯构造带东段自从松多榴辉岩发现(杨经绥等,2006)以来,近年又相继在白朗、吉朗、娘隆朗、龙崖松多、新达多及巴青松多等地区发现榴辉岩,榴辉岩与蓝片岩近东西向断续出露超过150千米(Cheng et al.,2013,2015;董宇超等,2018);榴辉岩原岩锆石U-Pb年龄为304~274 Ma,变质锆石U-Pb年龄为266~260 Ma、238~

227 Ma,以及白云母、角闪石Ar-Ar年龄为241~200 Ma;榴辉岩原岩主要类型包括正常型洋中脊玄武岩(N-MORB)、E-MORB、OIB和弧后盆地玄武岩(BABB)型,其中以MORB型榴辉岩分布最广(王立全等,2021及其中参考文献)。东特提斯构造域藏东—滇西地区榴辉岩的发现为理解青藏高原东南缘现今地质构造格局、探索动力学演化过程提供了新的思路。从榴辉岩角度,亦反映出昌宁-孟连古特提斯洋是一个长期存在(整个古生代)的特提斯大洋,其俯冲导致金沙江古特提斯、南冈底斯唐加-松多古特提斯等弧后洋盆形成,主洋盆与弧后洋盆协同演化的“多岛弧盆系”模式是青藏高原特提斯地质演化的重要方式。

2.2 扬子陆块西缘前寒武纪地质研究取得原创性认识

扬子陆块西缘南北向广泛分布的前寒武纪造山带,具有独特的地质构造及资源环境特征,是探索全球前寒武纪超大陆形成演化在华南扬子陆块地质响应的关键地区之一(Zhao and Cawood,2012)。近十年来中国地质调查局在扬子陆块西缘持续部署实施了以1:5万区域地质调查为主,辅以专题地质调查和综合研究等手段,在扬子陆块西南缘前寒武纪构造演化和超大陆旋回对比研究等方面取得重要原创性认识及成果。

2.2.1 “撮科杂岩”的发现与厘定

从云南玉溪杨武镇—青龙厂地区前人划分的“大红山群老厂河组”中解体出一套中太古—古元古代杂岩,命名为“撮科杂岩”(崔晓庄等,2020;Cui et al.,2020)。撮科杂岩包含三套岩性组合:太古代(3.2~2.6 Ga)马家冲岩组主要由一套TTG质片麻岩、黑云斜长片麻岩和片麻状花岗岩组成,构成撮科杂岩的核部;古元古代早期(2.4~2.2 Ga)岔河岩组由一套片麻状花岗岩、片麻状花岗闪长岩及变花岗质岩石组成,与之伴生的为由绿泥片岩、石英片岩、云母片岩、变砂岩及变玄武岩组成的高家坡岩组(2.3~2.2 Ga),分别位于马家冲背斜核部两翼(Cui et al.,2021a)。撮科杂岩普遍经历了2.46 Ga和1.97~1.95 Ga两期区域变质事件(Cui et al.,2020),并被大量1.97~1.84 Ga碰撞相关的花岗岩脉和辉绿岩脉所侵入。

撮科杂岩记录的地壳增生事件最早发生于ca. 3.5 Ga,ca. 3.1 Ga同步发生地壳增生和再造,并于ca. 2.85 Ga再次发生地壳重融,古元古代发生多期

强烈的地壳再造事件(崔晓庄等,2020)。这与崆岭杂岩、钟祥杂岩、陡岭杂岩和鱼洞子杂岩所记录的地壳形成与演化截然不同,指示扬子陆块太古代结晶基底可能存在横向上的不均一性。撮科杂岩目前已成为深入解析扬子陆块早期地质演化的重要新窗口,为探讨全球 Kenorland-Columbia 超大陆聚散演化在扬子陆块的地质记录提供了重要依据。

2.2.2 菜子园俯冲增生杂岩带的识别与厘定

从四川省会理县菜子园—通安地区前人划分的通安组(耿元生等,2012,2017)中识别出一套蛇绿岩和洋岛—海山岩石组合,认为该地区原通安组(或通安群)和东川群并非一套正常沉积的史密斯地层,而是由不同时代、不同规模、不同构造环境的构造岩块和发生强剪切变形的基质共同组成的一套俯冲增生杂岩,将其命名为“菜子园俯冲增生杂岩”(任光明等,2014a,2017)。该杂岩的岩块主要包括变质橄榄岩、辉长岩、玄武岩、大理岩、硅质岩等,局部玄武岩保留枕状构造;基质主要由变粉砂岩、炭质板岩、硅泥质岩、硅质板岩、云母片岩、千枚岩等组成(任光明等,2017)。近年来,又对菜子园俯冲增生杂岩带的物质组成、空间分布范围及构造属性进行了系统厘定,识别出至少三期构造变形:第一期俯冲期构造变形,主要表现为密集片理化或糜棱岩化带发育,韧性剪切和顺层塑性流变构造明显,发育大量同斜紧闭褶皱、无根勾状褶皱及透入性面理等,形成倾向北东或北东东的逆冲推覆构造岩片;第二期碰撞期构造变形,表现为挤压收缩变形,在早期塑性变形基础上叠加二次褶皱,发育倾向北西的反“S”形逆冲走滑构造;第三期表现为新生代以来的大型左行走滑加逆冲断裂,发育大量北西—南东向断裂,变形样式以宽缓褶皱及强劈理化带为特征。

在详细的野外填图基础上,结合同位素年代学和岩石地球化学等综合研究,识别出菜子园俯冲增生杂岩带中 $ca. 1.8 \sim 1.5 Ga$ 裂离或基底变质地块、 $ca. 1.45 Ga$ 洋中脊、 $ca. 1.50 Ga$ 洋岛—海山、 $1.40 \sim 1.37 Ma$ 洋内弧、 $ca. 1.35 \sim 1.32 Ma$ 海沟和弧前—增生楔等俯冲增生杂岩构造亚相端元(尹福光等,2012a,2012b;任光明等,2014a,2014b,2017,2020;庞维华等,2015;宁括步等,2021;Cui et al.,2021b),恢复了菜子园俯冲增生杂岩带洋板块地层系统。菜子园俯冲增生杂岩带的识别与厘定,推动了上扬子陆块前寒武纪构造—地层格架的重建,进

一步证实全球 Columbia 超大陆裂解—Rodinia 超大陆汇聚演化过程在扬子陆块西缘的地质响应,对重新认识前寒武纪地质演化与成矿响应的耦合关系均具有重要意义。扬子陆块西缘以菜子园蛇绿混杂岩带为界,北部确定为攀西地块及其活动边缘,南部为滇中地块及其被动大陆边缘;将原“康滇地层分区”分为三个区,北部为攀西地层分区,中部为菜子园—麻塘构造—地层分区,南部为滇中地层分区。

2.3 古生物研究进展与新发现

2.3.1 罗平生物群深化研究

云南罗平生物群于2007年发现,随着研究工作的不断深入,发现的化石门类不断丰富,迄今已经发现有海生爬行类、鱼类、节肢动物、棘皮动物、菊石、双壳、腹足类、腕足类、植物等包括脊索动物门、节肢动物门等7大门类、40属、113种(新属新种36个)化石。罗平生物群是由多个门类构成的完整海洋生态系统,包括了海生爬行类的鱼龙(Benton et al.,2013;Liu et al.,2011a,2013)、原龙、鳍龙类(Cheng et al.,2014;Liu et al.,2011b,2013,2014;Shang et al.,2011;Benton et al.,2013)等;鱼类包括了辐鳍鱼亚纲软骨硬鳞鱼次纲的古鲕鱼类、龙鱼类、裂齿鱼类、肋鳞鱼类,辐鳍鱼亚纲新鳍次纲的半椎鱼类和鲱口类,肉鳍鱼亚纲空棘鱼类等(Benton et al.,2013;Wen et al.,2012,2013);节肢动物以甲壳纲为主,另外还发现有螯肢亚门的鲎类化石和多足亚门的千足虫类化石(Huang et al.,2013,2018)。软体动物门的菊石、双壳、腹足、箭石等;腕足动物门的舌形贝类;棘皮动物门的海胆、海星、海百合和海参;还包括牙形类、有孔虫类、植物化石(松柏类)和遗迹化石(Zhang et al.,2014)。有许多化石类别如鲎化石、等足目、千足虫、龙虾等系在我国首次发现。研究揭示了罗平生物群是目前世界上已知的多样性最为丰富的三叠纪海生化石库之一,代表了二叠纪末生物大绝灭后海洋生态系统的全面复苏,是中三叠世生物大辐射的典型代表(Chen and Benton,2012;Cheng et al.,2013;Hu et al.,2013)。

2.3.2 新发现贵州望谟生物群

2017年,在南盘江盆地北缘贵州望谟县首次发现早三叠世海生爬行类化石,将其命名为“望谟生物群”,化石类型包括海生爬行类、鱼类、菊石、箭石、腹足、双壳、腕足、牙形、遗迹化石等,初步确定化石包括6门14纲20多个属种。上覆凝灰岩中锆

石 U-Pb 测年揭示出时代早于 247Ma, 牙形石厘定其时代为早三叠世奥伦尼克期。该发现否定了华南三叠纪海生爬行动物从扬子东部起源的假说, 而是东西部同时发展(周长勇, 2017)。对研究早三叠世海洋生态复苏、海生爬行动物类群起源、早期演化具有十分重要的科学意义, 填补了南盘江盆地早三叠世生态复苏的研究空白, 丰富了南盘江盆地内从早三叠世到晚三叠世的化石序列。

南盘江盆地及北缘迄今已发现早三叠世奥伦尼克期望漠生物群、中三叠世安尼期中期罗平生物群/盘县动物群、拉丁期末期兴义动物群、到晚三叠世关岭生物群, 从而构成全球连续性最好的三叠纪古生物演化序列, 已成为研究三叠纪古生物演化最为理想的地区, 有望推动形成南盘江盆地国际三叠纪古生物研究基地。

3 矿产勘查进展与成矿理论创新

西南地区地处全球特提斯成矿域与滨太平洋成矿域的交汇地区, 成矿条件优越, 是我国重要的矿产资源分布区。2011—2020 年, 矿产勘查成果显著, 其中, 中央公益性地质调查圈定的找矿靶区约 1000 处; 矿产勘查(普查、详查、勘探)共提交新发现矿产地 1466 处, 其中, 重庆市 73 处、四川省 146 处、贵州省 487 处、云南省 640、西藏自治区 120 处。

3.1 重大找矿成果及成矿理论创新

近十年, 西南地区的铜、锰、铝、金、锂、钒、钛、钨、铬、稀土、石墨(晶质)、磷、铍等战略性矿产和铅锌、硅石、锑、钼等优势特色矿产勘查取得突破和重大成果, 提高了我国有关矿产的资源保障程度, 提出一系列新的成矿理论认识。现对重要进展和成果按矿种概述如下:

3.1.1 铜矿

铜矿勘查取得重大成果, 以西藏和滇西北香格里拉格咱地区斑岩-矽卡岩型铜矿勘查成果最为显著, 发现和评价了一批大型、超大型铜矿产地, 累计新增铜资源量数千万吨, 较大程度提高了我国铜矿资源保障程度。西藏多龙铜矿集区新发现和评价了改则县波龙、多不杂、多不杂西、铁格隆南等大型及以上铜矿产地, 已成为中国最大的世界级铜矿基地。西藏米拉山地区评价了驱龙铜矿、甲玛铜多金属矿、邦铺铜钼多金属矿等 3 个超大型矿床; 其中, 甲玛铜多金属矿成为我国最大的矽卡岩型-斑岩型铜多金属矿, 提出了甲玛斑岩-矽卡岩-角岩

铜矿-脉状金矿“四位一体”矿床模型(唐菊兴等, 2013)和“推-滑覆构造系”控矿(钟康惠等, 2012)的创新认识。深入分析总结了西藏斑岩型铜金矿床与斑岩型铜钼多金属矿床的成矿专属条件与标志(王崴平等, 2010)。滇西北香格里拉格咱地区铜矿勘查评价了 1 处超大型矿床(普朗铜矿)、3 个大型矿床(红山铜矿、铜厂沟铜钼矿、雪鸡坪铜矿)、7 个中型矿床。经多年持续深入的研究, 确定了香格里拉格咱地区印支期斑岩型铜矿带, 填补了我国印支期斑岩型铜矿带的空白(李志鹏等, 2020); 圈定了格咱-洛吉地区燕山期斑岩型钼矿带, 提出了该钼矿带叠加于印支期斑岩型铜矿带之上的认识(李文昌等, 2011)。

3.1.2 锰矿

贵州松桃地区锰矿找矿实现历史性突破。贵州省地质矿产勘查开发局等通过对松桃地区锰矿的持续深入研究, 提出该区锰矿受南华古裂谷中的武陵次级裂谷、石阡-松桃-古丈地堑盆地控制, 建立了“锰矿裂谷盆地古天然气渗漏成矿理论”和“深部隐伏矿找矿预测模型”。在这些新的成矿理论和成矿预测指导下, 在松桃地区发现并评价了 4 处超大型隐伏型锰矿床(西溪堡、道坨、普觉、桃子坪)和 1 处特大型富锰矿床(高地)(袁良军等, 2018)、7 处中型矿床, 新增锰矿石资源量逾 7 亿吨(周琦等, 2016)。松桃地区一批超大型锰矿床的发现和评价, 成为我国最重要的锰矿勘查开发基地, 改变了我国锰矿资源格局和世界级超大型锰矿床以往主要发现于南半球的格局。此外, 贵州遵义锰矿整装勘查区新发现矿产地大型 1 处、中型 4 处。

重庆城口地区锰矿为产于震旦系上统陡山沱组二段的海相沉积型锰矿(“高燕式”锰矿), 通过整装勘查, 突破解决了构造控矿的关键问题, 认识到整个区域的基本构造格架是逆冲叠瓦式构造, 矿体受成矿后期构造的破坏形成多个独立的矿体在倾向上呈叠瓦式排列, 并受走滑运动的影响, 矿体在走向上呈波状弯曲(宁墨免等, 2018), 在此控矿构造理论认识的指导下, 高燕、大渡溪、修齐 3 个矿区锰矿勘查取得了突破, 3 个矿区新增锰矿石资源量分别达大型矿床规模。此外, 重庆秀山小茶园锰矿床(产于南华系下统大塘坡组地层中的“大塘坡式”锰矿床), 近年深部找矿新增锰矿石资源量达到大型矿床规模, 结束了在重庆“大塘坡式”锰矿床以往无大型矿床发现的历史。

3.1.3 铝土矿

贵州黔北务川—正安—道真地区铝土矿实现重大找矿突破,新发现矿产地21处,其中,超大型2处、大型7处、中型10处,使务正道地区成为继黔中之后又一重要的铝工业基地。丰富并发展了务正道地区铝土矿成矿理论,提出准同生期和后期含矿岩系的暴露、淋滤是铝土矿形成的主要控制因素(杜远生等,2014),硅酸盐古风化壳之上滨海潟湖相的古地理环境是关键的成矿部位(李沛刚等,2013),建立了铝土矿成矿模式与找矿模型(金中国,2013)。黔中凯里—黄平—清镇—织金地区铝土矿勘查也取得重要成果,新发现矿产地33处(大型及以上3处、中型14处);提高了黔中铝工业基地的资源保障。重庆南川—武隆—黔江地区的铝土矿勘查发现黔江水田坝大型铝土矿床;南川区九井、大佛岩等矿区普查也取得新进展,提交新发现矿产地10处(大型1处、中型2处)。云南滇东南发现评价了文山丘北大铁大型铝土矿床。此外,乌蒙山区矿产地质调查发现了十多处铝土矿矿点,具有进一步勘查潜力。

3.1.4 金矿

云南勘查评价了鹤庆北衙金多金属超大型矿床、镇沅县上寨和祥云县马厂箐大型金矿床。其中,北衙金多金属矿勘查实现重大找矿突破,新增的资源量金达超大型矿床规模,铜、铅锌、铁矿石、银资源量均达大型矿床规模。总结了北衙金多金属矿区斑岩型+矽卡岩型+热液脉型金多金属矿成矿规律,建立了北衙组碳酸盐岩+多期断裂构造系统+喜马拉雅期富碱斑岩侵位构成了“三位一体”的成矿系统和成矿模式(和中华等,2013;周云满等,2018)。

贵州贞丰—普安地区金矿整装勘查,新发现金矿产地大型及以上2处、中型3处。构建了贵州卡林型金矿多层次构造滑脱成矿系统(刘建中等,2020);划分了黔西南金矿床成矿系列、建立了区域成矿模式(陶平等,2019);总结了构造地球化学弱信息提取技术(李松涛等,2021)。

3.1.5 锂矿

川西地区(康定—道孚—雅江、马尔康—金川)锂矿勘查取得突破性进展,新发现大型及以上矿产地6处、中型矿产地5处,康定市甲基卡、马尔康县党坝、可尔因、斯则木足、金川县李家沟、雅江县木绒、措拉、德扯弄巴等锂辉石矿区新增一批锂

(Li_2O)资源量。川西地区硬岩型锂矿(锂辉石矿)资源储量居国内第一,且品位高,易采选(王登红等,2019),进一步夯实川西地区锂矿资源勘查开发基地。川西以锂为主的稀有金属矿床的成因类型为与晚三叠世侵入岩有关的伟晶岩型矿床。总结了甲基卡式锂矿的成矿理论,建立了地质综合研究—遥感解译配合第四系转石填图—重磁测量优选靶区—电法定位—化探定性—钻探验证的第四系覆盖区立体勘查模型和成矿模型(付小方等,2017;刘善宝等,2020)。西藏盐湖勘查新增一批锂(LiCl)资源量,为盐湖资源产业基地建设提供了资源保障。在贵州、云南等地的石炭系、二叠系碳酸盐岩中发现“碳酸盐黏土型锂矿床”,富锂黏土是下伏碳酸盐岩地层经过长期的风化—沉积作用形成,在科研示范区的调查估算了潜在矿产资源锂(Li_2O),并认为此种类型锂矿在我国或有广阔的资源前景(中国科学院地球化学研究所,2019)。

3.1.6 钒钛磁铁矿

在四川攀西攀枝花、红格、白马、太和等钒钛磁铁矿矿区勘查,新发现钒钛磁铁矿大型及以上矿产地4处、中型矿产地13处、小型矿产地5处,矿床类型主要为岩浆分异型。新增钒钛磁铁矿石资源量数十亿吨及一批钽、钷资源量(伴生为主),为国家级攀西战略资源创新开发试验区增强了资源保障。

3.1.7 钨矿

云南麻栗坡县沟秧河、洒西、草果山、高桅槽、马关县保良街等矿区(段)的钨矿勘查,新增一批钨(WO_3)资源量。其中,沟秧河矿区提交的钨资源量达超大型矿床规模。沟秧河、洒西等白钨矿为产于下元古界猛硐岩群南秧田岩组的层控矿床,矿床成因类型被认为是海底火山喷发沉积—变质成因的层状矽卡岩型矿床(石洪召等,2011)、岩浆热液交代成因(蔡倩茹等,2018)、岩浆水与大气水混合成因(王彩艳等,2020)。云南文山官房白钨矿床经勘查评价达大型矿床规模,矿床类型为矽卡岩型(张亚辉等,2011)。在西藏矿产地质调查发现山南努日东钨铜钼矿、革吉县角西钨矿等大型矿产地,有关矿床类型为矽卡岩型矿床。

3.1.8 铬铁矿

在西藏罗布莎、香卡山铬铁矿区,通过老矿山找矿项目和企业自主勘查,新增一批铬铁矿矿石资源量。罗布莎铬铁矿探明单层矿体厚度达到48.88米的铬铁矿体,为罗布莎岩体迄今为止发现的最大

厚度矿体(中国矿业编辑部,2015)。

3.1.9 稀土矿

四川冕宁牦牛坪稀土矿和德昌大陆乡稀土矿勘查新增一批稀土资源量,大陆乡稀土矿的成矿模式为深源-浅成-岩浆成矿(朱伟,2019)。云南发现和评价了建水普雄大型铈稀土矿矿床,矿床成因为产于碱性岩体的风化壳型矿床(王敏等,2020)。在滇西腾冲花岗岩带和临沧花岗岩带稀土找矿取得重要发现,新发现稀土矿产地15处(大型7处、中型7处、小型1处),矿床类型为花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿(张彬等,2018;曾凯等,2019),滇西地区有望成为新的国家级稀土资源勘查开发基地。在贵州威宁地区发现沉积型稀土矿,提交新现矿产地3处(李子沟、鱼布沟、毛家坪),稀土矿产于二叠系宣威组底部,稀土含矿岩系广泛分布、连续性好,稀土矿为下伏峨眉山玄武岩风化剥蚀沉积产物(田恩源等,2021)。

3.1.10 晶质石墨矿

扬子陆块西缘攀西地区勘查评价了一批晶质石墨矿,包括四川省盐边县高家村田坪、米易县白马镇茅坪、攀枝花市仁和区大田镇三大湾、南江县赖宜梁、云南省牟定县戌街等大中型石墨矿产地。茅坪、三大湾等石墨矿床的成因类型为区域变质与热接触变质形成的沉积变质型矿床(龙波等,2019;万平益等,2020)。扬子陆块西缘晶质石墨矿具有很好的勘查开发潜力。此外,在藏东左贡县发现和评价了青果石墨矿。

3.1.11 铅锌矿

铅锌矿是西南地区优势明显的矿种,云南、西藏、四川、贵州的铅锌矿产勘查共新增铅锌资源量数千万吨。云南勘查评价了镇康县芦子园超大型铅锌多金属矿床、保山市隆阳区西邑大型铅锌矿床、沧源县金腊大型铅锌矿床、云南省马关县万龙山矿区大型锌锡矿床;建立了镇康芦子园与隐伏花岗岩有关的矽卡型铅锌铁多金属矿(吕昶良等,2013;邓明国等,2018);提出保山西邑铅锌矿床成因类型为海底喷气沉积型(SEDEX型)+热液叠加改造型,并建立了地层+构造+硅钙面+蚀变分带组合“三位一体”找矿预测地质模型(程家龙等,2020);提出马关县万龙山矿区锌锡矿成矿作用主要与燕山晚期的岩浆热液有关,矿床类型为矽卡岩型锌锡多金属矿床(郭耀文等,2018)。贵州省赫章县猪拱塘铅锌矿区发现厚度大、品位高的隐伏铅锌

矿体,为贵州首个发现的超大型铅锌矿床。西藏山南扎西康铅锌矿、昌都县哇了格铅矿、甲玛铜多金属矿区新增铅锌资源量均达大型矿床规模。

3.1.12 磷矿

川滇黔地区是我国磷矿最重要的分布区,磷矿勘查取得重大成果。共新增磷矿石资源量数十亿吨,极大地提高了我国磷矿的资源储备。其中,贵州开阳磷矿以东磷矿、瓮安县白岩背斜磷矿、织金地区磷矿勘查新发现矿产地大型及以上16处、中型7处。四川雷波县小沟磷矿、西谷溪磷矿勘探新增磷矿石资源量均达大型以上规模。研究建立了生物化学初始成磷—波浪簸选—淋滤三阶段磷矿成矿模式(张亚冠等,2019)。云南镇雄羊场新发现超大型隐伏磷矿,单矿体厚度达30米以上,为我国迄今已发现的最大规模磷矿体,预测磷矿资源潜力巨大,镇雄羊场磷矿有望打造成为我国又一个“昆阳式”大型磷矿资源接续基地。

3.1.13 锑矿

重庆市大足区兴隆锑矿延伸普查发现并评价兴隆特大型锑矿床,目前已成为亚洲最大规模的锑矿床(重庆市地勘局205地质队,2013)。兴隆锑矿床的含矿岩系为三叠系下统嘉陵江组二段,矿床成因类型为沉积-改造型矿床。该矿床的发现是通过重庆市玉峡式锑矿床保存条件研究,提出锑矿床保存情况与地下水分带密切相关的创新性认识指导下,大胆跳出锑矿找矿传统模式,终于在溶蚀带下发现保存较好的厚大优质锑矿体,实现了找矿突破。

3.1.14 钼矿

在重庆城口县钼矿(毒重石)找矿新发现老鸹寨、巴山、左岚等3个大型钼矿产地,进一步巩固了城口钼矿资源居亚洲第一的位置。城口地区的钼矿赋存于寒武系下统巴山组地层中,为沉积改造型矿床(吴春梅等,2019)。

3.1.15 硅石矿

在乌蒙山扶贫区实施的优势矿产调查评价中,于滇东北彝良一大关地区发现并评价5处优质硅石矿(石英砂岩矿)(云南彝良县蜂子沟、潘家寨、钟鸣、大关县青杠、天星),共估算潜在矿产资源硅石达15.55亿吨,各矿产地均达1亿吨以上,均达超大型矿床规模。矿床成因类型为滨海相机械沉积型,含矿地层为中泥盆统缩头山组,矿石为细粒石英砂岩。经当地政府招商引资,已有多家硅生产企业入

驻开展硅石资源开发,助推形成滇东北地区硅产业开发基地,有效支撑服务脱贫攻坚。

3.1.16 铍矿

近年来在西藏喜马拉雅成矿带东段错那县错那洞穹隆构造区,发现和评价了日纳铍钨锡矿、昌明铍矿、错那洞铍锡矿、祥林铍锡矿等大型矿产地,矿床类型为矽卡岩型和岩浆热液脉型。错那洞穹隆矽卡岩型铍稀有金属矿床的形成,被认为与中新世约 ca. 14Ma 高分异的白云母花岗岩岩浆作用有关(梁维等,2020)。调查成果显示,喜马拉雅带铍等稀有金属找矿的潜力巨大,是我国继华南和新疆阿尔泰等大型稀有金属成矿省后,我国又一个新的稀有金属成矿带(李光明等,2017;梁维等,2020)。

3.2 成矿理论和技术方法创新促进找矿突破

如上所述,近十年对西南地区铜、锰、铝、金、锂、钨、铅锌、磷、锑等矿产的成矿理论和勘查技术方法组合取得了一系列创新成果。随着地质找矿从浅表向深部推进,成矿理论和技术方法创新是推动深部隐伏矿产找矿突破的关键。对贵州松桃、重庆城口地区锰矿产区岩相古地理、古构造对锰矿形成的控制、以及成矿后构造对锰矿体改造作用认识的深化,在总结形成“裂谷盆地古天然气渗漏成矿理论”和“深部找矿预测方法技术体系”的指导下,实现了锰矿找矿的历史性突破。贵州开阳磷矿东西两翼深部磷矿勘查突破和云南镇雄羊场超大型隐伏磷矿的发现,也是在对岩相古地理深入研究和优选出 AMT 技术参数组合的指引下实现的。贵州赫章猪拱塘铅锌矿、重庆城口钼矿、重庆大足兴隆锑矿等的勘查突破都是在深化成矿理论认识、突破传统找矿思路后取得的。岩相古地理的深入精细研究对沉积型或沉积-改造型矿产的成矿预测显得非常重要。总而言之,加强成矿理论创新、物探等技术方法创新应用、科学有效的成矿预测、实施工程验证是实现找矿突破的必由之路。

4 油气勘查进展与理论创新

十年来,西南地区油气地质调查和勘探极大深化了主要含油气盆地油气地质条件、油气成藏和分布规律的理论认识。系统地总结了四川盆地及邻区油气(含页岩气)富集模式;部署和实施了一批页岩气地质调查井和参数井,实现多个油气新区、新类型、新层系、新理论、成藏新模式的突破或重要发

现;圈定了系列油气靶区,拓展了油气勘查空间。四川盆地天然气(含页岩气等非常规气)探明地质储量快速增长,累计新增探明地质储量数万亿立方米,新增一大批页岩气田。创新形成了一系列油气成藏理论和页岩气勘查开发新技术和新装备,为油气勘查重大突破奠定坚实的理论和技術基础。

4.1 深化主要含油气盆地油气地质条件和成藏规律认识

4.1.1 梳理总结了西南地区主要油气盆地

有针对性地开展了西南地区不同尺度的油气区域地质调查工作,进一步查明了油气的空间分布规律,主要含油气盆地有:上扬子早古生代海相盆地(主要是震旦系、寒武系、志留系等);上扬子晚古生代海相盆地(二叠系栖霞组、茅口组等)和上扬子中生代海相盆地(嘉陵江组);中生代陆相盆地(四川盆地、扬子西缘楚雄盆地、南坪-思茅盆地,上三叠统、侏罗系、白垩系);煤层气盆地(下二叠统梁山组、上二叠统龙潭组/宣威组、三叠系须家河组和白果湾组);青藏高原羌塘盆地、措勤盆地、比如盆地、昌都盆地等。

4.1.2 梳理总结了含油气盆地的油气系统

在总结含油气盆地的基础上,进一步梳理总结出各盆地常规油气的含油气系统(烃源岩、储集系统、圈闭)和页岩气的重要显示层系。

(1)重要油气盆地常规油气的烃源岩

上扬子海相盆地自下而上发育上震旦统陆山沱组、下寒武统筇竹寺组泥页岩、下志留统龙马溪组泥页岩、中二叠统栖霞组-茅口组碳酸盐岩和上二叠统龙潭组/吴家坪组泥页岩等5套区域性烃源岩;以及上二叠统大隆组、中三叠统雷口坡组和上三叠统马鞍塘组-小塘子组等3套局部烃源岩。四川盆地(中生代陆相盆地)发育三叠系须家河组三段和须家河组五段2套烃源岩。西藏羌塘盆地发现3套最有利烃源岩:上三叠统土门格拉组泥页岩,中侏罗统布曲组泥灰岩、泥岩,中侏罗统色哇组页岩。

(2)重要油气盆地常规油气的储集系统

四川盆地及周缘主要有三种储层:碳酸盐岩储层、致密砂岩储层和火山岩储层(马永生等,2010)。碳酸盐岩储层以白云岩为主,次为石灰岩,优质储层主要受礁滩相和白云石化作用控制;致密砂岩储层主要受三角洲水下分流河道砂体和溶蚀作用控制,裂缝在气田高产中占极其重要地位;火山岩储层以龙泉山两侧及川西地区发育的火山角砾凝灰

岩、熔结火山角砾岩为主(文龙等,2019)。油气勘探过程中,预测并找到规模发育的优质储层,便有可能发现大型天然气田。

羌塘盆地自下而上发育三套储层。下部储层为中泥盆统一三叠统被动大陆边缘沉积储层;中部储层为上三叠统前陆盆地沉积肖茶卡群碎屑及碳酸盐岩;上部储层为侏罗系陆架盆地沉积,两个沉积旋回碎屑岩与灰岩交互出现。羌塘盆地油气储层总厚度一般都在 10000 米以上,储层条件很好。

(3) 常规油气的重要圈闭

四川盆地发育多种类型的圈闭,已发现的大型气田主要以构造-岩性复合型圈闭、岩性圈闭和构造圈闭为主,圈闭类型和大小决定着气藏类型及储量规模(魏国齐等,2019;李书兵等,2019)。四川盆地发现的普光气田和元坝深层、超深层海相大型气田就是典型的构造-岩性复合圈闭;川中安岳气田受古隆起控制,属于构造-岩性气藏;龙门山山前构造带的川西气田为构造型圈闭。

中上扬子地区晚中生代大规模的滑脱构造造成多层次滑脱冲断,形成了雪峰山西侧地区的“隔档式”和“隔槽式”变形带,并使海相油气藏重新运移和聚集。雪峰山西侧主要存在四种构造圈闭:滑脱冲断圈闭、滑脱褶皱圈闭、断坡遮挡圈闭和滑脱层圈闭(王宗秀等,2012;谢渊等,2012)。

羌塘盆地二维地震攻关取得重大突破,获得高信噪比地震资料,识别出 28 个地腹圈闭构造,通过参数井-地震联合反演标定,建立了羌塘盆地首个可靠的地球物理解译标杆。

(4) 页岩气的重要显示层系

西南地区页岩气调查发现多层系存在较好的页岩气显示,主要有震旦系陡山沱组、大塘坡组、寒武系筇竹寺组、乌训组、变马冲组、九门冲组、牛蹄塘组、奥陶系五峰组、志留系龙马溪组、石牛栏组、中泥盆统火烘组、下石炭统旧司组、打屋坝组、二叠系龙潭组、三叠系须家河组、侏罗系自流井组等地层。除了下石炭统旧司组、打屋坝组主要分布于贵州南盘江盆地外,其余层系在四川盆地及周缘均有分布。目前,页岩气主要勘探层系为筇竹寺组、五峰组-龙马溪组、旧司组、龙潭组。

页岩气显示的层位与常规油气烃源岩的许多层位相同,页岩气层本身就是烃源岩,如果有合适的构造形成天然气迁移通道,在合适的储层可形成天然气田,页岩气层也可以成为较好的储存圈闭

构造。

4.1.3 圈定油气(含非常规气)多个勘查有利区

通过调查研究,圈定了四川盆地不同层位的多个油气(含非常规气)的勘查有利区,明确了油气勘探方向。震旦系-寒武系油气勘查有利区有绵竹-长宁裂陷两侧台缘带、高石梯-磨溪古隆起斜坡部位、绵竹-长宁裂陷内部孤立丘滩体、万源-达州裂陷周缘灯影组二段台缘带、川东高陡构造区;石炭系油气勘查有利区为川东高陡构造之间的向斜区;栖霞组-茅口组油气勘查有利区为川西和川中地区;长兴组-飞仙关组油气勘查有利区为开江-梁平裂陷两侧台缘带的坡西地区和川西北地区、鄂西-城口裂陷西侧台缘礁滩;须家河组油气勘查有利区为前陆斜坡带和前陆凹陷带。沿绵阳-长宁拉张槽油气富集带、川西火山机构群发育区、川西北栖霞组台地边缘滩相发育带,川西坳陷斜坡区雷口坡组四段 3 亚段和川西坳陷须家河组三段深盆气是下一步油气勘探的重要方向(魏国齐等,2019;李书兵等,2019)。

圈定了贵州东部大塘坡组一段黑色页岩分布区;黔西北-黔中-黔南(黔西南)石炭系打屋坝组分布区;黔北遵义正安地区五峰组、龙马溪组、石牛栏组分布区;黔南(黔西南)中泥盆统火烘组分布区;贵州威宁石炭系旧司组分布区;黔西南二叠系领薨组分布区;雪峰山隆起西南缘与黔南坳陷接触带寒武系乌训组、变马冲组、九门冲组、牛蹄塘组、震旦系陡山沱组分布区等黑色页岩分布区。

在四川盆地及邻区下古生界龙马溪组共优选出 22 个有利区,主要分布于川中高陡构造带(8 个)、川南低缓背斜构造带(2 个)、川西南古隆起构造带(3 个)、滇东北冲断带(3 个)、黔西北宽缓褶皱带(5 个)、扬子边缘丽江-盐源冲褶带(1 个)。牛蹄塘组优选出 4 个有利区带,主要为威远背斜及外围、广元-镇巴推覆带前缘、城口-巫溪推覆带前缘及威信曲信向斜带。

4.2 油气地质调查新发现一批油气新区、新层位、新类型、成藏新模式

自然资源部中国地质调查局组织实施的油气(主要是页岩气)调查选区,在贵州、云南、四川、西藏等地油气调查新区和矿权空白区部署实施了一批页岩气(及煤层气)调查井和参数井,获得多地多层系页岩气突破和重要发现,拓展了油气勘查空间。位于黔北正安的安页 1 井,石牛栏组获得日产

超过 10 万立方米的稳定天然气产量;并首次在我国发现高产海相致密天然气藏;发现中志留统石牛栏组、上奥陶统宝塔组、下二叠统栖霞组油气新层位,实现油气新区、新类型、新层系、新理论、成藏新模式等“五新”突破,提交的勘查区块经进一步的勘探有望形成工业气田(中国地质调查局油气资源调查中心,2016)。滇东北大关的云大页 1 井直井段压裂试气获得日产 5280 立方米的工业气流;滇西北宁浪的宁地 1 井首次在康滇古陆以西钻获稳定天然气流,发现中泥盆统碳山坪组、大槽子组油气新层系;川南沐川的沐地 2 井实现了常规气、页岩气、致密砂岩气“三气”重要发现,碳酸盐岩储层酸压裂试气获日产 16800 立方米的工业气流;川东华蓥山的华地 1 井首次在川东高陡构造带实现页岩气重要发现;黔东南丹寨的丹地 1 井获得重要油气显示,发现震旦系陡山沱组、寒武系乌训组、变马冲组、九门冲组、牛蹄塘组等页岩气新层系;黔西北威宁的威地 1 井发现下石炭统旧司组页岩气新层系;黔西南紫云的紫页 1 井发现石炭系打屋坝组、二叠系领蓐组油气新层系;西藏羌塘盆地的羌科 1 井,发现侏罗系布曲组、雀莫错组油气新层系及 13 层气测异常显示。这些新区页岩气的重要发现,为下一步页岩气勘查部署及储量突破提供了方向和区块;获得了系列页岩气评价参数,建立了页岩气选区评价体系及标准;总结了四川盆地及邻区龙马溪组页岩气富集模式;建立了复杂构造条件下碳酸盐岩对页岩气勘探控制模式。

4.3 油气勘查理论创新指导四川盆地天然气(含页岩气)勘查重大突破

近十年,在西南地区加大了油气地质调查和研究,对油气成藏取得一系列创新认识,中石化(中国石油化工股份有限公司)、中石油(中国石油化工股份有限公司)等油气企业在四川盆地的天然气(含页岩气等非常规气)勘探取得重大突破,特别是在涪陵页岩气田的示范引领下,先后发现安岳、威远、威荣、长宁、泸州、南川、永川、昭通等一批志留系龙马溪组页岩气田,探明天然气地质储量快速增长,新增天然气地质储量数万亿立方米,提高了我国天然气的保障水平。

(1)中石化探索并提出了南方复杂构造区海相页岩气“二元富集”理论,指导发现并探明中国首个特大型页岩气田——涪陵页岩气田。

中石化探索并提出了复杂构造区海相页岩气

“二元富集规律”理论,即:深水陆棚优质泥页岩发育是页岩气“成烃控储的基础”,良好的保存条件是页岩气“成藏控产”的关键(郭旭升,2014),建立了焦石坝页岩气藏“阶梯运移、背斜汇聚、断-滑控缝、箱状成藏”的高产富集模式(郭彤楼和张汉荣,2014);认为富有机质泥页岩的发育程度、保存条件、天然裂缝的发育和泥页岩的可压裂性等是下古生界海相页岩气富集高产的主控因素。在此新理论指导下,发现并探明中国首个特大型页岩气田——涪陵页岩气田(郭旭升等,2021;蔡勋育等,2021b)。

(2)中石油建立了从海相碳酸盐岩“四古控藏”新认识到深层海相碳酸盐岩“三古”控藏理论认识,有效指导了安岳特大气田发现。

中石油在“十二五”提出海相碳酸盐岩“四古控藏”,即古裂隙、古丘滩体、古圈闭、古隆起时空有效配置控制特大型海相碳酸盐岩气田的形成与富集(邹才能等,2014;魏国齐等,2015),到“十三五”创新深化深层海相碳酸盐岩“古裂隙、古侵蚀面、古隆起”三古控藏理论认识(赵文智等,2017;周进高等,2018;马新华等,2019a),新理论有效指导发现安岳万亿立方米级特大型气田,寒武系龙王庙组和震旦系灯影组新增天然气探明地质储量 1.15 万亿立方米(何海清等,2021),推动天然气勘探由古隆起高部位向低部位、由构造气藏向岩性地层气藏、由单一气层向多气层的三大转变(杜金虎等,2016;冯建辉等,2016;何海清等,2021)。

(3)建立了深层页岩气富集模式,深层页岩气勘探取得重大突破。

针对四川盆地五峰组—龙马溪组深层页岩气藏的地质特点,研究建立了深层页岩气两类“超压富气”模式,即以东溪东斜坡为代表的盆内高陡背斜/向斜“超压富气”模式和以丁山构造深层为代表的盆缘低缓断鼻/斜坡“超压富气”模式,指导了深层页岩气勘探的重大突破,探明了国内首个深层页岩气田——威荣页岩气田(蔡勋育等,2021a)。并在四川盆地长宁、威远、昭通新增大批天然气探明地质储量,川南地区形成了我国首个万亿立方米级页岩气大气区。此外,针对川南地区深层页岩气(3500~4000 m)也开展了理论技术攻关和勘探部署,在泸州等地区有 18 口井获高产气流,其中泸 203 井获百万立方米以上高产气流,深层页岩气勘探取得了多地重大突破。

(4)中石油创建深层火山岩油气藏“三元”控藏新模式,永探1井实现二叠系火山岩气藏的勘探重大突破。

中石油创建深层火山岩油气藏“三元”控藏新模式:德阳—安岳裂陷寒武系巨大的生气潜力提供了资源基础(烃源);厚层喷溢相火山碎屑岩提供了优质储集条件(储层);上二叠统泥岩、下三叠统厚层膏盐岩(盖层)是天然气规模成藏的重要保障。在四川简阳市的二叠系火山岩部署实施的风险探井永探1井,在二叠系火山岩测试获气22.5万立方米/天的高产气流,首次在四川盆地发现了喷溢相火山碎屑岩气藏,实现了火山岩气藏勘探的重大突破,发现盆地孔隙型火山岩储层新领域,估算资源量超万亿立方米,具备良好的油气勘探前景(马新华等,2019b),为四川盆地油气勘探提供了新区、新领域、新层系。

(5)安页1井总结形成油气调查新理论和新成藏模式。

安页1井实现页岩气的突破,创新提出了深水陆棚相页岩、稳定的构造保存、地层超压“三位一体”的页岩气富集高产理论,实现了由传统的盆地找油气向造山带找油气、由正向构造找油气向负向构造找油气思路的两个历史性转变;建立了“断层封堵向斜成藏、常规与非常规油气共生共存”的油气成藏新模式,对南方复杂地质构造区油气勘查具有重要指导意义(中国地质调查局油气资源调查中心,2016)。

(6)创新形成了页岩气勘查开发技术体系,提升了中国页岩气开发装备技术水平。

创新形成了页岩气藏综合评价、水平井优快钻井、长水平井分段压裂试气、试采开发配套、绿色开发配套等具有涪陵海相页岩气特色的五大技术体系(石文睿等,2015)。自主研发了步进式、轮轨式、导轨式等可移运和高效作业的“井工厂”钻机,大功率3000hp压裂机组、连续油管作业车、高效钻具组合、可钻式桥塞及配套井下工具,实现了3500米以浅工程技术装备的国产化,大幅提升了国产石油机械装备的研发和制造水平(蔡勋育等,2021a)。

5 地质灾害和水工环地质调查进展

5.1 重点调查区地质灾害调查与监测预警

2011—2020年,以支撑国家和地方防灾减灾为目标,西南地区重点围绕地质灾害早期识别、监测

预警、风险评价及防灾减灾方法等开展调查研究与应用示范,解决重大及复杂地质灾害问题,建设和完善地质灾害信息系统。

5.1.1 提高重点区域地质灾害调查程度

主要开展了大巴山区、渝东北地区、乌蒙山区、川西—藏东等重要城镇和交通干线以及涪江、金沙江、怒江和澜沧江等流域地质灾害调查、重要县(市)地质灾害调查监测,提高了相关区域地质灾害调查程度;查明了深切河谷地区、红层地区、汶川地震灾区、高寒山区等重大地质灾害成灾背景、发育分布规律、主要灾害类型与特点;查明部分深切河谷地区堆积层和岩质斜坡在重力(时效变形)、强降雨、强震等条件下大型滑坡、崩塌的成灾机理与动力响应规律;查明汶川地震灾区崩滑集中堆积物泥石流、高寒山区冰湖溃决泥石流、山区低频泥石流等典型类型泥石流的启动机理,建立针对性的预测评价方法。完成调查区域地质灾害风险性评价,编制了专业性与应用性并重的地质灾害调查示范性成果图件,提高了对区域地质灾害形成演化和分布规律的认识水平;提出了有可操作性的防灾减灾建议。

5.1.2 提升高山峡谷地区地质灾害特征认识与早期识别精度

针对西部高山峡谷地区地面调查难以获取数据的状况,探索了无人机倾斜摄影数据采集、三维实景建模、地质灾害遥感解译的技术方法创新;利用机载雷达测量、倾斜摄影、无人机航拍等遥感技术,有效地提升了对灾害体的整体观察和局部刻画精度;实现了遥感数据从二维到三维的转变,多角度全方位观测灾害体(斜坡、滑坡、崩塌)及周边地质特征,提高了调查效率;形成基于三维可视化技术的地质灾害调查评价技术方法,有效解决了人工难到达的高陡斜坡地区地质数据获取技术难题,提升了对高山峡谷地区潜在地质灾害特征认识与早期识别精度。

5.1.3 建立地质灾害监测与早期预警技术方法体系

针对西南地区崩滑流灾害的特点及形成条件、影响因素,以孕灾条件为主线,利用高精度遥感、机载LiDAR、三维激光扫描等现代对地观测手段进行重大地质灾害隐患早期识别的技术方法,并通过典型地区(流域)地质灾害“天—空—地”综合一体化监测预警示范,建立了一套适合于西南地区地质灾

害监测预警技术方法体系。研发滑坡简易激光测距法和新型埋桩法,扩展了实测对象和监测范围,提高了监测精度。采用“地表+深部”监测相结合的思路,在地面部署基于全球卫星系统、地表裂缝计等技术的地表位移监测,在地下部署基于倾斜仪等技术的深部位移监测,形成从地表到地下一体的立体监测,结合地方政府建立的群测群防体系,推动“技防+人防”专群结合监测预警网建设,提升了地质灾害全天候实时监测预警能力,形成了地质灾害数据管理-应急-监测数据传输-统计分析于一体的多要素数据管理平台(铁永波等,2020),有效减少人民生命和财产损失。

5.1.4 地质灾害信息系统建设促进灾害预警预报自动化

建立了用于存储和管理包括基础地质信息、地质灾害信息、监测数据等多源信息数据管理系统,研发了数据信息共享接口。基于云平台和移动终端,实现了地质灾害野外在线调查;基于移动互联网和地图导航定位技术,实现了地质灾害信息适时发布和险情数据快速汇聚和挖掘。推广地质灾害防治管理支撑层次化、数据采集智能化、监测手段多样化、预警预报及时化和信息服务一体化的“五化”模式,构建了中央与地方分工合作的防灾减灾新模式,实现地质灾害调查、群测群防、搬迁避让、工程治理等数据采集规范化和智能化,地质灾害调查评价、监测预警、综合治理、应急等综合防治信息互联互通、一体化管理,实现了地质灾害防治成果资料信息化管理和防灾减灾信息发布与服务,畅通了“县—市—省—全国”四级数据库动态更新。

5.2 重点区域水文地质和水资源调查

5.2.1 完成重点流域水文地质调查和水资源评价

完成西南地区长江流域、乌蒙山区、川渝鄂岩溶区、红水河上游岩溶流域、嘉陵江、乌江、南北盘江等流域水文地质调查和水资源评价,查明流域地下水质量和资源潜力。2019年7月至2020年6月,西南地区长江流域内地下水资源总量为1227.53亿立方米,其中四川608.2亿立方米(约占49.55%)、贵州269.93亿立方米(21.99%)、云南185.89亿立方米(15.14%)、重庆149.36亿立方米(12.17%)、西藏14.15亿立方米(1.15%)。建设了水资源评价数据库,提高了有关流域水资源管理和开发利用水平。

5.2.2 查明青藏高原水资源状况和冰川湖泊变化趋势

据调查,2016年青藏高原降水量为647毫米,水资源总量7805亿立方米,其中地表水资源量6213亿立方米,地下水资源量1592亿立方米,总用水量为88亿立方米,地下水用水32亿立方米。青藏高原地区是我国最大的湖泊分布区,面积大于1平方千米的湖泊有1091个,湖泊总面积约44993平方千米,约占到我国湖泊总面积的52%,主要分布在海拔4000~5000m的范围内。近50年来,青藏高原年平均气温约上升2℃,气候呈暖湿化变化趋势,水环境空间分布特征发生了显著的变化,由现代冰川补给的河流湖泊水量增加,冰川面积退缩了15%,多年冻土面积减少了16%;湖泊数量增多、面积明显增大,80%以上的湖泊面积都在扩张。反映了近50年气温上升、冰川消融、冰土减少、湖泊增长的演变规律。调查结果应对青藏高原气候变化和水资源、水环境保护提供了科学依据。

5.2.3 实施扶贫找水有效服务脱贫攻坚

在贫困缺水地区开展以1:5万为主的水文地质调查,据不完全统计,实施地下水探采结合开发示范井300余口。在四川省广安市邻水县牟家镇打出全省迄今最大自流地热井,日出水量16000立方米,水温约42℃,支撑当地温泉旅游业开发。建成一批地下水和地下河开发利用示范工程,直接解决了大约100多万人的饮水困难及80万亩耕地用水难题,提高了缺水困难地区水资源的保障。新发现富锶、富锂地下水点300余处,部分具备大规模开发潜力。水文地质调查精准服务脱贫攻坚的成效显著。

5.2.4 国家级地下水监测工程一期建成运行

西南地区建设地下水监测站点918个,实现了区域控制性水位、水质和水温自动化监测,支撑国家级地下水监测工程一期建成运行,全国实现水资源量年度出数。建设和完善全国地下水信息系统(李文鹏,2019),显著地提高了地下水资源的监测和管理水平。

5.3 生态地质调查

生态地质调查目前仍处于起步阶段,西南地区自2019年以来,在四川大凉山地区和滇西北洱海地区开展了生态地质调查,对前者的初步成果概述如下。

5.3.1 建立了大凉山区生态地质脆弱性评价指标体系

围绕大凉山区气象、水文、地形地貌、地质环境、成土母质、土壤、生态环境,建立了评价指标,并针对这些评价指标,进一步细分为年降水量、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、太阳总辐射量、流域面积、含水岩组富水性、

坡度、坡向、沟壑密度、海拔、岩石抗风化能力、断裂等密度、地质灾害易发性、成土母质、土壤类型、土壤侵蚀强度、生态系统类型、人口密度和植被覆盖度等共计 18 项评价指标体系。由此完成了大凉山生态地质脆弱性的评价分区,并提出了生态保护恢复的对策建议。

5.3.2 初步形成了西南山区生态地质图的编制方法

探索提出了用土壤地质单元图表达生态地质基础的地表基质层(岩石圈和土壤圈)的分布特征(欧阳渊等,2021)、用生态系统分类图表达地表覆盖的生态系统和人类活动的现状和展布、用脆弱性评价角图、生态功能区划角图、生态地质分区图和生态地质单元评价表等来表达各生态地质单元的生态功能属性,服务不同生态功能区的国土空间用途管制。此外,还可将建造构造图、第四纪地质图、水文地质图等以角图或底图形式表达在图面上,形成岩石圈-水圈-生物圈等多圈层融合的地表与地下一体化综合图件,系统地反映研究区地球表层系统中各生态地质要素的现状、特征、展布和交互关系,初步形成西南山区生态地质图的编制方法(刘洪等,2022)。

5.4 城市地质调查

2018 年以来,西南地区开展了成都多要素城市地质调查、黔中城市群(重点为贵安新区)综合地质调查,探索城市地质调查的内容、技术方法体系,以解决重大城市地质安全风险问题,为国土空间规划和城市地下空间利用提供科学依据。成都市城市地质调查主要成果简介如下。

5.4.1 查明成都市地下空间三维地质结构

查明成都市城市地质体的空间特征和区域地质构造特征,构建覆盖城市全域的基岩地质、第四纪地质、水文地质、工程地质三维地质结构模型和地表形态(山、水、田、湖)立体模型;评价区域稳定性和资源环境承载力,提出优势地质资源科学利用和重大地质问题防治的对策建议,为区域主体功能区划和国土规划编制提供重要的依据。

5.4.2 查明成都市自然资源家底

按照生态文明建设和自然资源管理需求,查清成都市各类自然资源(耕地、水、山体、湿地、地热和浅层地温能、地质遗迹等)的家底(种类、数量、质量、空间分布)和变化情况。

5.4.3 查明制约地下空间开发的各类地质问题

查明成都市空港高技术产业功能区地下空间开发利用需要重点关注防范的工程地质问题,包括

富水松散卵砾石土、软土、含膏盐(钙芒硝)泥岩以及相关层位地下水问题,阐明有关地质体的空间分布及变化规律,指出有关地质体对工程施工可能造成的不利影响。

5.4.4 开展地下空间开发利用潜力和地下空间利用适宜性评价

以成都市天府新区为重点研究区,以“结构、问题、资源”等地质指标为基础,建立了“多元地质结构地下空间开发适宜性评价体系”。在全面查明天府新区核心区 0~200 米地下空间地质结构、资源和不良地质条件的基础上,开展了地下空间开发利用适宜性和资源潜力评价,0~200 米地下空间资源总量为 447.76 亿立方米,其中资源蕴藏量 438.83 亿立方米,可合理开发资源量 122.79 亿立方米。并提出了综合开发利用建议。

5.4.5 建设了成都市城市地质综合信息系统和地下空间政府决策分析平台

基于全国地质大数据和自然资源大数据的标准体系,集成城市历史时期各行各业形成的地质信息和成果,形成了支撑政府部门管理、城市建设规划的城市地质数据标准体系,实现地质成果一张图展示,打造地下三维可视化的“透明城市”,建设了“成都市城市地质综合信息系统和地下空间政府决策分析平台”。

5.5 资源环境承载力评价和国土空间开发适宜性评价

2019 年以来开展了重庆市、西藏自治区、四川省广安市等的资源环境承载力评价和国土空间开发适宜性评价(简称“双评价”),相关成果简介如下。

5.5.1 重庆市“双评价”试评价探索形成了市—县—乡镇三级“双评价”技术方法

中国地质调查局联合重庆市规划和自然资源局、重庆市规划设计研究院等,开展了重庆市“双评价”试评价工作。提出了生态、农业、城镇空间部分评价指标选取、方法优化、阈值调整的建议,建立了基于雷达图的区县主体功能定位方法,探索形成了市—县—乡镇三个级别的“双评价”技术方法。基本查明重庆市资源禀赋与环境条件,识别重庆市生态保护重要区,明确农业生产、城镇建设最大合理规模和适宜空间,为编制重庆市国土空间规划提供基础性依据。

5.5.2 西藏自治区“双评价”支撑西藏国土空间规划

在充分梳理西藏自然地理格局的基础上,查明

了西藏地区的自然灾害和资源(水、矿产、水能、地热等资源)利用状况,并对生态环境保护、农业生产(种植业)、畜牧业生产和城镇建设适宜性进行评价,为国土空间格局优化提供依据。根据“双评价”结果,按照生态、农业、城镇的优先顺序,提供生态保护红线划定空间基础、永久基本农田和城镇开发边界优先领域,提出利用资源禀赋、生态保护的战略地位、种植业和畜牧业的承载能力、城镇建设承载规模等方面的建议。

5.6 自然资源综合调查支撑服务自然资源管理和国土空间规划

2019年以来,中国地质调查局与广安市合作开展了广安市自然资源综合调查。调查圈定页岩油气有利区6处;提交水泥用石灰岩和玄武岩矿产地4处;圈定富硒土地484平方千米、绿色富铜富锌土地1032平方千米,提出可直接开发利用集中连片水稻和玉米富硒富锌种植基地12处,为农业示范区建设、土地资源合理配置、现代特色农业发展提供支撑。首次在广安市前锋区发现恐龙地质遗迹化石及大规模第四纪哺乳动物群化石。在邻水县实施的多口地热井成功出水(包括日出水量达16000立方米的牟家镇地热井),发现62处富锶泉水。查明华蓥山生态区水资源状况、开发利用方式,实施探采结合井6眼,解决了缺水地区群众的用水困难;查明了地质灾害及生态环境地质问题,提出了资源开发与生态保护对策建议。推进打造邻水县甘坝乡龙须村“康养+科普研学一体”的典型示范性地质文化村建设。查明了广安市地质结构、地下空间资源,为“宜居宜业宜游”城市与康养小镇规划建设提供了地质支撑和安全保障。通过对广安市的调查实践,实现了从以往单一对象的调查到多门类自然资源、生态环境、地质灾害、空间结构等综合调查。

6 讨论与结论

6.1 近十年重大进展及转型发展小结

近十年来,随着国家经济社会发展对地质工作提出的新需求,地质调查服务方向从支撑服务矿产资源管理为主向支撑服务整个自然资源管理转变,西南地区的地质调查工作发生深刻的转型发展。现将西南地区地质调查重大进展和转型发展作简要的归纳总结如下。

(1)区域地质调查支撑服务国家重大战略和区域发展战略。以1:5万为主的区域地质调查,紧密围绕重要成矿带战略性矿产勘查、铁路等重大工程规划建设、脱贫攻坚、地质安全风险评价等领域部

署实施,为相关业务领域提供了重要基础地质资料,支撑解决重大工程建设面临的地质安全风险问题。提出了特提斯构造演化、扬子陆块前寒武纪构造-地层格架、南盘江盆地三叠纪生物演化等方面的新认识,提高了区域重大地质问题的认知水平。

(2)提高了国家部分能源和矿产资源的保障程度。油气地质调查从常规油气更多地转向页岩气调查,实现了多个新区、新类型、新层系页岩气的重要发现,拓展了油气勘查空间;四川盆地天然气(含页岩气等非常规气)成藏理论取得系列创新,指导天然气勘探取得了重大突破,新发现多个大型气田。矿产地质勘查实现了铜、锰、铝、金、锂、品质石墨、磷等一批战略性矿产的突破,创新了黔东松桃地区锰矿、西藏甲玛铜多金属矿、云南鹤庆北衙金多金属矿等成矿理论认识。但随着矿产勘查资金投入从“十二五”中期达高峰期后逐步降低到“十三五”末达低谷期的变化,“十三五”时期取得的矿产勘查成果与“十二五”相比大为减少。

(3)提高了地质灾害监测预警和水资源及土地资源管理与开发利用水平。提升了西南山区地质灾害早期识别、监测预警能力,提高了地质灾害预警预报自动化水平。实施了大气水、地表水、地下水的综合调查,查明了一些重要地区和流域的水文地质和水资源状况,建设了一批地下水监测站点,支撑国家级地下水监测工程一期建成运行,提高了水资源调查监测和管理水平,解决了乌蒙山等缺水贫困地区大批群众的用水困难。土地质量地球化学调查助推形成一批特色农业示范基地,促进了农业产业发展。相关调查成果精准服务脱贫攻坚的成效显著。

(4)随着经济从高速发展转向高质量发展,地质调查实现了转型发展,地质工作不断向支撑服务自然资源管理、国土空间规划、生态文明建设等方向拓展,催生了诸多新兴地质调查业务领域,包括生态地质调查、城市地质调查、资源环境承载能力评价和国土空间开发适宜性评价、自然资源综合调查等,经过试点探索,明确了相关领域的调查内容,初步建立了调查理论及技术方法体系,调查成果及时有效地支撑服务国土空间规划、城市地下空间利用、生态环境建设和自然资源管理工作,扩展了服务功能。这些领域的调查评价尚处于起步探索阶段,调查的理论和研究方法体系还不够健全,有待于进一步完善。

6.2 未来十年西南地区地质调查工作展望

在开启社会主义现代化国家建设的新征程,我

国仍面临资源能源需求总量大、对外依存度高的形势;生态文明建设、乡村振兴、国家重大战略和区域发展战略、碳达峰和碳中和行动等要求地质工作不断拓展服务领域,地质调查工作将会在传承与变革中发展。根据全国、西南地区和各省(市、区)地质调查规划部署研究成果,结果西南区位特点分析,预计未来十年西南地区的地质调查重要任务方向为:

(1)能源矿产资源调查着力提高能源和战略性矿产资源的保障程度。全国即将实施新一轮找矿突破战略行动,预计未来十年的矿产勘查投入将会有较大幅度的增加。西南地区着重加强清洁低碳能源(页岩气、煤层气、干热岩、地热等)和战略性矿产资源(锰、铜、锂、锡、钨、钼、铝、稀土、锑、金、磷、铬、钴、镍、铍、铀、钾盐、钒、钛、镓、铟、铌、铍等)调查,推进干热岩、地热、煤层气等勘查和开发产业化。四川盆地及周缘深层天然气资源勘探、西藏羌塘盆地油气地质调查、其它油气新区、新层系、新领域及非常规油气调查是未来油气勘查的重要方向。将进一步创新西南地区能源资源成藏理论和勘查技术、战略性矿产成矿理论和勘查技术、矿产综合利用技术;建立与完善矿产资源基地综合评价技术方法,推动大型能源资源基地建设。

(2)基础地质调查支撑服务国家重大战略和区域发展战略。开展青藏高原相关铁路、水电站等重大工程规划建设区的地质安全风险评价和成渝、滇中、黔中等城市群的城市地质安全风险评价,建立与完善地质安全风险评价理论技术。开展西南山区重大地质灾害链隐患识别与防范,创新重大地质灾害孕灾、致灾机理,攻克高精度监测预警技术。开展土地质量地球化学调查、健康地质调查、地质遗迹调查等,创新相关调查评价理论和方法技术,促进天然富硒土地资源开发利用,推进地质文化村镇建设,促进地质旅游发展,促进乡村振兴和健康中国建设。

(3)生态地质调查支撑服务生态修复治理。开展青藏高原重要生态屏障、长江上游重要生态功能区、西南石漠化分布区、西南重要矿集区和资源型城市历史遗留矿山等生态地质调查,建立生态地质调查工作体系,深化自然生态系统演替规律和内在机理研究,为大江大河生态修复与荒漠化、石漠化、水土流失等重大生态环境问题综合治理提供系统解决方案,促进人与自然和谐共生。

(4)自然资源综合调查服务自然资源管理和国土空间规划。建立健全自然资源综合调查监测体

系,查明矿产、水、土地、森林、草原等自然资源的现状和演变。建立与完善资源环境承载能力与国土空间开发适宜性评价理论与技术方法,提升服务生态文明建设和自然资源管理工作的能力和水平。

(5)区域地质调查促进地球系统科学理论创新。开展西南关键廊带和重点区区域地质调查,加强对成油、成矿、生态、致灾的地质背景、地质过程、控制因素等关键基础地质问题研究,深化青藏特提斯构造演化、上扬子陆块前寒武纪地质构造演化及资源效应、罗平生物群等中生代生物演化研究,创新青藏高原地球系统科学理论。

(6)以信息化建设带动地质调查转型发展。构建以“大数据驱动、智能化智慧化应用、知识化服务”的地质调查信息化应用体系,实现地质调查业务的全流程数字化转型。加强西南地区基础地质数据集成,构建数字油气盆地、数字成矿区带、数字流域、数字生态功能区等,为资源环境、国土空间规划、地球系统科学问题解决提供强大的基础数据支撑。对海量地学数据的获取、处理、分析和应用的能力是未来衡量地质工作者和单位实力的重要体现。

可以预见,未来十年西南地区地质调查将会在支撑服务能源和矿产资源安全、地质安全风险防范、自然资源综合调查监测体系建设、生态环境整治、国土空间利用、区域地学理论、地质调查信息化建设等方面不断创新发展,会极大地提升服务国家重大战略和自然资源管理的能力和水平。

后记:本文作者根据所掌握的信息尽力对西南地区近十年地质调查进展进行较全面的总结,但因地质调查涉及的专业领域多,作者对地方地质调查和商业性能源矿产勘查等进展和成果的了解掌握不够齐全,总结难免以偏概全、挂一漏万,欢迎读者批评指正!相关地质调查成果是众多单位和地质工作者辛勤劳作的结晶,我们表示崇高的敬意!因受篇幅所限在本文中未能对成果获得的单位和人员全部注明,敬请谅解!成都地质调查中心李建星、邓国仕、铁永波、余谦等对本文的撰写给予了指导和帮助,审稿人对本文提出了宝贵的修改意见。我们对成果被本文引用的单位和个人、对本文撰写及修改给予指导和帮助的人员一并表示衷心的感谢!

注释:

①地质调查工作程度可在“地质云”(https://geocloud.cgs.gov.cn)

上查阅。

参考文献 (References):

- Benton M J, Zhang Q Y, Hu S X, et al., 2013. Exceptional vertebrate biotas from the Triassic of China, and the expansion of marine ecosystems after the Permo-Triassic mass extinction [J]. *Earth Science Reviews*, 125: 199 - 243.
- Chen Z Q, Benton M J, 2012. The timing and pattern of biotic recovery following the end-Permian mass extinction [J]. *Nature Geoscience*, 5: 375 - 383.
- Cheng H, Liu Y M, Jeffrey D, et al., 2015. Combined U-Pb, Lu-Hf, Sm-Nd and Ar-Ar multichronometric dating on the Bailang eclogite constrains: The closure timing of the Paleo-Tethys ocean in the Lhasa Terrane, Tibet [J]. *Gondwana Research*, 28 (4): 1482 - 1499.
- Cheng H, Zhang C, Jeffrey D, et al., 2012. Zircon U-Pb and garnet Lu-Hf geochronology of eclogites from the Lhasa Block, Tibet [J]. *Lithos*, 155: 341 - 359.
- Cheng L, Chen X H, Shang Q H, et al., 2014. A new marine reptile from the Triassic of China, with a highly specialized feeding adaptation [J]. *Naturwissenschaften*, DOI 10.1007/s00114 - 014 - 11.
- Cheng L, Chen X H, Zeng X W, et al., 2013. A New Eosauropterygian (Diapsida: Sauropterygia) from the Middle Triassic of Luoping, Yunnan Province [J]. *Journal of Earth Science*, 23: 33 - 40.
- Cui X Z, Wang J, Ren G M, et al., 2020. Paleoproterozoic tectonic evolution of the Yangtze Block: New evidence from ca. 2.36 - 2.22 Ga magmatism and 1.96 Ga metamorphism in the Cuoke complex, SW China [J]. *Precambrian Research*, DOI: 10.1016/j.precamres.2019.105525.
- Cui X Z, Wang J, Wang X C, et al., 2021a. Early crustal evolution of the Yangtze Block: Constraints from zircon U-Pb-Hf isotope systematics of 3.1 - 1.9 Ga granitoids in the Cuoke Complex, SW China [J]. *Precambrian Research*, DOI: 10.1016/j.precamres.2021.106155.
- Cui X Z, Lin S F, Wang J, et al., 2021b. Latest Mesoproterozoic provenance shift in the southwestern Yangtze Block, South China: Insights into tectonic evolution in the context of the supercontinent cycle [J]. *Gondwana Research*, 99: 131 - 148.
- Hu S X, Zhang Q Y, Chen Z Q, et al., 2013. The Luoping biota: exceptional preservation, and new evidence on the Triassic recovery from end-Permian mass extinction [J]. *Proceeding of the Royal Society, Series B*, 278: 2274 - 2282.
- Huang J Y, Feldmann R M, Schweitzer C E, et al., 2013. A new shrimp (Decapoda, Dendrobranchiata, Penaeoidea) from the Middle Triassic of Yunnan, Southwest China [J]. *Journal of Paleontology*, 87(4): 603 - 611.
- Huang J Y, Hannibal J T, Rodney M F, et al., 2018. A new millipede (Diplopoda: Helminthomorpha) from the Middle Triassic Luoping biota of Yunnan, Southwest China. *Journal of paleontology*, doi: 10.1017/jpa.2017.93.
- Liu J, Hu S X, Olivier R, et al., 2014. A gigantic nothosaur (Reptilia; Sauropterygia) from the Middle Triassic of SW China and its implication for the Triassic biotic recovery [J]. *Scientific Report*, 71 - 42.
- Liu J, Jonathan C A, Sun Y Y, et al., 2011a. New Mixosaurid Ichthyosaur specimen from the Middle Triassic of SW China: further evidence for the diapsid Origin of Ichthyosaurs [J]. *Journal of Paleontology*, 85(1): 32 - 36.
- Liu J, Motani R, Jiang D Y, et al., 2013. The first specimen of the Middle Triassic Phalarodon Atavus (Ichthyosauria; Mixosauridae) from South China, showing postcranial anatomy and Peri-Tethyan distribution [J]. *Palaeontology*, 56(4): 849 - 866.
- Liu J, Olivier R, Jiang D Y, et al., 2011b. A new pachypleurosaur (Reptilia: Sauropterygia) from the Middle Triassic of southwestern China and the phylogenetic relationships of Chinese pachypleurosaur [J]. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 31(2): 292 - 302.
- Shang Q H, Wu X C, Li C, 2011. A new eosauropterygian from the Middle Triassic of eastern Yunnan Province, southwestern China [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 49(2): 155 - 171.
- Tang Y, Qin Y D, Gong X D, et al., 2020. Discovery of eclogites in Jinsha River suture zone, Gonjo County, eastern Tibet and its restriction on Paleo-Tethyan evolution [J]. *China Geology*, 3(1): 83 - 103.
- Wang B D, Wang L Q, Pan G T, et al., 2013. U-Pb zircon dating of Early Paleozoic gabbro from the Nantinghe ophiolite in the Changning-Menglian suture zone and its geological implication [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(8): 920 - 930.
- Wen W, Zhang Q Y, Hu S X, et al., 2013. Coelacanths from the Middle Triassic Luoping Biota, Yunnan, South China, with the earliest evidence of ovoviviparity [J]. *Acta Palaeontologica Polonica*, 58(1): 175 - 193.
- Wen W, Zhang Q Y, Zhou C Y, et al., 2012. A new genus of basal actinopterygian fish from the Anisian (Middle Triassic) of Luoping, Yunnan Province, Southwest China [J]. *Acta palaeontologica polonica*, 57(1): 149 - 160.
- Xiao Q R, Xiong F H, Zhao H, et al., 2018. First discovery and zircon U - Pb dating of Early Ordovician granitoids in Lincang batholith, western Yunnan: Implications for the presence of Proto - Tethyan orogeny in the Sanjiang region, SW China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(1): 404 - 405.
- Zhang Q Y, Wen W, Hu S X, et al., 2014. Nothosaur foraging tracks from the Middle Triassic of southwestern China [J]. *Nature Communications*, 5: 3973.
- Zhao G C, Cawood P A, 2012. Precambrian geology of China [J]. *Precambrian Research*, 222 - 223: 13 - 54.
- 蔡倩茹, 燕永锋, 杨光树, 等, 2018. 滇东南南秧田砂卡岩型钨矿床成矿演化 [J]. *矿床地质*, 37(1): 116 - 136.
- 蔡勋育, 刘金连, 张宇, 等, 2021a. 中国石化“十三五”油气勘探进展与“十四五”前景展望 [J]. *中国石油勘探*, 26(1): 31 - 42.
- 蔡勋育, 赵培荣, 高波, 等, 2021b. 中石化页岩气“十三五”发展成果与展望 [J]. *石油与天然气地质*, 42(1): 17 - 27.
- 程家龙, 崔子良, 李俊, 2020. 云南省保山市西邑大型铅锌隐伏矿床找矿预测地质模型 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 50(5): 1450 - 1461.

- 重庆市地勘局 205 地质队, 2013. 重庆发现特大型锆矿床[J]. 矿产勘查(6): 595.
- 崔晓庄, 任光明, 孙志明, 等, 2020. 扬子陆块西南缘早前寒武纪摄科杂岩记录的多期岩浆-变质事件[J]. 地球科学, 45(8): 3054-3069.
- 邓明国, 陈伟, 王学武, 等, 2018. 滇西芦子园远程砂卡岩 Pb-Zn-Fe (Cu) 多金属矿床流体包裹体初探及矿床成因探讨[J]. 岩石学报, 34(5): 1239-1257.
- 董宇超, 解超明, 于云鹏, 等, 2018. 西藏工布江达县龙崖松多榴辉岩的发现及意义[J]. 地质通报, 37(8): 1464-1471.
- 杜金虎, 杨涛, 李欣, 2016. 中国石油天然气股份有限公司“十二五”油气勘探发现与“十三五”展望[J]. 中国石油勘探, 21(2): 1-15.
- 杜远生, 周琦, 金中国, 等, 2014. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿成矿模式[J]. 古地理学报, 16(1): 1-8.
- 冯建辉, 蔡勋育, 牟泽辉, 等, 2016. 中国石油化工股份有限公司“十二五”油气勘探进展与“十三五”展望[J]. 中国石油勘探, 21(3): 1-13.
- 付小方, 侯立玮, 梁斌, 等, 2017. 甲基卡式花岗伟晶岩型锂矿床成矿模式与三维勘查找矿模型[M]. 北京: 科学出版社: 1-227.
- 耿元生, 旷红伟, 刘永清, 等, 2017. 扬子地块西、北缘中元古代地层的划分与对比[J]. 地质学报, 91(10): 2151-2174.
- 耿元生, 刘永清, 高林志, 等, 2012. 扬子克拉通西南缘中元古代通安组的形成时代[J]. 地质学报, 86(9): 1479-1490.
- 郭彤楼, 张汉荣, 2014. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 41(1): 28-36.
- 郭旭升, 2014. 南海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘查实践认识[J]. 地质学报, 88(7): 1210-1218.
- 郭旭升, 蔡勋育, 刘金连, 等, 2021. 中国石化“十三五”天然气勘探进展与前景展望[J]. 天然气工业, 41(8): 12-22.
- 郭耀文, 张庆松, 朱派彬, 等, 2018. 云南万龙山锡钨多金属矿床硫、铅同位素特征及矿物质来源研究[J]. 地质找矿论丛, 33(4): 564-572.
- 何海清, 范士芝, 郭绪杰, 等, 2021. 中国石油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”发展战略[J]. 中国石油勘探, 26(1): 17-30.
- 和中华, 周云满, 和文言, 等, 2013. 滇西北衙超大型金多金属矿床成因类型及成矿规律[J]. 矿床地质, 32(2): 244-258.
- 金中国, 2013. 黔北务正道地区铝土矿成矿规律研究[M]. 北京: 地质出版社: 1-158.
- 李光明, 张林奎, 焦彦杰, 等, 2017. 西藏喜马拉雅成矿带错那洞超大型铍锡钨多金属矿床的发现及意义[J]. 矿床地质, 36(4): 1003-1008.
- 李光明, 张林奎, 吴建阳, 等, 2020. 青藏高原南部洋板块地质重建及科学意义[J]. 沉积与特提斯地质, 40(1): 1-14.
- 李括, 彭敏, 赵传冬, 等, 2019. 全国土地质量地球化学调查二十年[J]. 地学前缘, 26(6): 128-158.
- 李沛刚, 赵芝, 刘新星, 等, 2013. 贵州务正道铝土矿区域成矿规律及其对整装勘查的意义[J]. 岩矿测试, 32(5): 832-839.
- 李书兵, 胡昊, 宋晓波, 等, 2019. 四川盆地大型天然气田形成主控因素及下一步勘探方向[J]. 天然气工业, 39(s1): 1-8.
- 李松涛, 刘建中, 夏勇, 等, 2021. 黔西南卡林型金矿聚集区构造地球化学弱矿化信息提取方法及其应用研究[J]. 黄金科学技术, 29(1): 53-63.
- 李文昌, 尹光侯, 余海军, 等, 2011. 滇西北格咱火山-岩浆斑岩成矿作用[J]. 岩石学报, 27(9): 2541-2552.
- 李文鹏, 2019. 地质灾害隐患和水文地质环境地质调查计划进展[J]. 水文地质工程地质, 46(2): 1-4.
- 李志鹏, 赵高举, 曾红坤, 等, 2020. 滇西普朗铜金矿成矿地质条件及找矿潜力初探[J]. 地质找矿论丛, 35(3): 273-278.
- 梁维, 李光明, 张林奎, 等, 2020. 藏南错那洞铍稀有多金属成矿时代: 来自热液白云母 Ar-Ar 年龄的约束[J]. 沉积与特提斯地质, 40(1): 76-81.
- 刘桂春, 孙载波, 曾文涛, 等, 2017. 滇西双江县勐库地区湾河蛇绿混杂岩的形成时代、岩石地球化学特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 36(2): 163-174.
- 刘洪, 李文昌, 欧阳渊, 等, 2022. 基于地质建造的西南山区生态地质编图探索与实践[J/OL]. 地质学报, 96, 1-16 (网络首发).
- 刘建中, 王泽鹏, 杨成富, 等, 2020. 中国南方卡林型金矿多层次构造滑脱成矿系统[J]. 中国科技成果, 21(14): 49-51.
- 刘善宝, 王成辉, 王登红, 等, 2020. 四川甲基卡锂伟晶岩转石分布区“3定2参”大比例尺填图法及其在青藏高原应用的意义[J]. 地质学报, 94(1): 326-332.
- 龙波, 彭松林, 吴得强, 2019. 中坝石墨矿与三大湾石墨矿成矿地质条件对比[J]. 四川地质学报, 39(s1): 40-45.
- 罗波, 谢建, 2016. 滇西临沧地块下古生界花岗岩的发现及地质意义——LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 城市地理, 20: 58-59.
- 吕昶良, 邓明国, 胡伟, 2013. 云南镇康芦子园铅锌矿成矿条件及赋存规律研究[J]. 地质找矿论丛, 28(4): 529-534.
- 马新华, 杨雨, 文龙, 等, 2019a. 四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 46(1): 1-13.
- 马新华, 杨雨, 张健, 等, 2019b. 四川盆地二叠系火山碎屑岩气藏勘探重大发现及其启示[J]. 天然气工业, 39(2): 1-8.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等, 2010. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方[J]. 石油学报, 31(3): 347-354.
- 聂洪峰, 肖春蕾, 任伟祥, 等, 2021. 生态地质研究进展与展望[J]. 中国地质调查, 8(6): 1-8.
- 宁括步, 任光明, 邓奇, 等, 2021. 扬子陆块西缘黎溪地区 ~1.5 Ga 变辉长岩与 Columbia 超大陆裂解[J]. 地质通报, 40(11): 1671-2552.
- 宁墨奂, 陈龙, 李建, 等, 2018. 重庆市城口县锰矿整装勘查区构造组合特征及控矿模式[J]. 现代矿业, 34(9): 48-53.
- 欧阳渊, 张景华, 刘洪, 等, 2021. 基于地质构造的西南山区成土母质分类方案——以大凉山为例[J]. 中国地质调查, 8(6): 50-62.
- 庞维华, 任光明, 孙志明, 等, 2015. 扬子地块西缘古—中元古代地层划分对比研究: 来自通安组火山岩锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 中国地质, 42(4): 921-936.
- 彭智敏, 张辑, 关俊雷, 等, 2018. 滇西“三江”地区临沧花岗岩基早—中奥陶世花岗岩质片麻岩的发现及其意义[J]. 地球科学, 43(8): 2571-2585.
- 任光明, 庞维华, 潘桂棠, 等, 2017. 扬子陆块西缘中元古代菜子园蛇绿混杂岩的厘定及其地质意义[J]. 地质通报, 36(11): 2061-2075.
- 任光明, 庞维华, 孙志明, 等, 2014b. 扬子西缘会理地区通安组角闪岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 矿物岩石, 34(2): 33-39.
- 任光明, 庞维华, 王立全, 等, 2020. 扬子陆块西南缘 3.8 Ga 碎屑锆石及其地质意义[J]. 地球科学, 45(8): 3040-3053.
- 任光明, 庞维华, 尹福光, 等, 2014a. 扬子陆块西缘格林威尔造山过

- 程、南华裂谷作用及其成矿效应综合研究[R]. 成都:中国地质调查局成都地质调查中心:1-246.
- 石洪召,张林奎,任光明,等,2011. 云南麻栗坡南秧田白钨矿床层控似矽卡岩成因探讨[J]. 中国地质,38(3):673-680.
- 石文睿,张超谟,张占松,等,2015. 涪陵页岩气田焦石坝页岩气储层含气量测井评价[J]. 测井技术,39(3):357-362.
- 孙载波,胡绍斌,周坤,等,2018. 滇西南勐海布朗山奥陶纪花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成特征及其构造意义[J]. 地质通报,37(11):2044-2054.
- 唐菊兴,郑文宝,陈毓川,等,2013. 西藏甲玛铜多金属矿床深部斑岩矿体找矿突破及其意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版),43(4):1100-1110.
- 陶平,陈启飞,祁连素,2019. 黔西南金矿区域成矿规律及成矿模式[J]. 贵州地质,36(2):110-119.
- 田恩源,龚大兴,赖杨,等,2021. 贵州威宁地区沉积型稀土含矿岩系成因与富集规律[J]. 地球科学,46(8):2711-2731.
- 铁永波,徐勇,张勇,等,2020. 南方山地丘陵区地质灾害调查工程主要进展与成果[J]. 中国地质调查,7(2):1-12.
- 万平益,王光洪,周勇,等,2020. 四川省米易县茅坪石墨矿床地质特征及找矿标志探讨[J]. 中国锰业,38(1):22-25.
- 王保弟,王立全,王冬兵,等,2018. 三江昌宁-孟连带原-古特提斯构造演化[J]. 地球科学,43(8):2527-2550.
- 王彩艳,任涛,王蝶,等,2020. 滇东南南秧田超大型钨矿床流体包裹体及 H、O 同位素研究[J]. 大地构造与成矿学,44(1):103-118.
- 王登红,刘善宝,于扬,等,2019. 川西大型战略性新兴产业矿产基地勘查进展及其开发利用研究[J]. 地质学报,93(6):1444-1453.
- 王冬兵,罗亮,唐渊,等,2016. 昌宁-孟连结合带牛井山早古生代埃达克岩锆石 U-Pb 年龄、岩石成因及其地质意义[J]. 岩石学报,32(8):2317-2329.
- 王冬兵,王保弟,唐渊,等,2021. 西南三江特提斯研究进展与展望[J]. 地质通报,40(11):1799-1813.
- 王立全,王保弟,李光明,等,2021. 东特提斯地质调查研究进展综述[J]. 沉积与特提斯地质,41(2):283-296.
- 王敏,周家喜,刘凤祥,等,2020. 滇东南建水普雄钨矿床矿物学和元素地球化学特征[J]. 地质学报,94(12):3746-3760.
- 王崴平,唐菊兴,郑文宝,等,2010. 西藏甲玛铜多金属矿床角岩型矿体地质特征[J]. 矿床地质,29(S1):292-294.
- 王宗秀,张进,关会梅,等,2012. 雪峰山西侧地区构造形变与油气圈闭[J]. 地质通报,31(11):1812-1825.
- 魏国齐,杨威,刘满仓,等,2019. 四川盆地大气田分布、主控因素与勘探方向[J]. 天然气工业,39(6):1-12.
- 魏国齐,杨威,杜金虎,等,2015. 四川盆地高石梯-磨溪古隆起构造特征及对特大型气田形成的控制作用[J]. 石油勘探与开发,42(3):257-265.
- 文龙,李亚,易海永,等,2019. 四川盆地二叠系火山岩岩相与储层特征[J]. 天然气工业,39(2):17-27.
- 吴春梅,赵德虎,闫继勇,等,2019. 重庆市城口县巴山钼矿(毒重石)矿床特征及成因分析[J]. 冶金管理(21):76-77.
- 谢渊,王剑,汪正江,等,2012. 雪峰山西侧盆地过渡带震旦系一下古生界油气地质调查研究进展[J]. 地质通报,31(11):1750-1768.
- 熊江,唐川,陈明,2021. 泥石流早期识别与监测预警研究进展探讨[J]. 自然灾害学报,30(1):165-173.
- 徐志刚,陈毓川,王登红,等,2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京:地质出版社:1-149.
- 杨经绥,梁凤华,陈松永,等,2006. 中国境内可能存在一条新的高压/超高压(?)变质带——青藏高原拉萨地体中发现榴辉岩带[J]. 地质学报,80(12):1787-1792.
- 尹福光,王冬兵,孙志明,等,2012a. 哥伦比亚超大陆在扬子陆块西缘的探秘[J]. 沉积与特提斯地质,32(3):31-40.
- 尹福光,孙志明,任光明,等,2012b. 上扬子陆块西南缘早—中元古代造山运动的地质记录[J]. 地质学报,86(12):1917-1932.
- 尹福光,孙洁,常梦瑶,等,2019. 中华人民共和国地质图(西南)[M]. 北京:地质出版社.
- 袁良军,周琦,姚希财,等,2018. 贵州松桃高地特大型富锰矿床主要地质特征[J]. 贵州地质,35(4):314-318.
- 张彬,马国桃,高儒东,等,2018. 滇西腾冲-梁河地区土官寨离子吸附型稀土矿床形成条件及找矿预测[J]. 地球科学,43(8):2628-2637.
- 张文浩,高永进,周新桂,等,2021. 公益性油气基础地质调查的进展与发展方向[J]. 地质学报,95(5):1630-1643.
- 张亚冠,杜远生,陈国勇,等,2019. 富磷矿三阶段动态成矿模式:黔中开阳式高品位磷矿成矿机制[J]. 古地理学报,21(2):351-368.
- 张亚辉,张世涛,冯明刚,等,2011. 云南文山官房钨矿床团山矿段围岩蚀变与矿化规律研究[J]. 现代地质,25(4):740-749.
- 赵文智,魏国齐,杨威,等,2017. 四川盆地万源—达州克拉通内裂陷的发现及勘探意义[J]. 石油勘探与开发,44(5):659-669.
- 中国地质调查局油气资源调查中心,2016. 贵州遵义安页1井页岩气、油气调查获重大突破[J]. 中国地质调查,3(4):76-77.
- 中国科学院地球化学研究所,2019. 地化所发现新类型锂矿床世界级锂资源基地初见雏形[J]. 黄金科学技术,27(3):349.
- 钟康惠,李磊,周慧文,等,2012. 西藏甲玛-卡军果推-滑覆构造系特征[J]. 地球学报,33(4):411-423.
- 曾凯,李朗田,祝向平,等,2019. 滇西勐往-曼卖地区离子吸附型稀土矿成矿规律与找矿潜力[J]. 地质与勘探,55(1):19-29.
- 周进高,沈安江,张建勇,等,2018. 四川盆地德阳—安岳台内裂陷与震旦系勘探方向[J]. 海相油气地质,23(2):1-9.
- 周琦,杜远生,袁良军,等,2016. 贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘查区地质找矿主要进展及潜力预测[J]. 贵州地质,33(4):237-244.
- 周云满,张长青,和中华,等,2018. 滇西北衙金多金属矿床成矿作用特征标志[J]. 地质找矿论丛,33(1):1-14.
- 周长勇,张启跃,黄金元,等,2017. 南盘江盆地首次发现早三叠世海生爬行动物化石[J]. 地质通报,36(1):168-171.
- 中国矿业编辑部,2015. 西藏罗布莎铬铁矿探获 48m 矿体[J]. 中国矿业,24(A2):108.
- 朱伟,2019. 德昌大陆乡稀土矿成矿模式[J]. 世界有色金属(22):82-83.
- 邹才能,杜金虎,徐春春,2014. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发,41(3):278-293.