

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.03.002

西北地区地质、资源、环境与社会经济概貌

计文化, 王永和, 杨博, 张静雅, 辜平阳, 高晓峰

(中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要:西北地域广阔,地质条件复杂,能源与大宗紧缺矿产资源丰富,水资源短缺,生态环境脆弱,社会经济发展相对滞后。西北地区是中国乃至亚洲水塔重要组成部分,是国家生态安全的重要屏障,是国家战略性矿产资源的主要产地和后备基地,是“一带一路”建设的核心区,是巩固脱贫攻坚成果、维护边疆稳定与民族团结的关键区域。笔者总结了西北区域地质与资源概况、自然地理与环境概况、社会经济发展概况,意在揭示地质-资源-环境与社会经济发展的内在关系和互馈作用;在梳理中共中央、国务院关于黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要,以及新时代推进西部大开发形成新格局的指导意见对地质工作需求的基础上,提出了新时期西北公益性地质调查10个方面的工作部署、3个方面协同创新的建议。

关键词:西北地区;区域地质;矿产资源;环境地质;自然地理;社会经济

中图分类号:P56;P66;X24 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6248(2022)03-0015-13

Overview of Geology, Resources, Environment and Social Economy in Northwest China

Ji Wenhua, WANG Yonghe, YANG Bo, ZHANG Jingya, GU Pingyang, GAO Xiaofeng

(Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Northwest China has a vast territory, complex geological conditions, abundant energy and bulk scarce minerals resources, shortage of water resources, fragile ecological environment, and relatively lagging social and economic development. The northwest region is a significant part of the water tower in China and even in Asia, an important barrier for national ecological security, the main production area and backup base for national strategic mineral resources, the core area of the “Belt and Road” construction, and a key area for consolidating the achievements of poverty alleviation and maintaining border stability and national unity. On the basis of summarizing the general situation of geology and resources, physical geography and environment, and social and economic development in Northwest China, this paper explores and puts forward the internal relationship and mutual feedback between geology-resources-environment and social and economic development. On the basis of sorting out the needs for geological work of the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council on the planning outline for ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin and the guiding opin-

收稿日期:2021-11-01; **修回日期:**2022-04-02; **网络发表日期:**2022-08-15; **责任编辑:**吕鹏瑞

基金项目:中国地质调查局项目“东天山昌吉-双沟山地区区域地质调查”(DD20190065)、“西北地区区域基础地质调查”(DD20221636)联合资助。

作者简介:计文化(1968-),男,博士,研究员,主要从事区域地质调查工作。E-mail: jiwenhua1968@126.com。

ions on promoting the development of the western region in the new era and forming a new pattern, 10 aspects of the work arrangement and 3 aspects of the suggestions for collaborative innovation are put forward on northwest non-profit geological survey in the new era.

Keywords: Northwest China; regional geology; mineral resources; environmental geology; physical geography; socioeconomic

中国西北地区,全称为中华人民共和国西北地区,又称西北、中国西北、西北地区,是当今中国七大地理分区之一。现今行政区划上的西北地区包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区5个省、自治区,面积约306万 km^2 。自然地理区域划分的西北,除上述5个省、自治区外,还包括内蒙古的呼和浩特市、包头市、乌海市、乌兰察布盟、巴彦淖尔盟、鄂尔多斯市与阿拉善盟等7个市、盟(朱士光,2011),总面积约360万 km^2 。西北地区位于欧亚大陆内陆,地域广阔、能源资源丰富、水资源短缺、生态环境脆弱,社会经济发展相对滞后。

地质、资源环境与社会经济发展密切相关,是人类永恒的研究主题。中三叠世之前的古亚洲、古特提斯两大构造域的演化造就了西北诸陆(地)块的拼贴结构,同时也决定了西北大多数金属矿产资源的分布与禀赋。中生代陆内演化决定了西北地区大多数煤、油气、砂岩型铀矿等能源资源和锂、铍、钼、铅、锌、金等矿产资源的分布。新生代以来印度与欧亚大陆碰撞的远程和滞后效应导致青藏高原“第三极”的形成及西北地区“六山”(秦岭-祁连、昆仑-阿尔金、天山-北山、阿尔泰山、贺兰山、阴山)“五盆”(鄂尔多斯、柴达木、塔里木、准噶尔、银额盆地)盆-山体系的形成。成因上它们分属于青藏高原北部盆-山巨系统、西北西部复活盆-山巨系统和西北东部南北向盆-山巨系统。上述构造-地貌与气候作用共同铸就了西北地区陆地表层自然要素的时空配置,并决定着人类赖以生存的自然地理环境,反过来人类活动又对地理环境发生着越来越明显的改造作用。在一定的科技发展阶段,资源禀赋、地理环境、发展理念与政策是制约区域社会经济发展的主要因素。

在前人大量调查研究总结的基础上,基于西北地质调查大量一手资料,相继在西北地区构造单元区划(徐学义等,2008;计文化等,2020)、大地构造环境与成矿(王永和等,2020)、重要矿产资源潜力分析(董福辰等,2018)、重要矿产概况(杨合群等,2017)、整装勘查及其典型矿床(李智明等,2017)、西北内陆盆地水

资源(侯光才等,2008;尹立河等,2021)、黄土地质灾害(张茂省等,2016,2011a,2011b;唐亚明等,2014)、西北煤炭资源与全国氦气资源(李玉宏等,2015,2018)等方面进行了系统集成与汇总;编制了西北全域、关键地区资源环境系列图件;建立了相关数据库,深化了区域规律认识;有效服务地质调查规划部署,同时支撑西北地区资源有序勘查开发和地质灾害防治等。

自然地理方面,中国学者不但开展了国际前沿的自然地理过程和生存环境的基础理论研究(陈发虎等,2019),而且还随着国家社会经济建设发展的需求,相继在自然环境区域差异与自然区划、土地利用与覆被变化、自然灾害形成运动规律和风险控制、荒漠化过程与防治、多年冻土区工程建设、地球化学元素异常和地方病防治、自然地理要素定位观测、地理空间异质识别和地理探测器等领域开展了大量工作,加深了对西北陆地表层系统格局与过程的认识;同时有效支撑了农业发展、区域发展、资源合理利用和生态文明建设(陈发虎等,2020)。

在生态文明建设、区域社会经济发展及自然资源管理工作新需求的驱动下,基于现代信息技术、观测技术的迅猛发展,以全球性、统一性的整体观、系统观和多时空尺度解决全球资源环境问题的地球系统科学应用而生(徐勇等,2019)。资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价、全国-省-市-县-乡五级的国土空间规划正在有序开展,国土空间规划“一张图”实施监督信息系统正在逐步构建。本文在概述西北地区地质、资源、环境、社会经济概况的基础上,以地球系统科学为指导,提出新时期地质调查工作的方向和建议,力求加强地质学、地理学、自然资源与环境管理的有机结合,拓展地质学的理论实践与成果应用,更加精准有效服务西北地区经济社会发展与生态文明建设。

1 地质与资源概况

1.1 区域地质

现今的中国西北具有典型的盆-山结构,三叠纪

最末一次的洋-陆演化阶段基本铸就了陆(地)块拼贴格局,即:南边是属于特提斯构造域秦-祁-昆造山系,北边是属于古亚洲构造域的中亚造山系,中间是塔里木盆地-阿拉善隆起-鄂尔多斯盆地(李荣社等,2011)。造山带发育各种类型的沉积岩、岩浆岩、变质岩,变形强烈,且具有多期叠加复合造山特点。盆地以沉积岩为主,地层连续性好,变形弱,但多具有下部海相沉积、上部陆相沉积,上下部结构差异显著的叠加盆地特征。经历了新太古宙-青白口纪基底演化、南华纪-早古生代洋-陆演化、晚古生代-中三叠世陆缘演化、晚三叠世以来陆内演化4大构造阶段,最终造就了现今的地质构造与地貌格局。

新太古宙-青白口纪:西北地区结晶基底与褶皱基底形成阶段。在北秦岭、敦煌和东准等地发现有冥古宙地质信息(王洪亮,2010;第五春荣等,2010;黄岗等,2013;赵燕等,2015),主体可分为太古宙-古元古代中深变质岩系组成的结晶基底、中-新元古代浅变质火山-沉积岩系组成的第一个盖层(或变质基底、褶皱基底)和西北地区中南部普遍发育的新元古代早期活动陆缘构造-岩浆热事件记录。经历了太古宙-古元古代陆核形成、增生与“中国地台”(Columbia 超大陆一部分)形成(张文佑,1959),中-新元古代 Columbia 超大陆解体,青白口纪 Rodinia 超大陆聚合形成3大阶段的演化。综合地质演化历史过程中沉积盆地、构造岩浆事件、变质变形作用特征及其与大地构造环境的关系,将西北地区前南华纪可划分为塔里木、华北、扬子“三大陆块区”和哈萨克斯坦-准噶尔-敦煌、华南、西伯利亚“三大陆块群”,反映了地球演化早期阶段“准板块”构造体制下西北地区的总体构造格局和大地构造特征。

南华纪-早古生代:西北地区洋陆发育最具代表性的阶段。南华纪-寒武纪 Rodinia 超大陆伸展-裂解过程中,在西北地区逐渐形成了多岛洋的构造古地理格局。阿尔泰、东准是古亚洲洋板块与西伯利亚陆块相互作用的洋陆过渡体系,天山、北山是古亚洲洋板块与塔里木、敦煌、阿拉善陆(地)块相互作用的洋陆过渡体系。秦岭、祁连、昆仑是原特提斯洋板块与塔里木、华北陆块相互作用的洋陆过渡体系。志留纪-中泥盆世,中天山-北山多岛弧盆系、秦祁昆多岛弧盆系相继与塔里木、柴达木、阿拉善陆(块)发生弧-陆碰撞,形成了多条早古生代蛇绿构造混杂岩带,结束了多岛

洋演化历史(计文化等,2020)。

晚古生代-中三叠世:西北地区诸陆(地)块相继碰撞最终就位的阶段。西北中部在早古生代末-泥盆纪早期汇聚之后全面进入板内稳定演化阶段(D_3 开始),塔里木陆块和柴达木地块在石炭纪-二叠纪可能形成统一稳定的陆表海,祁连早古生代构造带此时已明显准克拉通化,并与华北陆块相连,形成统一的盖层(C_2-T_2)。西北地区北部,除西天山发育残留海并向北深俯冲外(张立飞等,2013),在中天山-北山-阿拉善及其以北,发育以巨量幔源岩浆为主体的陆相-海陆交互相-海相火山岩系和“弧岩浆岩”岩石组合面貌及普遍的退积沉积序列,记录了复杂的碰撞过程。主体经历了①残留洋盆的逐渐关闭(D_3-C_1 末)。②全面进入板内演化阶段(P 开始)2个构造演化过程。而西北南部,西昆仑-东昆仑-宗务隆-陇山-北秦岭中南部及其以南,板块构造持续发展,陆缘伸展-汇聚背景下的构造-岩浆活动剧烈,以汉中-宁陕-柞水一线为界,其东、西差异明显:①中西部(西秦岭及其以西),早期($D-P_2$)以伸展为主,晚期(P_3-T_2)以汇聚为主,整体表现为伸展与汇聚并存,被动陆缘与弧-盆系相间(早期)、造山带与前陆盆地相间(晚期)的构造格局。②东部整体处于伸展状态(东秦岭 $D-T_2$; 上扬子 $P-T_2$),发育被动陆缘。③晚三叠世以后全面进入碰撞造山-陆内演化阶段(T_3 开始)。

晚三叠世-新生代:西北地区除喀喇昆仑山-可可西里中生代尚处于特提斯洋北缘,并发育中生代前陆盆地和同碰撞-后碰撞岩浆岩,显示板缘挤压造山动力学特点外,基本上进入板内构造演化阶段。三叠纪末,形成了造山带与前陆盆地相间的构造格局。侏罗纪-白垩纪以发育板内伸展裂隙-坳陷盆地、压陷盆地和构造热隆起为代表,显示后造山-板内伸展为主的动力学特点。新生代以来,受青藏高原岩石圈加厚、地壳隆升并向北推挤及中国东部近南北向构造的联合控制,形成了秦岭-祁连、昆仑-阿尔金、天山-北山、阿尔泰山、贺兰山、阴山等六大山系和鄂尔多斯、柴达木、塔里木、准噶尔、银额盆地等五大盆地。昆仑-阿尔金、西秦岭-祁连两大山系及其山间-山前盆地、柴达木盆地共同构成了青藏高原北部盆-山巨系统。天山-北山、阿尔泰山两大山系及其山间-山前盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地大部构成了西北地区西部复活盆-山巨系统。贺兰山、阴

山、东秦岭及其山间-山前盆地、鄂尔多斯盆地、银额盆地共同构成西北地区东部南北向盆-山巨系统。

1.2 能源地质

西北能源资源主要有煤炭、石油、天然气、砂岩型铀矿、油页岩、干热岩与地热等,是中国主要传统能源基地和清洁能源接替区。现有伊犁盆地砂岩型铀矿、陕西商洛-丹凤-商南地区铀矿、陕西鄂尔多斯盆地南缘砂岩型铀矿等3个国家级整装勘查区。除硬岩型铀矿外,其他能源资源主要受沉积地质作用及其构造改造控制,主要分布在上述五大盆地,少量分布在山间盆地。

煤炭资源:主要赋存于侏罗系、石炭系。前者产于准噶尔、塔里木、柴达木和鄂尔多斯等4个大型含能盆地的下一中侏罗统河湖相含煤岩系,后者主要产于鄂尔多斯-祁连石炭纪陆表海的海陆交互相含煤岩系,构成西北地区大型聚煤区和多个大型煤田,是中国重要的煤炭及煤化工基地。

石油、天然气及油页岩:往往相伴生产于古生代稳定陆块区海相地层(塔里木、华北之鄂尔多斯、柴达木)及其上叠的中-新生代陆相大型含能盆地及中小盆地群(银额、河西走廊等)(国土资源部油气资源战略研究中心,2016)。

古生代稳定陆块区巨厚海相烃源岩(寒武系、奥陶系、石炭系一下二叠统)形成了多个生烃、供烃中心(塔里木)和天然气多层系富集体系(鄂尔多斯之神木、榆林、苏里格),碳酸盐岩及风化壳古岩溶构成天然气储集体(塔里木之塔河、塔中,鄂尔多斯之靖边);稳定陆块区古隆起、古斜坡控制了古生界海相油气的运移、聚集与成藏,在隆起低部位和斜坡部位形成大中型油气田(塔里木之塔中、塔北、和田古隆起及其斜坡)。

大型陆相含能盆地多上叠于古生代稳定陆块区之上(鄂尔多斯盆地中生界,塔里木盆地、柴达木盆地中-新生界),少数上叠于古生代造山带与地块间杂的复杂构造带之上(准噶尔盆地二叠系-新生系,银额盆地群等)。盆地内部坳陷区构造稳定,河湖相岩性-岩相控制油气藏(鄂尔多斯盆地三叠系、侏罗系,塔里木台盆区三叠系-侏罗系,准噶尔玛湖石炭系-三叠系等)。对沉积作用、沉积相与沉积体系等基础地质的深化研究,促使成藏理论与模式不断更新,为油气田扩产增储起到了理论支撑作用。大型盆地边部构成中-新生代造山带的前陆压陷盆

地(塔里木盆地之库车、塔西南,准噶尔之淮南,柴达木,河西走廊等),以构造-岩性复合油气藏为主(库车盆地新生界、中生界,塔西南盆地新生界、白垩系,柴达木盆地古近系-新近系,准噶尔盆地二叠系-新生界)。盆山结合带的前陆-冲断构造扩展、沉积过程与沉积相迁移、盆地动力学转换等基础调查研究,推动了油气成藏理论创新和油气新发现(塔里木盆地之库车、温宿,准噶尔淮南等)。

砂岩型铀矿:是重要的清洁能源,主要产于西北地区的伊犁、吐哈、鄂尔多斯等中-新生代盆地。近年来,在准噶尔、柴达木和塔里木盆地也有发现。其主要赋存于侏罗系含煤岩系中上部,并具有良好的铀源条件的构造缓坡和适当的地下水交换导致的氧化还原过渡带(伊犁和吐哈盆地南缘、鄂尔多斯盆地北缘和东南缘等),多为层间氧化带型(王永和等,2007)。

地热资源:是重要清洁能源,主要产于新生代沉积盖层之下的新构造或新生代岩浆活动强烈地区,如青海共和盆地干热岩,其下伏中生代花岗岩体。在新生代松散沉积分布区,地下水循环区往往形成水热型地热资源,如关中盆地、新疆塔什库尔干曲曼等。

1.3 优势矿产地质

西北优势矿产有富铁矿、优质富锰矿、铜矿、镍矿、钴矿、铅锌矿、钼矿、金矿、铍铍等稀有金属矿、钾盐、品质石墨等,是国家大宗紧缺和战略性矿产的重要后备基地。现有铜、铁、铅锌、金、镍、钾盐等6类23个国家级整装勘查区。除钾盐受沉积地质作用控制,主要分布在盆地外,其他矿产资源受构造-岩浆-热液控制,主要分布在前述的六大山系,可进一步划分为41个Ⅲ级成矿(区)带,归属于10个成矿省及4个成矿域(徐志刚等,2008;杨合群等,2017)。

铁矿:主要有海相火山岩型、沉积型、沉积变质型3种(杨合群等,2017)。
①海相火山岩型铁矿产于裂谷和岛弧2种构造环境,前者以天山构造带石炭纪铁矿为代表(查岗诺尔、备战、敦德、智博/诺尔湖),后者以松潘构造带新元古代铁矿(杨家坝)和阿尔金早古生代铁矿(喀腊大湾)为典型。
②沉积型铁矿以中秦岭泥盆纪刘岭岩群前陆盆地前缘带沉积型铁矿(大西沟)为典型,另外还有鄂尔多斯地块碳酸盐古风化壳山西式铁矿。
③沉积变质型主要包括新太古代-古元古代结晶基底中深变质条带状磁铁矿建造相关铁矿(赞坎铁矿、老并铁矿、鱼洞子-黑山沟铁

矿)和中新元古代—早古生代伸展裂谷盆地沉积相关浅变质铁矿(祁连镜铁山铁矿、北山红山铁矿、阿尔金迪木那里克铁矿)。

富锰矿:主要为海相化学沉积型,以西昆仑玛尔坎苏富锰矿带(奥尔托喀纳什锰矿床)为代表,产于塔里木陆块与西昆仑构造带之间的石炭纪—二叠纪裂谷(或弧后盆地?)环境。

铜矿:有海相火山岩型和斑岩型2种。前者多产于地壳伸展背景,如西秦岭二叠纪裂谷铜峪沟铜矿、阿尔泰泥盆纪弧后裂谷阿舍勒铜矿、北祁连奥陶纪弧间盆地白银厂铜多金属矿。后者多与后碰撞中酸性岩浆事件相关,如中天山和西准噶尔石炭纪后碰撞花岗岩相关土屋—延东铜矿、包古图铜矿,东昆仑三叠纪同碰撞—后碰撞中酸性岩相关哈日扎铜多金属矿,青藏高原北部古近纪—新近纪后碰撞偏碱性中酸性侵入岩相关多彩铜铅锌矿、纳日贡玛铜矿等。

镍矿:往往与铜钴共(伴)生,多与地幔柱作用或造山后地壳伸展相关。前者如东天山—北准噶尔二叠纪铜镍矿(黄山、黄山东、图拉尔根、坡一、坡十、喀拉通克);后者与超大陆裂解或后碰撞—后造山的伸展环境相关,如与罗迪尼亚超大陆裂解或晋宁运动后碰撞伸展相关铜镍矿(金川超大型铜镍矿,819 Ma±;煎茶岭再造型镍铁钴矿,矿源岩 927.4 Ma±,花岗岩再造成矿 216 Ma±),又如东昆仑早古生代末—晚古生代初深俯冲—后碰撞转换相关铜镍矿(夏日哈木铜镍矿,411Ma)。

钴矿:以产于阿尼玛卿构造带的德尔尼铜钴矿床为典型代表,是卷入蛇绿构造混杂岩的石炭纪海相火山喷流热液沉积形成的块状硫化物铜锌矿,后期造山过程中构造热液作用控制,Co元素在铜锌矿边部富集形成了“套鞋状”钴矿体。

铅锌矿:主要产于被动陆缘和后造山伸展构造环境,往往有后期热液改造或再造,显示叠加成矿特点。前者主要有东天山蓟县纪彩霞山层控—再造型铅锌银矿、柴北缘早古生代锡铁山热水喷流沉积型铅锌矿、扬子陆块北缘奥陶纪马元铅锌矿、中南秦岭泥盆纪裂陷厂坝—凤太—山柞—镇旬多个铅锌矿田等;后者主要为因新生代青藏高原北部地壳加厚调整和陆内后造山伸展形成的火烧云—萨岔口沉积(J)—热液(E—N)叠加成因的碳酸盐岩型铅锌矿、乌拉根坳陷盆地砂砾岩型铅锌矿、多才玛浅成中—低温热液型铅锌矿。

金矿:成因复杂,但其形成离不开有利的矿源层和不同成因的热源。东昆仑—西秦岭造山带是印支晚期—燕山早期由挤压造山向造山后伸展转换的重要构造部位,挤压推覆与滑脱构造作用、深部中酸性岩浆作用导致的热液活跃,在南秦岭构造带早期被动陆缘盆地(D₂₋₃)和前陆盆地(S₂₋₃—D, T)伴随同生断裂构造热蚀变(钠化等)的欠补偿细碎屑岩—碳酸盐岩矿源层中,形成了西北地区重要的金成矿带。前者如寨上、李坝、八卦庙、双王等金矿,后者如阳山—石泉、大场、加给陇洼、瓦勒根、加甘滩、早子沟、大水、大桥等金矿(王永和等,2020)。黑色岩系矿源层相关“萨瓦亚尔顿式”金矿与此类似。古老陆块结晶基底中深变质岩是重要金矿源层,后期热液再造形成重要金矿(小秦岭桐峪、葫芦沟金矿,东昆仑五龙沟、贺兰山牛头沟金矿等)。陆相火山岩型金矿主要分布于天山构造带,并主要与早石炭世中酸性—中基性火山岩相关,产于火山穹窿环状与放射状断裂系统及潜火山岩、远火口层间破碎带,如阿希、京希、索尔巴斯陶等。另外,在长期活动的复杂构造—岩浆条件下形成大型金矿,如卡拉麦里、那拉提构造带卡特巴阿苏等。

钼矿:以斑岩型最为重要,主要与后碰撞—后造山中酸性岩浆期后热液活动密切相关。如东天山晚三叠世白山—东戈壁钼矿、小秦岭晚三叠世黄龙铺钼矿、小秦岭燕山期金堆城钼矿、青藏高原北缘古近纪纳日贡玛铜矿等。

钾盐:有现代盐湖型和地下卤水型2种,前者主要分布在塔里木盆地罗布泊和柴达木盆地察尔汗、大浪滩、察汗斯拉图、昆特依、尕斯库勒等成盐盆地;后者主要为柴达木盆地西部赋存于古近纪—新近纪细碎屑岩、泥灰岩、藻灰岩中的封闭条件下成矿的南翼山钾盐矿产。

锂矿:主要成矿时代为新生代,尤其是晚更新世—全新世内陆湖泊化学沉积卤水型液体、固液共生锂矿,占总量95%以上,主要产于柴达木盆地(西台吉乃尔湖、东台吉乃尔湖、一里坪、大浪滩、南翼山等),并与钾盐伴生;其次为后碰撞—后造山花岗岩伟晶岩型锂铍铷钽矿,如西昆仑晚三叠世大红柳滩铍矿、阿尔泰晚石炭世—早侏罗世柯鲁木特锂铍钽矿等。另外,还有和田喀拉卡锂铍矿等。

晶质石墨:主要有接触变质型(准噶尔吐尔库里、孔可热、达布逊)和同化混染型(黄羊山)晶质石

墨矿。近年,在北秦岭、北山、汉南等结晶基底变质岩也有发现。

1.4 水文地质

西北地区位处中国西高东低的三级台阶地貌的第一、第二级台阶,发育六大山系、五大盆地,以“第三极”之称的青藏高原和高大山系为中心形成的中亚-南亚放射状水系,使西北地区成为了亚洲水塔的重要组成部分及中国大江、大河的上游、发源地和主要的水源涵养区,并决定了水系向东南汇入海和向五大盆地汇集的空间格局和规律。

秦岭-祁连、昆仑-阿尔金、天山-北山、阿尔泰山、贺兰山、阴山六大山系除承接现今的大气降水(雪)外,冰川、冻土层等也积累了历史时期大气降水存量,是西北地区水源发源地,水系发育。山地基岩广泛分布,形成了以裂隙水为主地下水,在碳酸盐岩发育的山地还形成了岩溶裂隙孔洞以及一系列岩溶大泉。但总体而言,山区水资源中地表水占比高。

五大盆地之中,柴达木、塔里木和银额三大盆地属于内流型汇水盆地。其内部新生代沉积厚度巨大,沙漠广布,气候极为干旱,蒸发量巨大,地表水缺乏,地下水以第四系孔隙水为主且分布广泛,在生产、生活、生态中的作用巨大。准噶尔盆地南部为内流型汇水盆地、北部为外流型汇水盆地,鄂尔多斯盆地为外流型汇水盆地。两大盆地内地下水类型、资源量及其在社会经济发展中的作用与内流盆地类似。不同之处在于其成盐岩水文地质条件较差,而内流盆地汇水区是流域的末端是现代盐岩的产地。

山系与盆地的过渡带是地形剧烈变化的地段,同时也是新生代冲积扇广泛发育的地段,新生代断裂构造发育,同时连通了第四系含水层和下伏含水层。这种特殊的地质结构决定了西北盆-山过渡带是浅层优质地下水的富集区,也是地表水向地下水转换的关键区。

2 自然地理与环境概况

2.1 地形地貌

地貌又称地形,是地球表面外貌各种形态的总称,是自然环境最基本的组成要素,复杂多变,在不同尺度上制约着气候、植被、土壤、水文等其他自然环境要素的变化,进而控制着自然环境的分异,是人类活动、生产的载体。地貌是地球内、外动力地质作

用对地壳共同作用的产物,并随着时间而变化。地貌区划是根据地貌形态、成因和发育的相似性和差异性 etc 区域地貌特征进行划分,每一地貌区具有该区特有的地貌形态、成因与组合。地貌区划是与区域研究的发展共生,前人根据农业规划、生态保护规划等应用需求,提出了多种地貌区划方案,编制了多种地貌区划图和专著(Li et al., 1953; 周廷儒等, 1956; 郭子良等, 2013; 李炳元等, 2013; 程维明等, 2019)。当前,自然资源部履行全民所有土地、矿产、森林、草原、湿地、水、海洋等自然资源资产所有者职责和所有国土空间用途管制职责。区域地质与地貌区划相结合的地质调查研究工作的重要性不言而喻。

参考星体地貌-巨型地貌-大型地貌-中型地貌-小型地貌(田明中等, 2009)和大区-地区-区-亚区-小区(程维明等, 2019) 2 个五级地貌区划及其原则,按照海拔、地形起伏、切割程度划分西北地貌形态的基础上,综合考虑地貌形成的物质基础,即岩石和地质构造、地球内动力、地球外动力要素,概述西北地区的地貌区划特征及演化。总体而言,现今的全球构造是巨型地貌的首要控制因素,区域性构造是大型地貌的主要控制因素,第四纪以来的气候是中小型地貌的主要控制因素,地质历史时期形成的岩性组合及其结构构造是小型地貌的主要控制因素。

西北地区地处欧亚大陆内部,南部受印度次大陆与亚洲大陆碰撞,东部受太平洋向亚洲大陆俯冲作用远程制约,地貌上总体呈南高北低、西高东低,涉及 4 个大型(大区)地貌单元。在中国三级阶梯地势上,西北地区南部昆仑、阿尔金、祁连地区属于以青藏高原为核心的第一阶梯,海拔大于 3 500 m,平均达 4 000 m 以上,主要由高原和大山组成,隶属于青藏高原高山-极高山盆地谷地大区。其他广大地区属于第二阶梯,即青藏高原外缘至大兴安岭-太行山-巫山-雪峰山之间,海拔大于 1 000 m,主要由广阔的高原、大盆地和山地组成,隶属于西北高-中山盆地高原大区。此外,还有部分地区分别位于华北内蒙古中山高原大区和西南中低山高原盆地大区,也属于第二阶梯。

在 4 个大型地貌内部,根据新生代区域隆升剥蚀与下降沉积作用,西北地区可进一步分为 12 个中型地貌单元(地区)。青藏高原高山-极高山盆地谷地大区,总体以抬升剥蚀为主,因隆升剥蚀和相对沉

降程度不同,西北地区可进一步分为阿尔金山-祁连山高山谷地地区、中东昆仑高山地区、喀喇昆仑山-西昆仑山高山-极高山地区、柴达木-黄湟高山盆地地区4个中型地貌单元。西北高-中山盆地高原大区,差异性隆升作用强烈,隆升剥蚀与下降沉积相间排列,从北向南,从西向东,可进一步分为阿尔泰高-中山地区、准噶尔盆地地区、天山高山盆地地区、塔里木盆地地区和蒙甘新高原丘陵平原地区5个中型地貌单元。区域性山前断裂带控制的小型地貌是中型地貌单元的边界。此外,西北地区的黄土高原地区、鄂尔多斯高原与河套平原地区隶属于华北-内蒙古中山高原大区;秦岭大巴山中-低山地区隶属于西南中-低山高原盆地大区(程维明等,2019)。

在12个中型地貌单元内,受气候与局部地质作用控制,可进一步划分小型地貌单元(区)。如中东昆仑高山地区,主要为剥蚀区,因高寒风化作用与近距离搬运作用的不同,可进一步分为东昆仑山高山区、中昆仑山东段高山山原区、中昆仑山西段高山湖盆区。塔里木盆地地区主要为沉积区,因沉积作用类型的不同可进一步分为拜城前山丘陵盆地区、塔里木北部湖积冲积平原区、塔里木东南缘冲洪积台地平原区、塔克拉玛干风积沙丘区、塔里木南缘冲积-洪积平原区、柯坪前山丘陵盆地区和喀什洪积-冲积平原区。天山高山盆地地区可进一步分为东天山高山区、北天山高山区、中天山高山盆地区、焉耆盆地区、南天山高山区。黄土高原地区以水蚀作用和河流搬运沉积作用为主,根据作用类型及其程度的不同可进一步分为陕北黄土梁塬峁区、汾渭洪积冲积平原台地区、六盘山中-低山丘陵谷地区、陇中西中山与黄土梁峁区。

2.2 自然地理

西北跨季风湿润区、青藏高寒区和内陆干旱区三大自然地理区(郑度等,2015)。陕西大部、以及甘肃和宁夏部分地区为季风湿润区,属温带季风气候,植被与土壤等纬向地带性分布规律明显;青海与新疆南部为青藏高寒区,受全球变化和西风-季风协同作用影响强烈(Yao et al., 2012);因地势高,青藏高原广泛分布冰川、冻土与积雪,构成了地球中、低纬度最大的冰雪与寒冻作用中心,也造就了生物区系和群落分布的垂直地带性规律(郑度等,2015)。其他为内陆干旱区,因受大兴安岭、阴山、贺兰山、乌鞘岭、巴颜喀拉山和昆仑山围绕,终年受大陆性气团

控制,气候异常干旱,与中亚一起构成了世界上最大的内陆干旱区(陈发虎等,2008);该区具有和缓起伏的高原和高山冰雪-盆地绿洲地貌特点,分布有多个沙漠,河湖众多,但水资源贫乏,具有典型的大陆性气候特征和气候变化的西风模态特征(陈发虎等,2019)。

西北地区涉及全国14个水系中的黄河水系、长江水系、额尔齐斯河水系、内蒙古内流区和西北内流区五大水系。黄河水系发源于青藏高原,流经西北地区的青海、甘肃、宁夏、陕西,向东注入渤海;黄河源区湖泊发育,渭河为第一大支流。长江水系发源于青藏高原,以巴颜喀拉山与黄河源区分隔,西北地区主要涉及甘肃和陕西南部,汉江为第一大支流。额尔齐斯河水系主要位于新疆西北部,发源于阿尔泰山,向西经哈萨克斯坦、俄罗斯,向北注入北冰洋。内蒙古内流区水系面积较小,位于鄂尔多斯盆地西北部,主体属于内蒙古,西南部涉及榆林市。西北内陆水系分布面积最大,可进一步分为塔里木、柴达木、准噶尔、银额盆地及伊犁河5个次级水系;塔里木盆地水系发源于阿尔金、西昆仑、西南天山,汇于罗布泊,以季节性为主,上游有少量湖泊;柴达木盆地水系发源于东昆仑和祁连山南坡,注入柴达木盆地,盆地内部多个汇聚中心,湖泊较多;伊犁河水系发源于西天山,向西注入哈萨克斯坦境内的巴尔喀什湖;准噶尔水系发源于东准噶尔山地、天山北坡,汇入准噶尔盆地,多为时令河;银额盆地水系主要发源于祁连山,向北汇入银额及其周缘盆地,可作为弱水河代表,多为时令河。

西北地区分属于暖温带落叶阔叶林区、温带草原区、青藏高原高寒植被区和温带荒漠区等4个植物大区。①暖温带落叶阔叶林区分布在秦岭山区,属暖温带南部落叶栎林亚地带。②温带草原区分布在鄂尔多斯盆地及阿尔泰山区,可分为温带南部草原区和温带北部草原区;温带南部草原区可进一步划分为温带南部森林(草甸)草原;温带南部荒漠草原亚地带和温带南部典型草原亚地带;温带北部草原区可细分为新疆的阿尔泰温带北部草甸草原亚地带、东准噶尔山区的温带北部荒漠草原亚地带。③青藏高原高寒植被区分布在新疆、青海南部,西昆仑、喀喇昆仑山区,主要属于高寒荒漠地带,东昆仑、巴颜喀拉山地区属于高寒草原地带。④温带荒漠区占据西北面积近一半,其中塔里木盆地,主要属于暖

温带灌木、半灌木、裸露地带;准噶尔盆地主要属于温带半灌木、矮乔木荒漠地带;甘肃北部和内蒙西部属于温带灌木、半灌木荒漠亚地带。

西北地区在中国的生态安全与屏障中具有重要地位。秦岭山地、若尔盖-玛曲、黄河源、阿尔泰山地及天山山地生态功能保护区属于国家级水涵养生态功能保护区;黄土高原是国家级水土保持生态功能保护区;黑河流域生态功能保护区、阿尔金荒漠草原生态功能保护区、塔里木河流域生态功能保护区及毛乌素沙地生态功能保护区是中国北方防风固沙生态功能保护区的重要组成部分;伊犁-天山山地西段生态功能保护区是重要的物种资源生态功能保护区。

受活动构造带、特殊地形地貌及气候作用的影响,西北地区崩塌、滑坡、泥石流、冻融、水土流失、沙漠化等地质灾害多发、频发,并呈一定的规律性。青海-甘肃-陕西交接的西秦岭和大巴山区是东西向与南北向2个构造体系的交汇叠加区,是龙门山活动构造带的北延部分,断裂破碎带(白龙江断裂带等)和板岩、千枚岩、碳质页岩等软岩十分发育,属于中国南北气候分界地带,雨季降雨量丰沛,成为中国泥石流、大型滑坡最发育的地区之一(地质矿产部环境地质研究所,1992a,1992b),泥石流数量多、强度大、活动强、灾害重(安康-白河,西汉水、白龙江、嘉陵江的上游等)。秦岭以北的青海-甘肃-宁夏-陕西交接地区是青藏高原东北缘弧形构造带与贺兰山-六盘山南北向构造带交汇叠加区,强烈的新构造与地震活动频繁,也是青藏高原与黄土高原交接地带,黄土

滑坡、冲蚀、泥石流等地质灾害频发(礼县、永靖、海原、陇东、陕北等)。天山中西部和西昆仑-阿尔金山中西段剧烈的山体差异抬升形成大起伏山地,岩石强烈的物理风化和融雪渗水促成崩塌、滑坡、泥石流灾害易发频发(伊犁河谷等)。黄河中游的黄土堆积及砒砂岩引起水土流失严重,受西风带影响,沙尘暴频发,在新疆、甘肃、宁夏等地耕地、草原沙化严重;另外在青藏高原北部高海拔地区冻结层冻融灾害发育。

3 社会经济发展概况

3.1 社会经济发展现状

西北地区及各省经济社会发展状况见表1。根据第七次人口普查结果,西北地区人口10 352.37万人,占全国总人口的7.33%,主要有汉族、蒙古族、回族、藏族、维吾尔族、满族、哈萨克族、东乡族、柯尔克孜族、土族、达斡尔族、撒拉族、锡伯族、塔吉克族、乌孜别克族、俄罗斯族、鄂温克族、保安族、裕固族、塔塔尔族、鄂伦春族。2020年,西北五省国民生产总值为55 922.11亿元,占全国生产总值的5.50%。原煤产量10.81亿t,全国占比27.72%;原油产量6 805.67万t,全国占比34.94%;天然气产量965.12亿m³,全国占比50.14%;10种有色金属产量1 543.84万t,全国占比24.95%;水泥产量7.98亿t,全国占比33.27%。根据2019年中国水资源公报,西北地区2019年水资源总量2 623.2亿m³,全国占比9.03%。

表1 西北五省经济与社会发展情况简表

Tab.1 Economic and social development of five provinces in Northwest China

省份	国民生产总值			第二产业占比	2020年部分工业产品产量							水资源总量	人口
	十三五	2020年	排名		原煤	天然原油	天然气	粗钢	钢材	十种有色金属	水泥		
陕西	116 436.1	26 181.86	14	43.4	6.79	2 693.72	527.38	1 521.53	2 019.98	221.16	67 983.88	495.3	3 952.50
甘肃	40 810.14	9 016.7	27	31.6	0.39	968.7	3.9	1 059.2	1 102.6	350.6	4 651.2	325.9	2 501.98
宁夏	17 160.91	3 920.55	29	42.4	0.82					119.2	1 977.5	12.6	720.27
青海	13 419	3 006	30	38.1	0.11	228.5	64.01		189.11	239.01	1 216.29	919.3	592.39
新疆	60 994	13 797	24	34.3	2.7	2 914.75	369.83	1 306.13	1 420.63	613.84	4 025.05	870.1	2 585.23
合计	248 820	55 922.11			10.81	6 805.67	965.12	3 886.86	4 732.32	1 543.81	79 853.92	2 623.2	10 352.37

注:①人口数据截止2020年11月底,来源于第七次人口普查报告;②水资源总量是指2019年度水资源量,数据来源于2019年中国水资源公报;③其他数据来源于各省年度经济社会发展公报;④国民生产总值单位为亿元,原煤产量单位为亿t,原油、粗钢、钢材、十种有色金属、水泥产量单位为万t,天然气产量和水资源总量单位为亿m³;⑤十种有色金属包括铜、铝、铅、锌、镍、锡、锑、汞、镁和海绵钛。

上述统计数据表明，西北地区经济社会发展相对落后，资源经济占比大。中国东西部及西北各省区间的经济社会发展不平衡，这固然是全球区域间发展不平衡的缩影，同时也是自然环境与资源条件影响经济社会发展的体现。

3.2 地质资源环境与主体功能区划

地质过程决定了一个地区的资源禀赋和自然地理环境，资源禀赋、地理环境又是区域经济社会发展的物质基础。依山而居、择水而栖是古人类应对资

源环境的被迫选择。曾经以能源资源为支柱产业的城市有克拉玛依、玉门、库尔勒、铜川、韩城、石嘴山、灵武、鄂尔多斯、榆林等，以有色金属和黑色金属加工的城市有嘉峪关、白银、金昌、阿勒泰等。在生态文明建设的新阶段，依据不同区域的资源环境承载能力、现有开发强度和发展潜力，统筹谋划人口分布、经济布局、国土利用和城镇化格局，从国家层面上确定西北地区的主体功能(图 1)，是实现人地和谐、天人合一的主动作为。

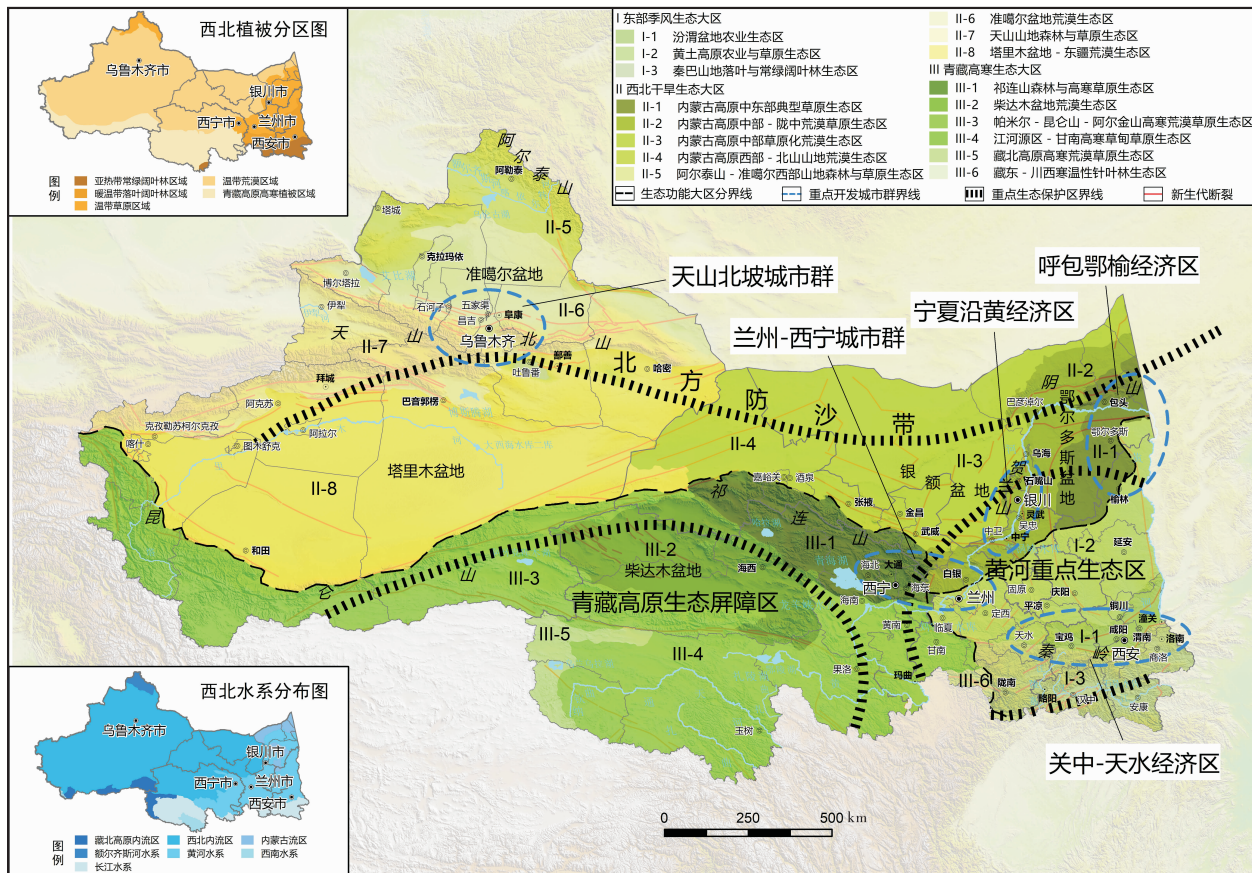


图 1 西北地区主体功能区划图

Fig. 1 Main function zoning map in Northwest China

西北六大山系均经历了长期的地质演化过程，组成结构复杂多变，是中国镍、铅锌、铜、金、锂铍等战略性矿产的重要基地。因其高海拔和陡峭的地貌，常常是重要的水源涵养区和生态功能区，如阿尔泰山地森林草原、三江源草原草甸湿地、若尔盖草原湿地、甘南黄河重要水源补给、祁连山冰川与水源涵养、阿尔金草原荒漠化防治及秦巴生物多样性等国家重点生态功能区，规划建设有祁连山、大熊猫、三

江源等三大国家公园。该类地区，基岩裸露、地形起伏大、河流侵蚀作用强烈，加之高海拔的冻融作用，山地地质灾害多发，且类型复杂，对城镇的危害比较大。这种地质资源环境特征决定了西北山系是以生态功能区为主的功能定位。

西北五大盆地相对来说地质稳定，显生宇沉积厚度巨大，多能源及盐类资源相伴生条件好，页岩气、干热岩等非常规能源资源潜力巨大。鄂尔多斯

盆地是中国重要的煤炭、油气和砂岩型铀矿资源基地。塔里木、柴达木是中国重要油气和钾盐资源基地,建有柴达木国家循环经济试验区和新疆罗布泊资源综合利用基地。准噶尔盆地是油气和煤炭资源基地。五大盆地海拔低,是汇水盆地,但因上游过渡开采,水资源严重短缺,而且水质较差,生态环境脆弱,也是中国重要的生态功能区,如黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区、塔里木河荒漠化防治生态功能区。这种地质资源环境特征决定了西北盆地是兼有生态功能、农产品功能和重点开发区域的复合功能定位。

西北六大山系与五大盆地的过渡带,地形平坦,土壤层厚且分布广,是地下水和地表水的径流区,天然水质良好;第四系沉积厚度大,地热资源丰富,长期以来都是西北各民族的聚集地。该类地区是国家确定的重点开发区,如呼包鄂榆地区、关中-天水地区、兰州-西宁地区、宁夏沿黄经济区和天山北坡地区;也是国家级农产品主产区,如汾渭平原优质专用小麦和玉米主产区、河套灌区优质专用小麦主产区、甘肃、新疆优质专用小麦和棉花主产区等。盆-山过渡带活动构造发育,地震及其诱发的次生地质灾害危害潜力大,同时由于高强度的开发也导致水资源短缺、土地盐渍化、水土流失等持续加剧;这种地质资源环境特征决定了西北盆-山过渡带要在集约、协调、提质、增效前提下,履行重点开发区域和农产品主产区功能定位。

4 需求分析与地质工作建议

国家第十四个五年规划和2035远景目标纲要明确了西北地区生态保护与高质量发展的方向。要深入实施一批重大生态工程,开展重点区域综合治理;积极融入“一带一路”建设,强化大通道建设,构建内陆多层次开放平台;加大西部地区基础设施投入,支持发展特色优势产业,集中力量巩固脱贫攻坚成果,补齐教育、医疗卫生等民生领域短板;提升关中平原城市群建设水平,促进西北地区与西南地区合作互动;支持新疆建设国家“三基地一通道”;促进400 mm降水线西侧区域保护发展。强化举措推进西部大开发,切实提高政策精准性和有效性,将在很

大程度上缓解地质-资源-环境导致的社会经济发展不平衡效应,为新时代地质工作在经济社会发展全局中找准定位、精准发力指明了方向。

根据西北地区在全国经济发展中的资源基地和生态屏障地位,西北整体处于工业化初中期阶段,明确了“资源环境并重”的地质调查目标定位。在此基础上,提出了加强西北盆山系基础地质调查、加强清洁能源矿产调查评价、强化战略性矿产资源调查评价、实施西北水文地质和水资源调查与监测、大力提升地质灾害调查评价与监测预警科技水平、着力加强自然资源综合调查监测与生态保护修复、全力支持重大战略实施与重大工程建设、扎实做好西北沿边应用地质调查评价、全面深化中西亚地质调查国际开放合作、大力加强科技创新和信息化建设等10个方面的主要建议。要进一步提升地质调查在黄河流域生态保护和高质量发展、西部大开发形成新格局、“一带一路”建设等国家战略和西北经济社会发展全局中的支撑作用,还应在以下3个方面积极探索。

(1)以地球系统科学理论为指导,深化多专业有机结合。2013年国际科学理事会(ICSU)、国际社会科学理事会(ISSC)等机构创立了“未来地球(Future Earth)”计划(2014~2023),并推动其成为应对全球环境变化、推进全球可持续发展的科学联盟。该计划强调自然科学研究与社会经济可持续发展相结合,为解决当前困扰人类发展的重点问题提供科学的解决对策,保障满足人类发展所需的食物、水、生物多样性与健康等的供给和其他环境功能与服务的有效管理。在此背景下,从整体论的观点出发,研究地球大系统内具有有机联系的子系统,即各圈层内部及圈层之间的相互作用和运动变化的全过程、形成机制及可能发生的发展变化趋势,通过调查评价-观测探测-建模预测三位一体相辅相成、循环上升更好地满足经济社会与科技发展的需求。即以地球系统科学理论为指导,成为地质调查转型升级的必然选择。首先要推动区域地质、地球物理、地球化学为主的基础地质调查与能源、战略新兴和大宗紧缺矿产、水资源、地质灾害、地质遗迹等应用地质调查的有机结合;构建多专业结合的团队,推动不同专业数据的有机结合是深化地质调查系统内部多专业

紧密结合的有效途径。其次,要综合开展矿产资源基地的资源条件-技术经济条件-地质环境条件调查和资源潜力-技术经济-环境影响综合评价,延伸产业链,服务矿业经济绿色高效发展。再次,要推动地质调查与地理科学、土地科学、水利科学、农业科学、林业科学及其调查研究工作等的有机联系,找准表生自然资源与环境的控制地质要素,聚焦自然环境下化学元素在无机界与有机界转换和地下水与地表水转换的机理、诱发因素及时空分布规律等关键科学问题,联合攻关。此外,还要推动地质调查与管理科学的有机结合,根据自然资源管理对地质调查成果的需求,完善地质调查成果体系,提供精准有效服务。

(2)探索构建不同地质-资源-环境-社会经济区的时空四维实体结构,促进多门类自然资源综合评价。西北地区地质-资源-环境-社会经济区可以分为山区、盆-山过渡带和盆地三大类型。山区有造山带的特殊组成结构,以金属与非金属矿产资源为主,是水源涵养与生态保护的主要地区。盆-山过渡带新生代构造作用强烈,以地热资源为主,是主要的城市群与经济区。盆地具有沉积岩广泛发育的地质组成结构,以能源与盐岩资源为主,地下水占全部水资源比重较高,生态环境脆弱,是重要的能源资源基地。探索建立不同类型、不同级次三维地质-资源-环境数据与知识体系,推动多门类自然资源综合调查评价,提出更加精准、系统的自然资源绿色-经济-综合勘查、开发、保护和修复建议,服务国家和地区可持续发展。

(3)探索建立易变地质、自然资源要素的监测体系,提升预测预警能力和水平。控制矿、土、水、林、草、湿、国家公园等自然资源、环境形成与分布规律的地质要素,有些是长期稳定的,如岩石、地层、构造、地形地貌、地表基质、战略性矿产资源等,不需要开展监测;但有些控制要素在全球变化和人类活动双重影响下是快速变化的,如地下水位、地下水径流量、地下水水质、地应力、活动的化学元素迁移及其影响的地上资源诸如林、草、湿地资源,地质环境如地质灾害、水土流失等,是随着时间的变化、开发强度的变化而变化,严重的甚至影响制约上述资源的地质环境发生不可逆转的后果。对于这些易变要

素,开展“空-天-地”一体化的监测网络建设,获取长序列、实时监测数据,建立预测模型,提出自然资源与环境开发、保护、避让、修复、调整的科学依据,更加精准地服务自然资源综合管理工作。

致谢:谨以此文庆祝中国地质调查局西安地质调查中心成立60周年!在成文过程中,先后与多位专家学者讨论、交流,得到他们的悉心指导和帮助,在此一并致以诚挚感谢。本文目的是梳理西北地区地质-资源-环境与社会经济发展的内在关系,以地球系统科学理论为指导,提出新时期西北地区地质调查转型升级的建议。因论文专业涵盖面广,作者水平有限,可能存在偏颇之处,敬请谅解。

参考文献(References):

- 车自成,刘良,罗金海,等.中国及邻区大地构造学[M].北京:科学出版社,2002.
- 陈发虎,范育新,Madsen B D,等.河套地区新生代湖泊演化与“吉兰泰-河套”古大湖形成机制的初步研究[J].第四纪研究,2008,28(05):866-873.
- CHEN Fahu, FAN Yuxin, Madsen B D, et al. Preliminary study on the formation mechanism of the “Jiliantai-Hetao” megalake and the lake evolutionary history in Hetao region[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(05): 866-873.
- 陈发虎,傅伯杰,夏军,等.近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望[J].中国科学:地球科学,2019,49(11):1659-1693.
- CHEN Fahu, FU Bojie, XIA Jun, et al. Major advances in studies of the physical geography and living environment of China during the past 70 years and future prospects [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(11): 1659-1693.
- 陈发虎,吴绍洪,崔鹏,等.1949—2019年中国自然地理学与生存环境应用研究进展[J].地理学报,2020,75(9):1799-1830.
- CHEN Fahu, WU Shaohong, CUI Peng, et al. Progress of applied research of physical geography and living environment in China from 1949 to 2019 [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(9): 1799-1830.
- 程维明,周成虎,李炳元,等.中国地貌区划理论与分区体系研究[J].地理学报,2019,74(5):839-856.

- CHENG Weiming, ZHOU Chenghu, LI Bingyuan, et al. Geomorphological regionalization theory system and division methodology of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 839-856.
- 地质矿产部环境地质研究所. 1:400万中国水文地质图说明书[M]. 北京:中国地图出版社,1992a.
- 地质矿产部环境地质研究所. 1:600万中国环境地质图说明书[M]. 北京:中国地图出版社,1992b.
- 第五春荣,孙勇,董增产,等. 北秦岭西段冥古宙锆石(4.1~3.9Ga)年代学新进展[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 1171-1174.
- DIWU Chunrong, SUN Yong, DONG Zengchan, et al. In situ U-Pb geochronology of Hadean zircon xenocryst (4.1~3.9Ga) from the western of the Northern Qinling Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 1171-1174.
- 董福辰,谭文娟,姜寒冰,等. 西北地区重要矿产资源潜力分析[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2018.
- 国土资源部油气资源战略研究中心. 全国油气资源动态评价综合研究成果报告[R]. 2016.
- 郭子良,崔国发. 中国地貌区划系统:以自然保护区体系建设为目标[J]. *生态学报*, 2013, 33(19):6264-6276.
- GUO Ziliang, CUI Guofa. Geomorphologic regionalization of China aimed at construction of nature reserve system [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6264-6276.
- 侯光才,张茂省,刘方,等. 鄂尔多斯盆地地下水勘查研究[M]. 北京:地质出版社,2008.
- 侯光才,赵振宏,陈军,等. 鄂尔多斯能源基地地下水及生态环境[M]. 北京:地质出版社,2017.
- 黄岗,牛广智,张占武,等. 东准噶尔阿尔曼泰蛇绿混杂带中发现4.0Ga碎屑锆石[J]. *科学通报*, 2013, 58(Z2): 2966-2979.
- HUANG Gang, NIU Guangzhi, ZHANG Zhanwu, et al. Discovery of ~4.0 Ga detrital zircons in the Aermantai ophiolitic mélangé, East Junggar, northwest China[J]. *Chin Sci Bull*, 2013, 58(Z2): 3645-3663.
- 计文化,李荣社,陈奋宁,等. 中国西北地区南华纪-古生代构造重建及关键问题讨论[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(5):634-655.
- JI Wenhua, LI Rongshe, CHEN Fenning, et al. Tectonic reconstruction of northwest China in the Nanhua-Paleozoic and discussions on key issues[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(5): 634-655.
- 李炳元,潘保田,程维明,等. 中国地貌区划新论[J]. *地理学报*, 2013, 68(3):291-306.
- LI Bingyuan, PAN Baotian, CHENG Weiming, et al. Research on geomorphological regionalization of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(3): 291-306.
- 李荣社,计文化,何世平,等. 中国西部古亚洲与特提斯两大构造域划分问题讨论. *新疆地质*, 2011, 29(3):247-250.
- LI Rongshe, JI Wanhua, HE Shiping, et al. The two tectonic domain division discussion between the ancient Asian and Tethys in Western China [J]. *Xinjiang Geology*, 2011, 29(3): 247-250.
- 李四光,张文佑,编译. 中国地质学[M]. 上海:正风出版社, 1953.
- 李玉宏,周俊林,张文,等. 渭河盆地氦气成藏条件及资源前景[M]. 北京:地质出版社,2018.
- LI Yuhong, ZHOU Junlin, ZHANG Wen, et al. Helium accumulation conditions and resource prospects in Weihe Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.
- 李玉宏,赵峰华. 新疆东部主要含煤盆地侏罗系聚煤规律[M]. 北京:科学出版社,2015.
- 李智明,王立社,杨生飞,等. 西北地区整装勘查及其典型矿床[M]. 北京:地质出版社,2017.
- 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(7):874-883.
- QIN Dahe. Climate change science and sustainable development [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 874-883.
- 唐亚明. 黄土滑坡风险评价与监测预警[M]. 北京:科学出版社,2014.
- 田明中,程捷,等. 第四纪地质学与地貌学[M]. 北京:地质出版社,2009.
- 王洪亮. 华北地块西缘-北秦岭西段冥古宙地壳物质探索[R]. 2010.
- 王永和,高晓峰,孙吉明,等. 西北地区大地构造环境与成矿[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2020.
- 王永和,焦养泉,吴立群. 从铀矿成矿条件分析西北地区砂岩型铀矿找矿[J]. *西北地质*, 2007, 40(1):72-81.
- WANG Yonghe, JIAO Yangquan, WU Liqun. Analysis of Uranium Metallogenic Conditions and Prospecting of Sandstone-Type Uranium Deposits in Northwest China [J]. *Northwestern Geology*, 2007, 40(1): 72-81.
- 徐学义,何世平,王洪亮,等. 中国西北部地质概论——秦岭、祁连、天山地区[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- 徐勇,吴登定,杨建锋,等. 地球系统科学与地质工作转型发展

- 展战略研究[M]. 北京:地质出版社,2019.
- 徐志刚,陈毓川,王登红,等. 中国成矿带划分方案[M]. 北京:地质出版社,2008.
- 杨合群,蒋寒冰,谭文娟,等. 西北地区重要矿产概论[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2017.
- 尹立河,张俊,王哲,等. 西北内陆河流域地下水循环特征与地下水资源评价[J]. 中国地质,2021,48(4): 1094-1111.
- YIN Lihe, ZHANG Jun, WANG Zhe, et al. Groundwater circulation patterns and its resources assessment of inland river catchments in northwestern China[J]. *Geology in China*, 2021, 48(4): 1094- 1111.
- 张立飞,杜瑾雪,吕增,等. 新疆西南天山超高压变质带的空间分布、峰期变质时代和P-T轨迹特征[J]. 科学通报,2013,58(22):2107-2112.
- ZHANG Lifei, DU Jinxue, LÜ Zeng, et al. A huge oceanic-type UHP metamorphic belt in southwestern Tianshan, China: Peak metamorphic age and P-T path[J]. *Chin Sci Bull*, 2013, 58(22): 2107-2112.
- 张茂省,胡炜,孙萍萍,等. 黄土水敏性与水致黄土滑坡研究现状与展望[J]. 地球环境学,2016,7(4):323-334.
- ZHANG Maosheng, HU Wei, SUN Pingping, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides [J]. *Journal of Earth Environment*, 2016, 7(4): 323-334.
- 张茂省,李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报,2011,19(4):530-540.
- ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslide [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(4): 530-540.
- 张茂省,李林,唐亚明,等. 基于风险理念的黄土滑坡调查与编图研究[J]. 工程地质学报,2011,19(1):43-51.
- ZHANG Maosheng, LI Lin, TANG Yaming. Risk management based landslide investigation and mapping in loess area [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(1): 43-51.
- 张文佑. 中国大地构造纲要及1:400万中国及邻区大地构造图[M]. 北京:科学出版社,1959.
- 赵燕,第五春荣,敖文昊,等. 敦煌地块发现3.06 Ga 花岗岩长质片麻岩[J]. 科学通报,2015,60(1):75-87.
- Zhao Yan, DIWU Chunrong, AO Wenhao. et al. Ca. 3.06 Ga granodioritic gneiss in Dunhuang block [J]. *Chin Sci Bull*, 2015, 60(1): 75-87.
- 郑度,杨勤业,吴绍洪. 中国自然地理总论[M]. 北京:科学出版社,2015.
- 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[M]. 北京:人民出版社,2021:178.
- 周廷儒,施雅风,陈述彭. 中国地形区划草案//中华地理志编纂. 中国自然区划草案[M]. 北京:科学出版社,1956.
- 朱士光. 论地理环境对形成与完善城乡市场结构之基础作用[J]. 天水师范学院学报,2011,31(3):12-20.
- ZHU Shiguang. On the Key and Basic Functions Geographic Environment Performs for the Formation and Perfection of Market Structure in Urban and Rural Areas [J]. *Journal of Tianshui Normal University*, 2011, 31(3): 12-20.
- Future Earth. Future Earth initial design report. <http://www.futureearth.org/media/future-earth-initial-design-report>, 2013.
- YAO T, Thompson L, YANG W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 663-667.