

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.03.006

西北地区水文地质调查与水资源安全

党学亚^{1,2,3}, 张俊^{1,3}, 常亮^{1,2,3}, 顾小凡^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省水资源与环境工程技术研究中心, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质调查局干旱-半干旱地区地下水与生态重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:西北地区主体属于干旱-半干旱区, 水资源短缺且时空分配不均。以往的水文地质工作围绕城乡生活、工农业和牧业生产用水开展了大量的地下水资源调查评价和科学研究, 对供水安全保障发挥了至关重要的作用。随着全球气候变化对水文水资源条件影响的加剧, 以及西部大开发形成新格局、黄河流域生态保护与高质量发展等国家战略的实施, 西北地区的水资源安全形势发生了显著变化并对供水保障提出了更高的要求。笔者在回顾总结已有工作水文地质进展与成果、梳理西北地区水资源安全面临问题和挑战的基础上, 提出了未来水文地质工作应围绕地下水库探测、微咸水资源开发利用、地表水地下水联合调度 3 大方向加强调查研究, 以及基于天然和人类工程活动遗留的地下空间调蓄水资源, 从 8 个方面着力解决问题与应对挑战的总体建议。

关键词:西北地区; 水文地质调查; 水资源安全保障; 地下水库; 水资源调蓄利用

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2022)03-0081-15

Hydrogeological Survey and Water Resources Security in Northwest China

DANG Xueya^{1,2,3}, ZHANG Jun^{1,3}, CHANG Liang^{1,2,3}, GU Xiaofan^{1,2,3}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey/Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Shaanxi Province Engineering Research Centre of Water Resources and Environment, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
3. Key Laboratory for Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid Areas, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Northwest China mainly belongs to arid and semi-arid region, where water resources are scarce and unevenly distributed spatio-temporally. In the past, a large number of investigations and evaluation of groundwater resources and scientific research were carried out around water use for urban and rural life, industry, agriculture and animal husbandry production, and played a crucial role in the security of water supply. With the increasing impact of global climate change on hydrological and water conditions, the implementation of national strategies, such as the construction of a new development pattern in western China and ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin, the situation of water resources security in northwest

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

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“柴达木盆地格尔木河-巴音河流域 1:5 万水文地质调查”(12120115046301)、“柴达木盆地巴音河-塔塔凌河流域 1:5 万水文地质调查”(DD20160291)及陕西省创新能力支撑计划“旱区地下水过程与表生生态重点科技创新团队”(2019TD-040)联合资助。

作者简介: 党学亚(1967-), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文地质环境地质调查研究。E-mail: 474767944@qq.com。

China has changed significantly and higher requirements for water supply security have been put forward. Based on the review of existing work and summarization of the development and achievement, it is suggested that the investigation and research should be strengthened in three aspects, including the exploration of underground reservoirs, the exploitation and utilization of brackish water resources, and the joint operation of surface water and groundwater in the future hydrogeology work. Suggestions to solve the problems and meet the challenges from eight aspects are also put forward based on the underground space formed by natural and human engineering activities in this paper.

Keywords: Northwest China; hydrogeological survey; water resources security; underground reservoir; storage and utilization of water resources

西北地区涵盖陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆五省(区)全境及内蒙古自治区西部,面积约 $355 \times 10^4 \text{ km}^2$,幅员辽阔,矿产、能源、土地及林草湿等资源十分丰富。随着西部大开发、丝绸之路经济带及生态文明建设等国家战略的实施,区内建成了 5 个城市群、6 大能源基地、6 大经济区带、8 大矿产资源开发基地、6 大农业产业基地及一大批生态保护区;有力地支撑了国家“两横三纵”为主体的城市化战略格局、“七区二十三带”为主体的农业战略格局、“两屏三带”为主体的生态安全战略格局及能源和矿产战略格局的建设,社会经济得到了迅猛发展,显著地缩小了与东部地区的差距,保障国家能源、粮食、生态等方面安全战略地位的进一步提升。但西北地区主体属于干旱-半干旱区,水资源短缺且时空分配不均。据原西安地质矿产研究所编制提交的《西北地区地下水资源及其环境问题调查综合评价报告》(朱桦等,2003),全区水资源总量为 $2\,121 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,每平方千米的水资源量约为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$,为全国单位面积水资源量平均值的 $1/5$;全区地下水的多年平均天然资源总量为 $1\,122 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,可采资源量为 $457.77 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;全区用水量为 $802 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,其中地下水用水量约为 $150 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。统计 1999~2020 年西北各省区的年度水资源公报数据可见,迅猛的发展建设也使得西北地区水资源消耗急剧增加,并深刻地改变了水循环的天然过程和水平衡状态,致使内陆盆地及黄河流域大范围出现了河川径流减少、断流、地下水位下降与超采等多种严峻的水资源问题(聂春霞等,2020;闫俊霞,2021;赵长青,2021)。与此同时,全球气候变化影响引发的青藏高原片区和天山山地等高寒地区降水与河川径流增加、冰川萎缩、冻土融化、冰湖溃决、湖泊扩张、地下

水位上升等生态环境问题,不仅严重威胁到了人居安全(邓铭江,2018;党学亚等,2019a;闫利等,2019;丁永建等,2020;李明等,2021),而且驱使区内水资源量在时空上发生了迁移。各种情形表明区内水资源面临的局势更加复杂,其安全保障正在经历着环境变化的严峻考验。从更广阔的视角看,西北作为“亚洲水塔”的重要组成部分,其水资源安全保障不仅关乎当地,而且悠关中国东部等广大地区的发展。

目前,国内外对于水资源安全尚未形成一个被广泛认可的定义。结合国际社会对水安全的关注及前人研究(畅明琦等,2008;夏军等,2016;秦昌波等,2019;冯起等,2019),笔者认为可将其简单表述为“要有足够质与量合格的水源持续维系人类生活、生产及人居生态环境健康”或“城乡生活、经济社会建设和维持良性生态环境需要有质与量保证的可靠水源”。地下水是水资源存在的重要形态,因其分布广、水量受季节影响小、不易污染、开发利用受泥沙和冬季结冰影响小、供水保证率高,是国际公认的可靠供水水源和用以应对水安全危机的战略性资源(吴爱民等,2016),对支撑西北地区发展建设发挥了重要作用。面对区内水资源面临的问题,水文地质调查作为服务勘查评价水资源及支撑开发利用与保护的基础性工作,需要从水资源安全战略层面思考工作部署,从实际行动上加以落实,以提出应对策略、解决方案,支持水资源持续利用的科学决策。笔者在梳理以往工作进展与成果的基础上,结合经济社会发展的水资源需求与生态文明建设要求,分析探讨了西北地区未来的水文地质工作,并提出了相关的对策与建议。

1 自然地理及水资源需求

西北地区地处中国第一和第二地势阶梯之上,横跨干旱-半干旱区、青藏高原高寒区、东部季风区三大自然地理分区;有阿尔泰山、天山、昆仑山、阿尔金山、祁连山、秦岭、大巴山、巴颜喀拉山和可可西里山等山脉;并有内蒙古高原、黄土高原、准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地。

(1)南部为青藏高原,东接秦巴山地和黄土高原,西至帕米尔高原。区内高山纵横,有昆仑山、阿尔金山、祁连山、唐古拉山、巴颜喀拉山等高大山脉,以及柴达木、青海湖、共和、西宁等山间盆地。区内雪山与冻土广布,高大山脉均有冰川,年降水量总体上从东南向西北递减,由1 000 mm至100 mm,为三江(长江、黄河及澜沧江)流域、河西走廊、青海湖、可可西里、柴达木盆地、塔里木盆地提供着水源,并孕育了广袤的高寒草地和众多的湖泊湿地,构成了青藏高原东北部的生态屏障;国家在此建立了可可西里自然保护区、三江源国家公园、祁连山国家公园。同时区内的祁连山、昆仑山、阿尔金山和柴达木盆地是中国主要的成矿带和战略性矿产分布区,矿产和能源开采与加工支撑着青藏和南疆地区的经济社会发展;建有柴达木国家级循环经济试验区和以西宁为中心的青东经济区,贡献了青海全省大部分经济总量,水资源需求旺盛,也是需水和用水的主要地区。

(2)东部为黄土高原和秦巴山地。①黄土高原地处黄河中游地区,年降水量大致在400~800 mm,是黄河干流及其各级支流的主要水源。六盘山东北部为陕甘宁蒙黄土高原,沟壑纵横的黄土梁、峁、台塬之下蕴藏着丰富的煤炭和石油,是陕北能源基地和陇东能源基地的主要建设区;六盘山东南部为渭河盆地由关中平原及洛川、西峰及白鹿原三大黄土台塬组成,土地肥沃,是陕西的粮食主产区,目前以西安为龙头建成了关中平原城市群。六盘山西侧为陇西黄土高原,临夏、兰州、白银、定西、天水5个盆地占据了该区绝大部分,建成了以兰州为中心的黄河沿岸城市群。②秦巴山地降水充沛,年降水量为500~1 400 mm,有中国“中央水塔”之称,是汉江、嘉陵江,以及南水北调中线和关中平原的水源区,加之生物资源丰富,被国家辟作国家公园予以保护和建设。

(3)北部属于内蒙古高原,分布有阴山、龙首山、贺兰山、雅布赖山、焉支山和北山,且有河套盆地、吉兰泰盆地、银川盆地、武威盆地、民勤盆地、昌宁盆地、张掖盆地、玉门盆地、酒泉盆地、敦煌盆地,以及毛乌素、库布齐、乌兰布和、腾格里和巴丹吉林五大沙漠。区内年降水量在50~400 mm,由东向西递减;蒸发强烈,蒸发强度由东向西递增。鄂尔多斯沙盖高原和银川、河套平原煤炭、石油和天然气及农牧业资源丰富,建设了陕北、内蒙古鄂尔多斯、宁东3个国家级能源基地。宁夏沿黄河经济区及呼包鄂榆城市群,水资源需求旺盛;河西走廊遍布沙漠和戈壁的玉门及银根-额济纳旗盆地群是中国新区新层系、新能源的主要分布区;土地资源丰富的石羊河、黑河、疏勒河三大河流域是中国的粮食主产地;依偎祁连山的武威、金昌、张掖、酒泉、嘉峪关、敦煌等城市构成了丝路经济带的咽喉地段,城乡生活及工农牧业生产及生态需水量大,但水源不足,供需矛盾十分突出。

(4)西部为昆仑山-阿尔金山、天山、阿尔泰山和夹于其间的塔里木盆地、准噶尔盆地构成的盆山巨系统;盆地之上覆有塔克拉玛干大沙漠和古尔班通古特大沙漠,天山山间还发育吐鲁番-哈密盆地、伊犁谷地等山间盆地。盆地内部年降水量大部分小于300 mm,但蒸发强烈,年蒸发强度达4 000 mm以上;山区年降水量多在200~1 000 mm,同时有较大面积的冻土和冰川分布,是盆地内部水资源的主要来源。区内山区金属矿产资源丰富,盆地内石油、煤炭、天然气资源能源矿产和农业资源丰富,是中国主要的矿产资源开发基地、最大的能源基地及粮食棉花的主产区。建有塔里木油田、准东和东疆能源基地,以及天山北坡城市群和经济带、喀什国家经济技术开发区、中巴经济走廊,水资源需求强烈,但因水源不足,供需矛盾十分突出。

2 水文水资源特征与开发利用

西北地区的水资源按空间分布及形态可划分为大气降水、地表水、地下水和冰雪4种类型,大气降水是其他3种水源的根源。在地形、地貌控制下,西北地区形成了外流和内流2个水资源区。其中,外流区主要为长江、黄河、澜沧江、伊犁河、额尔齐斯河5条河流的干流和支流所涵盖的流域,面积约为 $101 \times 10^4 \text{ km}^2$,占比28.45%;内流区为塔里木盆地、准

噶尔盆地、柴达木盆地、吐鲁番-哈密盆地、河西走廊等诸多内流河流及鄂尔多斯沙漠高原中北部的 4 个内流河流域,面积 $254 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占比 71.55%。因自然条件差异明显,各类型水资源在内流区与外流区的形态、时空分布、形成演化及开发利用特征有显著不同。

(1) 大气降水年内分配多集中在 6~10 月,季节性、脉动性显著,直接利用较为困难,除严重缺水地区通过水窖直接收集外,一般在其转化为河水与地下水后利用。

(2) 冰雪为固态水源,包括冰川、冻土水和积雪,是区内地表水、地下水的重要补给源,大面积分布于青藏高原和内陆盆地的高寒山区,有冷期固水和暖期释水的特点,是能够调蓄水源的固体水库,对维持区内各流域的生态系统健康发挥着极其重要的作用。全球气候变化使不同形态水资源量的占比与空间位置发生了显著变化,其对生态环境和水资源保障的影响已成为西北地区应对水资源安全挑战需要认真研究的重大课题。

(3) 地表水和地下水是最便于利用的水源形态。二者转换频繁,水文过程大不相同。其中:①地表水响应环境变化迅速,径流多集中在 6~10 月,径流过程涨落显著,过境快,开发利用需要克服泥沙和冰冻影响且易受污染,主要通过地表水库和渠系开发利用。各干旱盆地在河流出口大都建有水库和干渠向两侧引水,用于城镇供水或绿洲区农田灌溉。随着经济实力和工程能力的增强,当今在大江、大河建坝引水或跨流域调水的工程不断增多,区内已实施或正在实施的有引汉(江)济渭(河)、引哈(尔滕河)济党(河)、引那(梭格勒河)济格(尔木河)等。目前,干旱盆地内的水资源开发利用已极大地改变了山前平原区天然的地表、地下径流过程,并给下游流域水生态带来了显著影响。②地下水在含水层的调蓄下其水量较为稳定,是区内长期赖以发展的重要水源,甚至是许多地区唯一的可用水源(李文鹏等,1999),特别在城乡供水发挥着主要作用(吴爱民,2016等);在当今严格控制地下水开采的情况下,地下水的优势决定了其未来在西北旱区作为后备水源、分散零星供水水源、应急备用水源发挥主要作用。随着对地下水属性认识不断深化,地下水作为最基本的环境因子对维护生态系统健康、作为矿泉水对发展绿色矿业经济的价值更加突出(党学亚等,2021)。

3 水文地质调查进展

3.1 水文地质概况

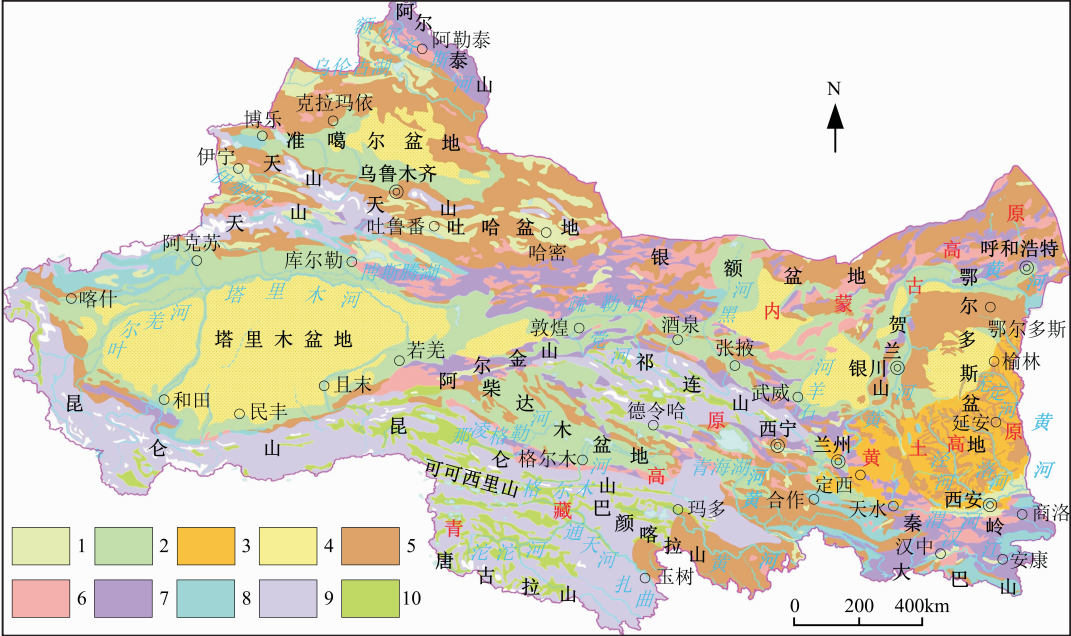
西北地区的地下水可分为松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类岩溶水、碎屑岩类孔隙裂隙水、变质岩及岩浆岩类裂隙水 4 种类型。具有集中供水意义的主要是分布于全区的第四系松散层地下水,分布于鄂尔多斯盆地周边、汉江与嘉陵江流域及 3 大干旱内陆盆地山区的岩溶水,以及分布于鄂尔多斯盆地中西部地区的白垩系地下水(侯光才等,2008;王永贵等,2008)。变质岩及岩浆岩地下水总体上水量贫乏,无集中供水意义(图 1)。因区内内流河流域和外流河流域气象、水文、地形地貌、水文地质条件差异显著,西北地区地下水在 2 类水文系统的形成条件、赋存分布规律、形成演化模式及开发利用条件也有显著的不同。

3.1.1 外流区水文地质概况

(1) 第四系地下水:在黄河中上游的鄂尔多斯沙盖高原、关中平原、银川平原、河套平原,汉中、兰州、定西三盆地及湟水河与其支流大通河河谷,以及新疆西部的伊犁河谷等地,含水层规模大,赋存条件优越(图 2)。加之,补给较为充足,其水量较为丰富,为城乡生活和工农业生产广泛使用。但在三江源、额尔齐斯河上游、嘉陵江流域及汉江流域的月河盆地,其含水层总体较薄且在高海拔地区被大面积冻结,赋水条件相对较差,仅在局部地区用作供水水源。

(2) 岩溶水:在鄂尔多斯盆地赋存于巨厚的寒武系—奥陶系岩含水层,呈“U”字形展布于盆地东部、南部和西部,面积 $7.55 \times 10^4 \text{ km}^2$, 接受大气降水和河水补给,水量丰富,是当地主要的供水水源,对陕西渭北东部黄土旱塬更是支撑性供水水源;维持着 6 个县近百万城乡人口的供水;在嘉陵江和汉江流域的山地发育大泉或岩溶暗河,水量丰富,是良好的潜在供水水源。

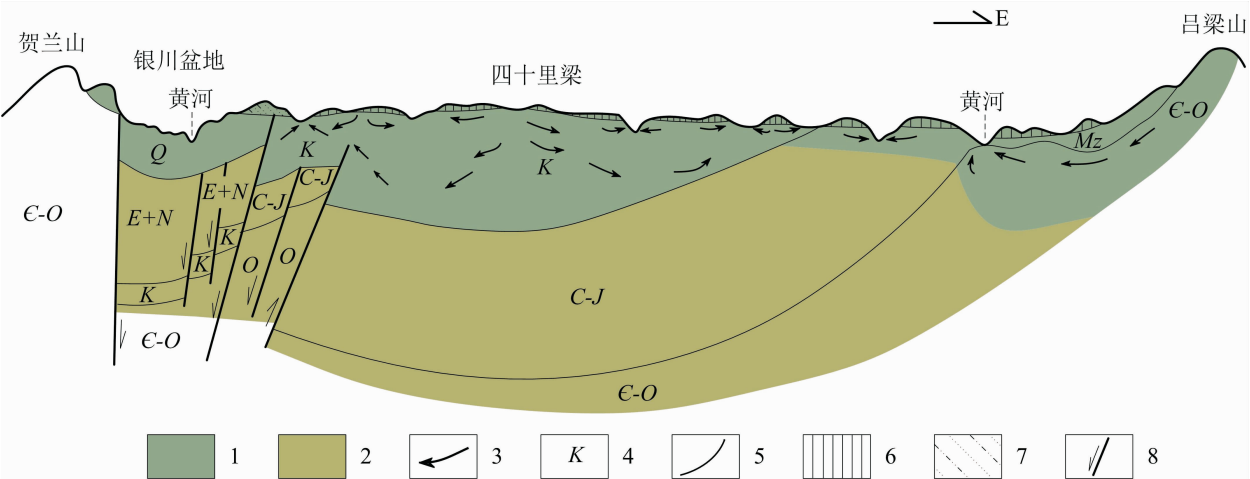
(3) 鄂尔多斯盆地白垩系地下水:分布于南北长 640 km、东西宽 200~265 km 的长条状区域,砂岩含水层巨厚,接受大气降水补给,水量较为丰富,是当地供水的主力水源。



1. 山间盆地冲洪积层孔隙水;2. 盆地平原冲积、洪积层孔隙水;3. 黄土高原黄土层孔隙水;4. 沙漠沙层孔隙水;5. 高原丘陵碎屑岩裂隙水;6. 山地丘陵岩浆岩裂隙水;7. 山地变质岩裂隙水;8. 山地碳酸盐岩类岩溶水;9. 基岩冻结层上水;10. 松散沉积层冻结层上水

图1 西北地区水文地质略图

Fig.1 Hydrogeological sketch map of Northwest China



1. 浅部径流开启带;2. 深部滞流封闭带;3. 地下水径流方向;4. 含水层系统代号,其中:Q、R、K、Mz、C-J、O、ε-O 分别代表第四系、古近系—新近系、白垩系、中生界、石炭系—侏罗系、奥陶系、寒武系—奥陶系含水层系统;5. 含水层系统界线;6. 第四系黄土;7. 第四系风积沙;8. 断层

图2 外流区典型水文地质结构与地下水流向意图(据侯光才等人所作的鄂尔多斯盆地东西向剖面修编)

Fig.2 Typical profile of hydrogeological structure and groundwater flow in endorheic region

3.1.2 内流区水文地质概况

(1)内陆河流域第四系地下水含水层多由下—中更新统河-湖相砂岩和砾岩、中—上更新统冲洪积相、全新统河湖相砂卵石单体或混合体构成,在空间分布上呈现从出山口向河流下游终端湖,呈现由

单一的砂卵石层向多层粉质黏土、黏土与砂层互层的多层结构演变特征,并在山前冲洪积扇部位形成了具有水库拦蓄和调节水源功能的地下水库,是开采地下水的最有利地段(图3)。地下水主要接受出山河流渗漏补给,径流至冲洪积扇前缘受阻,大部

分溢出地表形成众多泉集河流向终端湖泊,未溢出部分向下游继续潜流,但随着径流趋缓和水盐交换的深入,水质逐渐变差,大面积从淡水向微咸水、咸水甚至是盐水、卤水演化。

(2)岩溶地下水:主要分布于 3 大干旱内陆大盆

地的山区,多以大泉产出。例如,柴达木昆仑山地产出的格尔木昆仑圣泉、东大滩泉及祁连山地产出的德令哈柏树山泉等;这些泉水来自冰雪融水补给,流量可达 $1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,水质良好,具有开发矿泉水的资源前景。

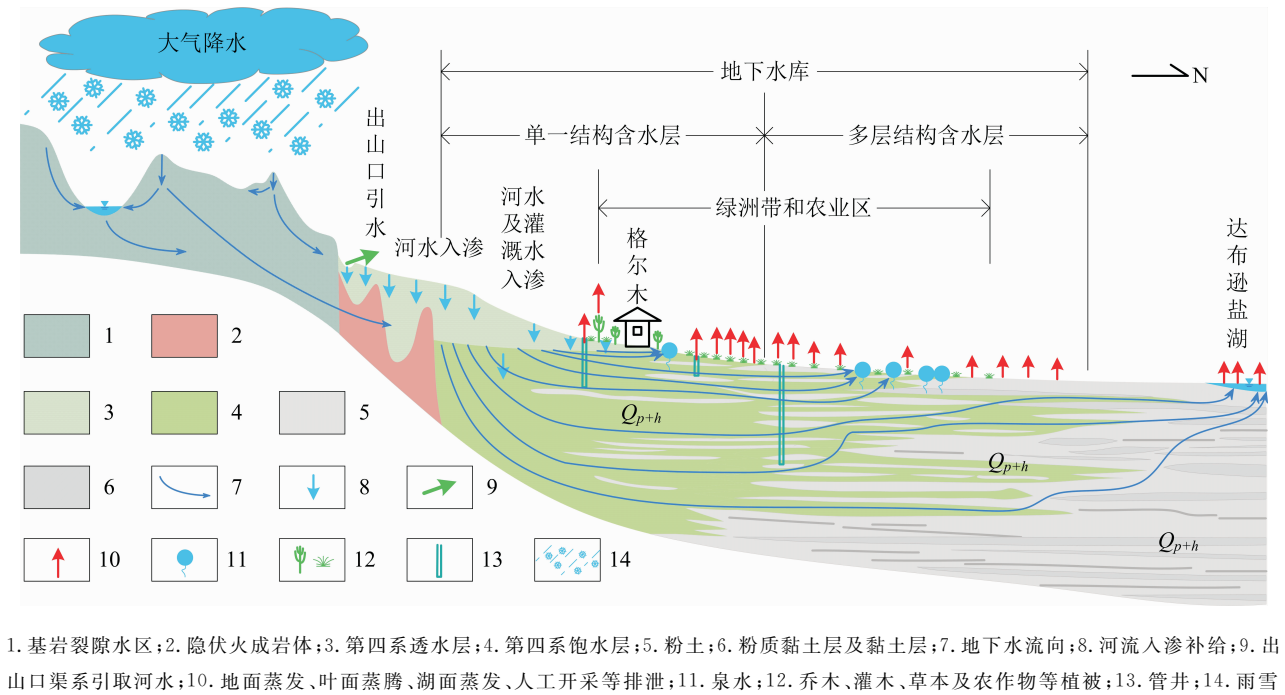


图 3 内流区典型水文地质结构与地下水流向意图

Fig. 3 Typical profile of hydrogeological structure and groundwater flow in exorheic region

3.2 调查研究工作进展

西北地区的水文地质工作随着新中国国民经济发展、工农牧业与国防建设等各项事业的兴起而发展(陈梦熊等,1998;李小林等,2009;孙永明等,2011;周金龙等,2012;韩生福等,2019),主要内容包括城镇、企事业单位和农牧区与粮食主产区供水水文地质勘查、基础性水文地质填图、能源基地和经济区的区域地下水资源调查评价与供水水源地整装勘查、盐渍化土壤改良和地方病区水文地质调查、地下水环境及污染调查评价,以及地下水循环演化规律与地下水与植被生态关系方面的基础性研究。按工作的内容、成果特色和理论与技术方法进步,大致划分为 1949~1979 年、1980~1998 年、1999~2009 年、2010~2022 年 4 个阶段。

(1)第一阶段工作:主要是地矿等多个部门围绕国民经济发展和国防建设,开展水源地勘查与打井取水,1:50 万、1:20 万比例尺的基础性填图,以及

重要农牧业区供水水文地质勘查、盐渍化土壤改良和地方病区水文地质调查。此阶段工作初步查明了西安、兰州、银川、乌鲁木齐、酒泉等城市和关中平原、河西走廊、柴达木盆地、新疆天山北麓、银川平原的水文地质条件及地下水的分布规律,相应地解决了城市供水、国防基地供水和农牧业区灌溉的水源,促进了在一些地区的盐碱化土壤治理。

(2)第二阶段工作:主要是原地矿部组织各省区地矿局实施的 1:20 万比例尺填图和专项水文地质调查,主要包括以下工作:①陕甘宁蒙白垩系自流水盆地地下水资源调查评价(1982~1986 年)。②以省区为单元开展的水文地质远景区划、工程地质远景区划、地下水资源评价、晋陕蒙能源基地供水勘查及环境地质评价(1983~1990 年)。③西北地区地下水资源评价及合理开发利用攻关(1986~1990 年)。④陕西渭北东部黄土旱塬与煤炭基地岩溶水赋存规律研究、供水水文地质普查详查、洛河河谷区

岩溶水文地质调查、涵盖了陕西渭北东部地区的“中国北方岩溶地下水资源及大水矿区岩溶水的利用与管理研究”(1986~1995年)。^⑤实施了“西北地区水资源特别计划”,在陕、甘、宁、青、新、晋、蒙7省(区)找水打井(1995~1998年)。主要进展和标志性成果:①以地下水系统理论为指导,重新评价西北地区的地下水资源,编制了一套西北地区的环境地质图系,对黑河流域、塔里木河流域分别提出了水资源优化分配、保持绿色走廊、改善生态环境的具体建议。②划分了鄂尔多斯盆地的白垩系含水岩组,建立了白垩系的水文地质概念模型;初步查明了陕西渭北东部黄土旱塬地区的岩溶地下水的富集规律、资源量和开发利用条件。③在沙漠腹地和黄土旱塬等贫水区取得了找水突破,为重新认识西北地区的地下水资源提供了宝贵的资料。④李文鹏等(1999)通过塔里木盆地、准噶尔盆地、吐鲁番盆地、柴达木盆地和河西走廊及下游平原区等地完成的一系列国家科技攻关项目和地下水勘查数据与资料,提出了西北地区地下水形成演化模式。

(3)第三阶段工作:主要是原国土资源部安排部署、中国地质调查局组织实施的新一轮国土资源地质大调查,主要包括以下工作:①鄂尔多斯盆地地下水勘查、内陆干旱区地下水资源调查评价(包括塔里木盆地地下水资源勘查、河西走廊地下水资源勘查、柴达木盆地地下水勘查、准噶尔盆地地下水勘查)2大计划项目(1999~2002年)。②西北严重缺水地区地下水勘查示范工程(2001~2003年)。③全国地下水资源及其环境问题调查评价计划(2002~2005年)在柴达木和准噶尔2大盆地进行的地下水资源及其环境问题调查评价、在河西走廊典型地区进行的地下水资源合理开发利用调查评价、在银川平原进行的地下水资源优化配置调查评价。④针对西北地区国家能源基地水资源安全保障,部省合作开展的陕北、内蒙古鄂尔多斯、甘肃陇东能源基地地下水勘查(2004~2009年)。⑤涵盖西北地区的“地方病严重区地下水勘查及供水安全示范”(2006~2010年)。另外,原国土资源部科技攻关计划安排开展了“西北内陆水循环演化及水资源利用研究”项目(张光辉等,2005)。该阶段以鄂尔多斯盆地地下水勘查及其区内各大能源基地地下水勘查为典范,主要进展和标志性成果:①开启了能源资源基地区域地下水调查评价+水源地整装勘查,成果快速服

务经济社会建设的地质工作新模式;在查明了区域地下水赋存分布规律和资源量、开发利用条件的基础上,圈定了一大批地下水富水地段,提交了一大批勘探、详查和普查精度的供水水源地,并提出了合理开发利用建议(侯光才等,2008,2017;Hou et al., 2008;王永贵等,2008;党学亚等,2008;杜中宁等,2008;张茂省等,2014;Wang et al., 2016;乃尉华等,2017),成果带动地方和社会企业投资跟进开展了地下水资源调查评价,有力地服务了当时的各类供水需求和经济社会建设。例如:陕西省榆林市政府跟进实施了榆神工业区供水水文地质勘查、榆林南部地区地下水勘查,形成了覆盖榆林市全境的地下水资源勘查评价成果。②更加注重区域地下水系统理论的应用与实践,有效指导地下水资源评价与开发利用的同时又使之得以完善,并形成了一套干旱-半干旱地区地下水资源调查评价的技术方法体系(侯光才等,2008)。③地下水资源调查评价更加关注开发利用的生态环境响应、能源资源成规模开发对水资源的影响研究,引入生态水文地质学理论开展调查研究,建立了一套干旱-半干旱地区生态水文地质调查的技术方法体系(董英,2008;卢娜,2008;张茂省等,2008),针对榆林能源化工基地提出了水资源合理开采与优化配置建议,并研发了一套水资源管理决策支持系统(张茂省等,2014;王化齐等,2014a,2014b)。④地方病严重区地下水勘查及供水安全示范为区内一大批群众提供了安全饮水水源(中国地质调查局,2019)。

(4)第四阶段工作主要是围绕服务西北大型能源盆地、主要经济区水资源保障与生态环境保护,老少边穷地区脱贫攻坚、兵团向南发展、黄河流域生态保护与高质量发展,以及自然资源管理中的水资源国情数据和生态修复重大工程展开。其中,中国地质调查局的工作主要是:①在鄂尔多斯盆地北部沙区、宁东能源基地、神东煤炭基地、柴达木盆地、湟水河流域、河西走廊3大河流域与巴丹吉林沙漠、塔里木盆地、准噶尔盆地伊犁河谷按照标准图幅开展的1:5万水文地质填图,以及兼顾地域特点在局地开展了1:10万、1:20万、1:25万水文地质调查或补充调查(2010~2018年)。②呼包平原及西北地区主要城市地下水污染调查评价、西北严重缺水、地方病区地下水勘查及供水安全示范(2011~2015年)。③部署西北干旱内陆盆地区水文地质调查工

程、黄河流域水文地质调查工程,在塔里木盆地开都河-孔雀河流域、准噶尔盆地玛纳斯河流域、河西走廊石羊河流域、湟水河流域、渭河流域开展的水文地质调查,以及在整个西北地区平原与盆地开展的地下水位统测和地下水资源年度评价、内陆盆地重点地区水文地质与水资源调查监测等工作(2019~2022年)。西北各省(区)根据自身需求,结合中国地质调查局工作部署开展了相应的水文地质工作,其中:青海在湟水河流域、黄河流域按图幅分别开展了9个和3个图幅的1:5万水工环地质综合调查,在青海南部黄河源和长江源重点城镇开展了1:5万水工环地质综合调查,在柴达木盆地的部分地区开展了1:5万~1:10万水文地质调查;新疆在东疆的吐哈盆地,准噶尔盆地的白杨河流域、奇台县及天山北坡西段主要流域,伊犁河谷,塔里木盆地天山、昆仑山前诸流域平原区等地开展了1:5万~1:10万水文地质调查。此阶段在继承前3阶段工作内容的基础上,更加注重气候与人类活动双重驱动下区域地下水循环演化规律、开发利用条件的研究与水资源质量的评价以及水资源开发利用的生态环境响应的研究。主要工作进展和标志性成果:①从盆地(区域)、流域和重点地段3种尺度揭示了主要的地下水含水岩组及其空间分布特征、地下水的赋存条件及其补径排条件、地下水的水质水量情况与富集规律,评价了区域水资源量、开发利用条件,圈定了一大批地下水富水地段。②集合遥感、物探、钻探、水化学同位素等技术分析研究水文地质条件、地下水形成演化与运动规律(Yin et al., 2010, 2011a, 2011b; 聂振龙, 2012; 张俊等, 2017a; Zhang et al., 2019),形成了一套干旱-半干旱区水文地质调查的技术方法体系。③把气候变化对西北地区水资源与环境影响研究(党学亚等, 2019a),基于生态约束下地下水资源调查评价作为水文地质工作的常规内容(党学亚等, 2019b; Dang, 2021),发展了生态水文地质学理论(张茂省等, 2008, 2014; 黄金廷等, 2011; Yin, et al., 2015),显著提升了调查工作水平和地下水资源评价精度(张光辉等, 2017; 张俊等, 2017b; Yin et al., 2018; 尹立河等, 2021; Zhang et al., 2021)。④首次掌握西北地区地下水储存量年度变化,为地下水超采治理、地面沉降防治和水资源合理开发提供了重要依据。

4 水资源安全的主要问题与挑战

综合西北地区的自然条件与工程建设特征,笔者认为目前西北地区的水资源安全面临着6方面的问题和挑战。

(1)面临着供需愈加不平衡的问题。西北地区的发展资源主要分布在干旱缺水地区,水资源供需失衡,矛盾突出。当前能源基地建设、生态文明建设以及脱贫攻坚、乡村振兴、生态搬迁、美丽乡村建设需要水土资源“双”增长(邓铭江等, 2020),使水资源缺口进一步增大(邓铭江, 2021)。尽管全球气候变化使西北降水有增多的趋势,但水资源先天性不足的状况并未发生明显改变。如何提高可用水量尽可能地满足各行各业用水是确保水资源安全的挑战之一。

(2)面临着联合调度与高效利用难落实的问题。地表水和地下水一脉相承,是水资源的2种存在形态,二者相互转化共同造就了内陆河水资源及生态系统(Shang et al., 2016; Wang et al., 2016)。但因对地表水和地下水关系认识不到位,目前人们普遍把地下水位下降和生态退化简单地归结为地下水过度开采,并未意识到内陆干旱盆地的地下水绝大部分来自河水补给,即使只用地表水不开采地下水也会造成地下水下降,对流域生态系统产生负面影响。修建大型地表水利工程失当严重影响流域下游河流生态环境,已为前苏联改造沙漠发展灌溉在咸海的主要补给河流阿姆河及锡尔河修建系列水利工程(李佩成等, 2010)、美国和澳大利亚等西方发达国家工程实践所证实(邓铭江, 2020)。美国从20世纪末至2015年拆除服役年限较长、对环境影响较大的水库大坝已达1300余座(李翠等, 2015)。在出山口修坝截引河水虽是最简便的用水方式,但也减少了下游地下水的补给。据2020年甘肃省省资源公报与有关文献(邓铭江, 2018),河西走廊3大河流域及天山南北坡诸流域因下游河水不够用和地下水开采加剧,生态环境出现了退化。目前,西北内陆人工绿洲面积日益增大带来了巨大的水资源消耗,地表、地下水文过程也随之发生了改变并导致了天然绿洲减少(Wang et al., 2018)。如何落实地表水、地下水联合调度以维持生态系统的健康,是确保区内水资源安全的挑战之二。

(3)面临着人类活动污染使水质变差与可用水量减少的问题。生活生产污水、农业施肥污染水体,减少了可用的水资源是全球性的问题,很早就引起了西方发达国家的重视(周仰效,2008;吴爱民,2016)。西北是中国矿产资源主要分布区和开采区,开发建设的主要产业是矿产资源和农副产品的开发与加工利用。目前,三废处理成本高致使污染处理设施往往运行不正常甚至弃用的现象。因此,水资源面临着污染减损的艰巨考验。如:秦岭成矿带和集中采矿区是南水北调水源区,矿坑水、弃渣淋溶水处理不当对水源有污染威胁;昆仑-阿尔金、祁连、天山等矿集区对各内流河水源也面临着同样的威胁。如何高效率低成本处理污水是确保水资源安全的挑战之三。

(4)面临着水资源转移及其影响人居环境安全的问题。全球气候变化引起了西北地区冰川冻土融化加剧(姚檀栋,2013;邓铭江,2018),极端暴雨、暴风雪和大洪水增多,导致青藏高原湖泊扩张、冰湖溃决、柴达木盆地地下水位上升等环境事件。固态变液态使水资源从高山高寒地区向下游转移,进一步加剧时空失衡,不仅增加了水资源安全保障的风险(李志斐,2018;姚檀栋,2019;丁永健,2020),而且会驱使水文生态系统空间格局发生改变,给人居环境安全带来不利影响。如何应对水源固液比例失衡带来的影响是确保西北地区水资源安全的挑战之四。

(5)面临着开发与生态保护用水协调不够的问题。西北的优势在能源、矿产和土地3种资源,其开发利用需要大量水源支撑。同时区内生态问题突出,保护修复与开发建设并重。但目前的保护修复多为大面积地种草种树,对维持草木存活生长的水耗及过度修复后区域水循环路径改变带来产水量减少、加剧水资源安全隐患的环境负效应认识不够。陕北黄土高原和鄂尔多斯沙漠高原植被变化影响的研究表明,植树造林显著增加了植被覆盖度、减少了水土流失,但河川径流在明显减少(王随继等,2012;孙兆峰等,2017;毕早莹,2020;李慧娟等,2020;连秋晗等,2020;李舒等,2021;支童等,2021)。过度地种草种树会导致流域水循环路径变化,使原本要渗入地下和流向河道的降水进入草木通过叶面蒸散或成为草木的一部分,从而减少了含水层与河流中的水,许多修复区并未出现青山与绿水互进的局面。如何建立正确的林水关系,科学合理地修复生态是确保

区内水资源安全的挑战之五。

(6)面临着跨流域调水水源在受水区调蓄、保护与消除其环境负效应的问题。跨流域调水是解决水资源时空分布不均的主要手段。目前,西北地区的调水工程有引汉(江)济渭(河)、引哈(尔滕河)济党(河)、引那(棱格勒河)济格(尔木河)。外调水源在受水区地表调蓄水库的水面蒸发是水源的重大损失,热议中的“红旗河工程”更是要解决这一问题。同时,地表水库渗漏造成地下水位上升,产生的浮力会影响已有建筑物地基的安全稳定。如何科学合理的保护调水水源也是确保区域水资源安全的挑战之六。

5 水文地质工作方向与着力点

5.1 工作方向

解决西北地区的水资源与环境问题以及面临的安全挑战,从低级层面看必须解决增加水资源可利用量、减少水资源损失浪费、促进高效利用问题,从更高层面看必须解决好山水林田湖草沙生命共同体各要素协调共生、不可偏颇的问题。当今,从低级层面应对采取的措施主要是节水、增建地表水利工程调水、压缩地下水开采等,从更高层面应对策略和措施研究已经开启。西北地区已有水文地质调查研究工作及其成果展示区内盆山系统,众多沙漠和区域性含水层,以及工程活动遗留的诸多地下水位降落漏斗、广阔的采坑和塌陷等地下空间均是宝贵地质资源,对调蓄水资源与维持区域水平衡具有良好的利用前景,同时用之实现调蓄利用的方法简单。但目前区内的这类宝贵的地质资源认识不足,缺少利用,水文地质调查服务山水林田湖草沙生命共同体的系统保护与修复还未系统展开。笔者认为,未来水文地质工作应结合水文地质条件,将地表和地下两个空间综合利用研究和工程实践作为重点,以地球系统科学理论和水文地质理论为指导,本着“空间换时间”的思想,通过充分联合地表与地下空间存储涵养、调控利用水源,促进水资源时空分配均衡和高效利用以及山水林田湖草沙生命共同体中各要素的友好共生,以长远应对西北地区的水资源安全。为此,西北地区水文地质工作的方向是调查评价水文地质条件和地下水资源的动态变化,结合地质及水文水资源条件,抓住气候变化带来雨水增多的正效

应,从时空 2 个维度来研究制定保障水资源安全的地学方案与实现的地质技术和路径。

(1)加大地下水库探测,充分发挥地下水库调蓄功能提高水资源的可利用量。西北地区有巨大的地下空间调蓄水资源(党学亚等,2019c),除了天然的地下水库,还有山间河谷洼地、平原区地下水位降落漏斗、采煤形成的采空塌陷、高原沙丘和沙漠等看似无用、或不良、或带有危害的地下空间也是调蓄利用水资源的宝贵资源。①西北地区盆山套合,城市群、经济区多处于盆山结合部,各类地下空间为建设地下水库以调蓄利用这些脉冲式、一过性水源提供了良好的水文地质条件(王文科等,2002;康卫东等,2011;邓铭江,2019),是就地解决当地供水水源不足的有效途径(李亚民等,2009;郝爱兵等,2010;杨晖琴等,2019;邓铭江,2020)。②区内大大小小的地下水位降落漏斗是不用腾出库容可直接蓄水的地下水库,应加以充分利用。③采煤从另一角度看是在塑造含水层,闭坑矿山的采空区遗留了巨大的孔洞、裂隙系统,是良好的地下储水空间并可有效防止水源蒸发损失;对煤层厚度大延展远的鄂尔多斯盆地北部地区、新疆准东地区可用之建设超大型地下水库。④隐伏于各内陆河下游平原的断陷盆地是调蓄水资源的良好地下空间和地下水库。如:河西走廊 3 大河流域发育的多级断陷盆地具有调蓄水资源的功能与能力。⑤西北地区巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙漠等赋存地下淡水,均是可用于水资源调蓄的宝贵资源。⑥区域性含水层是调蓄水资源的巨大地下空间,如陕西渭北东部黄土旱塬区的岩溶水系统,面积近 7 000 km²。在 20 世纪 90 年代以前,地下水位标高基本维持在 380 m 左右,形成稳定的储水空间。随着开采的增加,目前水位已下降至 360 m 以下,腾出了巨大库容可用以调蓄,对维护区内供水安全至关重要。

(2)开发利用咸水资源,增强水源安全保障。西北干旱内陆平原大面积分布的微咸水、咸水和盐水也是宝贵的水资源,满足工业用水标准,加以利用,可减少淡水资源的消耗,缓解供水压力。例如,柴达木盆地的微咸水和咸水完全可以用于湖盐开采使用,且可以提高湖盐的产量,因此有必要开展微咸水和咸水调查评价。

(3)加强地表水与地下水联合调度,防治水源污染,增强水资源安全保障。要减少地表水库产生的

无效蒸发,以及水质污染导致的水资源浪费,同时修复受污染的水体。在水文地质条件允许的地段,①将地表水库存储水源、单纯通过种草种树涵养水源的做法,改为地下水库存储水源或地表水库与地下水库联合存储水源可有效减少水资源损失;②通过物理化学、生物处理污水与土地渗滤处理污水相结合,防治地表、地下水体遭受污染,维持甚至增加可利用的水资源量。

5.2 工作着力点

(1)针对关中—天水、兰州—西宁、柴达木、河西走廊、吐鲁番—哈密、天山北坡、塔里木、昆仑—阿尔金山前平原等城市群与经济区供水和跨流域调水水源存蓄、保护等水资源安全保障问题,十分有必要在秦岭山前平原、渭北岩溶地下水系统、湟水河谷地地下水系统、柴达木盆地周缘山前平原及矿业集中地西部山地河谷、河西走廊的祁连较大河流的山前平原、吐哈盆地北部和西部山前平原、天山北坡较大河流山前平原、塔里木盆地周缘各大支流的山前平原、伊犁河谷西部平原开展地下水系统、地下水位降落漏斗和水环境调查,评价其调蓄能力及其建设地下水库的环境适应性,提出水资源调蓄利用的地学方案,服务跨流域调水在受水区的水源存储场选择与水源保护,地表水、地下水联合调度以及流域水资源优化配置与科学管理。

(2)针对陕西榆林、内蒙古鄂尔多斯、甘肃陇东、宁夏宁东等能源基地供水保障、山水林田湖草沙生态系统涵养水源,开展采煤产生采空塌陷空间水资源调蓄功能与水环境调查,评价其调蓄能力及其建设地下水库的环境适应性,提出水资源调蓄利用的地学方案,助推山水林田湖草沙生态系统修复提质增效,服务黄河流域泥沙治理、生态环境保护与高质量发展。

(3)针对陕西渭北黄土旱塬供水安全保障,开展岩溶地下水系统水资源调蓄能力和环境适应性调查评价,研究制定实现的地学方案和路径。

(4)开展高海拔地区冰川冻土变化调查,评价水资源动态变化和区域含水层调蓄水资源能力变化,分析固体水库变迁趋势和环境效应,为应对水资源与生态环境安全提供科学依据。

(5)开展南水北调水源区地下水系统抗污能力与净化能力调查,以及污染阻断、污水处理与水质修复的地质技术研发,为防范矿山排水和尾矿库淋滤

水污染调水水源提供决策依据和技术支持,确保国家重大引水工程水源安全保障。

(6)开展沙漠调蓄水资源能力与地下水库建设的水文地质条件调查评价,服务沙区生活、生态和生产用水,以及跨流域调水水源存蓄与保护。

(7)开展柴达木盆地等旱区微咸水和咸水调查评价,为区内经济社会发展提供水资源依据。

(8)开展地下水超采区治理、跨流域调水水源加入带来的地下水位恢复与上升,对地下水环境影响调查与评价,维护城市水资源安全和地质环境安全。

6 结论

(1)西北地区的水资源空间分布与发展资源极不匹配,在气候变化和人类活动作用下水资源环境发生了显著变化,水资源安全面临着水资源可用量不足与时空失衡、利用方式简单、不必要的浪费、污染、水源涵养方式不合理以及水源转移等诸多问题与挑战。

(2)应对西北水资源安全问题必须解决如何增加可利用水量、减少损失浪费、促进高效利用问题,以及山水林田湖草沙生命共同体各要素协调共生、不可偏颇修复的问题。区内丰富而广阔的地下空间是调蓄洪水、冰雪融水宝贵资源,可有效提高水源涵养能力和水资源安全保障能力,对此地质角度提出解决方案和对策是水文地质工作的大方向。

(3)围绕西北地区水资源安全,水文地质工作的重点是开展盆地平原、山区、沙漠和主要矿集区地下空间调蓄水资源的能力调查评价,高海拔地区固体水库与区域含水层调蓄水资源能力及水资源动态变化调查评价,南水北调中线和西线水源区地下水系统抗污能力与净化能力调查以及研发水资源高效利用,污染阻断与水资源修复的地质技术研发,基于山水林田湖草沙生命共同体各要素协调共生、地下水库调蓄制定地质方案,推动水资源科学管理、高效利用。

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。同时,感谢为本文提供文献资料和帮助的中国地质调查局西安地质调查中心朱桦正高级工程师、王永和正高级工程师、尹立河研究员、李瑛正高级工程师、任华宁工程师、张雨莲工程师、新疆地矿局陆成新正高级工程师、乃尉华正高级

工程师、陆建国正高级工程师、邵争平正高级工程师、张明江正高级工程师,内蒙古地质调查院闫富贵正高级工程师。

参考文献(References):

- 毕早莹,李艳忠,林依雪,等. 基于Budyko理论定量分析窟野河流域植被变化对径流的影响[J]. 北京林业大学学报,2020,42(8):61-71.
- BI Zaoying, LI Yanzhong, LIN Yixue, et al. Quantitative assessment on the effects of vegetation changes on runoff based on Budyko theory in the Kuyehe River Basin of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(8): 61-71.
- 畅明琦,刘俊萍. 水资源安全基本概念与研究进展[J]. 中国安全科学学报,2008,18(8):12-19.
- CHANG Mingqi, LIU Ping. Basic concept of water resources security and Its research development[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(8): 12-19.
- 陈梦雄,段永侯,哈承佑,等. “八五”水文地质工程地质环境地质研究的主要成就与进展(连载 I)[J]. 地质科技管理,1998,2:55-58.
- 党学亚,常亮,卢娜. 青藏高原暖湿化对柴达木水资源与环境的影响[J]. 中国地质,2019a,46(2):359-368.
- DANG Xueya, CHANG Liang, LU Na. The impact of climatic warm-wet of the Tibetan Plateau on the water resources and environment in Qaidam Basin[J]. Geology in China, 2019a, 46(2): 359-368.
- 党学亚,顾小凡,姜军,等. 柴达木盆地地下水勘查研究[R]. 中国地质调查局西安地质调查中心,2019c.
- 党学亚,顾小凡,曾庆铭. 柴达木盆地矿泉水资源前景和开发利用条件[J]. 西北地质,2021,54(3):213-221.
- DANG Xueya, GU Xiaofan, ZENG Qingming. Prospect, Development and Utilization of the Mineral Water Resources in Qaidam Basin [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 213-221.
- 党学亚,卢娜,顾小凡,等. 柴达木盆地植被生态的地下水阈值[J]. 水文地质工程地质,2019b,46(3):1-8.
- DANG Xueya, LU Na, GU Xiaofan, et al. Groundwater threshold of ecological vegetation in Qaidam Basin[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2019b, 46(3): 1-8.
- 党学亚,张茂省. 陕北能源化工基地岩溶水赋存条件及其影响因素[J]. 地质通报,2008,27(8):1138-1142.
- DANG Xueya, ZHANG Maosheng. Mode of occurrence of

- karst groundwater in the Northern Shaanxi Energy and Chemical Industry Base[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8): 1138-1142.
- 党学亚, 张茂省, 董英, 等. 陕北侏罗纪煤田地下水保护对策与开采利用方案研究[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 200-207.
- DANG Xueya, ZHANG Maosheng, DONG Ying, et al. Research on protection and exploitation of groundwater resources in Northern Shaanxi Jurassic Coalfield [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(6): 200-207.
- 邓铭江. 旱区水资源集约利用内涵探析[J]. 中国水利, 2021, 14: 8-14.
- DENG Mingjiang. Connotation of intensive utilization of water resources in arid areas[J]. China Water Resources, 2021, 14: 8-14.
- 邓铭江. 破解内陆干旱区水资源紧缺问题的关键举措——新疆干旱区水问题发展趋势与调控策略[J]. 中国水利, 2018, 6: 14-17.
- DENG Mingjiang. Water Conservation Action is a key measure for alleviating water shortage in inland dry areas: a study on the development trend of water issues in the dry areas of Xinjiang Uyghur Autonomous Region and its allocation and regulation strategy[J]. China Water Resources, 2018, 6: 14-17.
- 邓铭江. 三层级多目标水循环调控理论与工程技术体系[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 961-975.
- DENG Mingjiang. System of three-scale multi-objective water cycle regulation theory and engineering technology [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 961-975.
- 邓铭江, 黄强, 畅建霞, 等. 大尺度生态调度研究与实践[J]. 水利学报, 2020, 51(7): 757-773.
- DENG Mingjiang, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, et al. Large-scale ecological operation research and practice [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7): 757-773.
- 丁永建, 赵求东, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文未来变化及其对于旱区水安全的影响[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 23-32.
- DING Yongjian, ZHAO Qiudong, WU Jinkui, et al. The future changes of Chinese cryospheric hydrology and their impacts on water security in arid areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 23-32.
- 董英, 张茂省, 卢娜, 等. 陕北能源化工基地资源开发引起的植被生态风险[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1313-1322.
- DONG Ying, ZHANG Maosheng, LU Na, et al. Ecological risk of vegetation caused by resource exploitation in the Northern Shaanxi Energy & Chemical Industry Base [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8): 1313-1322.
- 杜中宁, 党学亚, 卢娜. 陕北能源化工基地烧变岩的分布特征及水文地质意义[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1168-1172.
- DU Zhongning, DANG Xueya, LU Na. Distribution characteristics of burnt metamorphic rocks in the Northern Shaanxi Energy and Chemical Industry Base[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8): 1168-1172.
- 冯起, 龙爱华, 王宁练, 等. 西北内陆区水资源安全保障技术集成与应用[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 103-108.
- FENG Qi, LONG Aihua, WANG Ninglian, et al. Integration of Water Resources Security Technology and Its Application in Northwest Inland Area[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 103-108.
- 郝爱兵, 康卫东, 黎志恒, 等. 河西走廊张掖盆地含水层的水资源调节能力分析[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 208-214.
- HAO Aibing, KANG Weidong, LI Zhiheng, et al. The aquifer's capability of regulating water resources in Zhangye Basin Hexi Corridor Gansu Province China [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(6): 208-214.
- 韩生福, 李世金, 田承盛, 等. 青海省“358 地质勘查工程”——成果与经验[M]. 北京: 地质出版社, 2019.
- 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.
- 康卫东, 仇小强, 李文鹏, 等. 秦岭山前截洪引渗与地下水库调蓄及其协同效应研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(2): 8-26.
- KANG Weidong, QIU Xiaoqiang, LI Wenpeng, et al. Research on diversion-infiltration of flood and storage of underground reservoir and its collaborative effects in the piedmont of the Qinling Mountains[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38(2): 8-26.
- 李翠, 王晓玥. 美国拆坝统计分析[J]. 大坝与安全, 2015, 4: 74-78.
- 李慧娟, 师长兴, 马小晴, 等. 黄河中游窟野河流域水沙变化影响因素定量评估 [J]. 资源科学, 2020, 42(3): 499-507.
- LI Huijuan, SHI Changxing, MA Xiaoqing, et al. Quantification of the influencing factors of runoff and sediment discharge changes of the Kuye River catchment in the middle reaches of the Yellow River[J]. Resources Sci-

- ence, 2020, 42(3): 499-507.
- 李明,孙洪泉,苏志诚. 中国西北气候干湿变化研究进展[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1180-1194.
- LI Ming, SUN Hongquan, SU Zhicheng. Research progress in dry/wet climate variation in Northwest China[J]. Journal of Geographical Research, 2021, 40(4): 1180-1194.
- 李佩成,李启垒. 干旱半干旱地区水文生态与水安全研究文集(一)[C]. 西安:陕西科学技术出版社, 2010.
- 李舒,齐青松. 基于 IHA-RVA 法的人类活动对窟野河流域水文情势影响评估[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 24-63.
- LI Shu, QI Qingsong. Assessment of hydrological regime change under human activities in the Kuyehe River based on IHA-RVA[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(4): 24-63.
- 李文鹏,郝爱兵. 中国西北内陆干旱盆地地下水形成演化模式及其意义[J]. 水文地质工程地质, 1999, 4: 28-30.
- 李小林,龙作元,高忠咏,等. 青海地质环境——青藏高原隆升与青海水文地质工程地质环境地质工作[M]. 北京:地质出版社, 2009.
- 李亚民,郝爱兵,罗跃初,等. 西北内流盆地地下水资源开发利用的问题及其对策研究[J]. 资源与产业, 2009, 11(6): 48-54.
- LI Yamin, HAO Aibing, LUO Yuechu, et al. Issues and approaches to groundwater resources development in inland basins in Northwest China[J]. Resources and Industries, 2009, 11(6): 48-54.
- 李志斐. 气候变化对青藏高原水资源安全的影响[J]. 国际安全研究, 2018, 36(3): 42-157.
- LI Zhifei. Analysis of the Effects of Climate Change on Water Resources Security in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of International Security Studies, 2018, 36(3): 42-157.
- 连秋晗,田鹏,赵广举,等. 佳芦河流域生态治理影响下的水沙关系变化[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(4): 53-61.
- LIAN Qiuhan, TIAN Peng, ZHAO Guangju, et al. Change of the runoff-sediment relationship and its response to ecological management in Jialu River Basin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(4): 53-61.
- 闫利,张廷斌,易桂花,等. 2000 年以来青藏高原湖泊面积变化与气候要素的响应关系[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 573-589.
- LÜ Li, ZHANG Tingbin, YI Guihua, et al. Changes of lake areas and its response to the climatic factors in Tibetan Plateau since 2000 [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2): 573-589.
- 乃尉华,常志勇,陆成新,等. 新疆喀什经济开发区水文地质环境地质调查评价[M]. 北京:地质出版社, 2017.
- 聂春霞,李韧. 基于水安全的区域水资源配置方案评价及优选——以天山北坡城市群为例[J]. 生态经济, 2020, 36(7): 154-163.
- NIE Chunxia, LI Ren. Evaluation and Optimization of Regional Water Resources Allocation Based on Water Security: Taking Urban Agglomeration in the North Slope of Tianshan Mountain as an Example[J]. Ecological Economy, 2020, 36(7): 154-163.
- 聂振龙,张光辉,申建梅,等. 西北内陆盆地地下水功能特征及地下水可持续利用[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(1): 46-48.
- NIE Zhenlong, ZHANG Guanghui, SHEN Jianmei, et al. Characteristics of groundwater function distribution and its indication for sustainable groundwater resource development in interior basins, northwestern China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(1): 46-48.
- 秦昌波,苏洁琼,容冰,等. 我国水资源安全面临的挑战与应对策略研究[J]. 环境保护, 2019, 47(10): 46-48.
- QIN Changbo, SU Jieqiong, RONG Bing, et al. Research on the Challenges and Countermeasures of Water Resources Security in China [J]. Environmental Protection, 2019, 47(10): 46-48.
- 孙永明,马宁萍,贺西江,等. 宁夏水文地质工程地质环境地质工作发展史[M]. 银川:宁夏人民出版社, 2011.
- 孙兆峰,王双银,刘晶,等. 秃尾河流域径流衰减驱动力因子分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(2): 310-320.
- SUN Zhaofeng, WANG Shuangyin, LIU Jing, et al. Driving Force Analysis of Runoff Attenuation in Tuwei River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(2): 310-320.
- 王化齐,张茂省,党学亚,等. 基于生态约束的萨拉乌苏组地下水优化管理模型研究[J]. 长江科学院院报, 2014a, 31(4): 21-25.
- WANG Huaqi, ZHANG Maosheng, DANG Xueya, et al. Optimal groundwater management model for Salawusu Formation inconsideration of ecological constraint [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014a, 31(4): 21-25.
- 王化齐,张茂省,党学亚,等. 榆林市水资源管理决策支持系统平台研发[J]. 人民黄河, 2014b, 36(5): 48-51.
- WANG Huaqi, ZHANG Maosheng, DANG Xueya, et al.

- Research on water resources management decision support system in Yulin[J]. Yellow River, 2014b, 36(5): 48-51.
- 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012, 67(37): 388-397.
- WANG Suiji, YAN Yunxia, YAN Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: Application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(37): 388-397.
- 王文科, 孔金玲, 王钊, 等. 关中盆地秦岭山前地下水库调蓄功能模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(4): 5-9.
- WANG Wenke, KONG Jinling, WANG Zhao, et al. Simulation of regulation capacity of groundwater reservoirs in the piedmont of the Qinling Mountain for Guanzhong Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 29(4): 5-9.
- 王永贵, 郭宏业, 李健, 等. 柴达木盆地地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- WANG Yonggui, GUO Hongye, LI Jian, et al. Investigation and evaluation of groundwater resources and their environmental issues in the Qaidam Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- 吴爱民, 荆继红, 宋博. 略论中国水安全问题与地下水的保障作用[J]. 地质学报, 2016, 90(10): 2939-2947.
- WU Aimin, JING Jihong, SONG Bo. Water safety issues of China and ensuring roles of groundwater[J]. Acta Geological Sinica, 2016, 90(10): 2939-2947.
- 夏军, 石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 292-301.
- XIA Jun, SHI Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 292-301.
- 姚檀栋. 青藏高原水-生态-人类活动考察研究揭示“亚洲水塔”的失衡及其各种潜在风险[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2761-2762.
- YAO Tandong. A comprehensive study of Water-Ecosystem-Human activities reveals unbalancing Asian Water Tower and accompanying potential risks[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2761-2762.
- 姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响[J]. 自然杂志, 2013, 35(3): 179-185.
- YAO Tandong, QIN Dahe, SHEN Yongping, et al. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological [J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 53(3): 179-185.
- 闫俊霞. 新时期构建新疆水安全保障体系的对策及建议[J]. 建筑工程技术与设计, 2021, 12: 1467.
- 杨辉琴, 邓铭江, 裴建生. 台兰河地下水库工程关键技术问题解决方案[J]. 人民黄河, 2019, 42(3): 109-118.
- YANG Huiqin, DENG Mingjiang, PEI Jiansheng. Solution of critical technical issues in the demonstration project of underground reservoir of piedmont depression of Tairan River[J]. Yellow River, 2019, 42(3): 109-118.
- 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.
- 张光辉, 费宇红, 聂振龙, 等. 区域地下水演化与评价理论方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- 张光辉, 聂振龙, 王金哲, 等. 黑河流域水循环过程中地下水同位素特征及补给效应[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 511-519.
- ZHANG Guanghui, NIE Zhenlong, WANG Jinzhe, et al. Isotopic characteristic and recharge effect of groundwater in the water circulation of Heihe River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(5): 511-519.
- 张光辉, 万力, 李文鹏. 西北内陆水循环演化及水资源利用——生态环境保护优化模式[C]. “十五”地质行业获奖成果资料汇编, 2006: 53-54.
- 张俊, 侯荣哲, 尹立河, 等. 盆地地下水流系统形成与影响因素分析[J]. 水文地质工程地质, 2017a, 44(4): 8-14.
- ZHANG Jun, HOU Rongzhe, YIN Lihe, et al. Formation and influencing factors of regional groundwater flow systems[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017a, 44(4): 8-14.
- 张俊, 尹立河, 马洪云, 等. 鄂尔多斯高原潜水同位素特征及其成因分析[J]. 干旱区研究, 2017b, 34(4): 748-754.
- ZHANG Jun, YIN Lihe, MA Hongyun, et al. Isotope Characters of Shallow Groundwater and Their Formation Causes in the Ordos Plateau[J]. Arid Zone Research, 2017b, 34(4): 748-754.
- 张俊, 刘天罡, 董佳秋, 等. 含水层层状非均质对地下水流系统的影响[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1715-1725.
- ZHANG Jun, LIU Tiangang, DONG Jiaqiu, et al. The impact

- of aquifer layered heterogeneity on groundwater flow system [J]. *China Geology*, 2020, 47(6): 1715-1725.
- 张俊,尹立河,顾小凡,等. 同位素水化学指示的新疆孔雀河流域地下水与地表水关系[J]. *西北地质*, 2021, 54(1): 185-195.
- ZHANG Jun, YIN Lihe, GU Xiaofan, et al. Study on the Relationship Between Groundwater and Surface Water in Xinjiang Kongque River Basin Using Isotopes and Hydrochemistry method [J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(1): 185-195.
- 张茂省,党学亚,等. 干旱半干旱地区水资源及其环境问题——陕北榆林能源化工基地例析[M]. 北京:科学出版社,2014.
- 张茂省,董英,杜荣军,等. 陕北能源化工基地采煤对地下水资源的影响及对策[J]. *地学前缘*, 2010, 17(6): 235-246.
- ZHANG Maosheng, DONG Ying, DU Rongjun, et al. The strategy and influence of coal mining on the groundwater resources at the Energy and Chemical Base in the North of Shaanxi[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(6): 235-246.
- 张茂省,卢娜,陈劲松. 陕北能源化工基地地下水开发的植被生态效应及对策[J]. *地质通报*, 2008, 27(8): 1299-1312.
- ZHANG Maosheng, LU Na, CHEN Jinsong. Ecological effects of vegetation during groundwater exploitation in the Northern Shaanxi Energy & Chemical Industry Base [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(8): 1299-1312.
- 支童,张洪波,辛琛,等. 秃尾河流域植被覆盖变化及其对径流的影响[J]. *水利水电技术*, 2021, 52(02): 40-52.
- ZHI Tong, ZHANG Hongbo, XIN Chen, et al. Vegetation cover variation and its impact on runoff in Tuweihe River Watershed [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(02): 40-52.
- 周金龙,陆成新,王智,等. 新疆地下水科学事业的发展与成就[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- 周仰效,李文鹏. 地下水水质监测与评价[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 1: 1-11.
- ZHOU Yangxiao, LI Wenpeng. Groundwater quality monitoring and assessment [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2008, 1: 1-11.
- 赵长青. 围绕生态优先绿色发展制定水安全保障规划[J]. *前线*, 2021, 2: 32-35.
- 朱桦,翟刚毅,杨刘岗,等. 西北地区地下水资源及其环境调查综合评价报告[R]. 西安地质矿产研究所, 2003.
- 中国地质调查局. 我国主要地方病区地下水与供水安全示范[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2019.
- 中国地质调查局发展研究中心. 2019年全国地质调查工作程度图集[R]. 自然资源部中国地质调查局, 2019.
- DANG Xueya, LU Na, GU Xiaofan, et al. The relationship between groundwater and natural vegetation in Qaidam Basin [J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2021, 9(4): 341-349.
- HOU Guangcai, YIN Lihe, et al. Groundwater Systems and Resources in the Ordos Basin, China, *Acta Geologica Sinica*, 2008, 5: 1061-1069.
- SHANG H, WANG W, DAI Z, et al. An ecology-oriented exploitation mode of groundwater resources in the northern Tianshan Mountains, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 386-394.
- WANG Huaqi, Wu Zhao, He Shuaijun, Ma Hongyun, et al. Research on sustainable utilization of the drainage water in Jurassic Coal Field in Northern Shaanxi Province [J]. *Open Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 4(3): 45-51.
- WANG W, DAI Z, ZHAO Y, et al. A quantitative analysis of hydraulic interaction processes in stream-aquifer systems [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19876.
- WANG W, WANG Z, HOU R, et al. Modes, hydrodynamic processes and ecological impacts exerted by river-groundwater transformation in Junggar Basin, China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(5): 1547-1557.
- YIN Lihe, HOU Guangcai, SU Xiaosi, et al. Isotopes in precipitation, groundwater and surface water in the Ordos Plateau, China: implications with respect to groundwater recharge and circulation [J]. *Hydrogeology Journal*, 2011b, 19(2): 429-443.
- YIN Lihe, HOU Guangcai, TAO Zhengping, et al. Origin and Recharge Estimates of Groundwater in the Ordos Plateau, P. R. China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(8): 1731-1738.
- YIN Lihe, ZHANG Jun, HUANG Jinting, et al. Groundwater-recharge estimation in the Ordos Plateau, China: comparison of methods [J]. *Hydrogeology Journal*, 2011a, 19(6): 1563-1575.
- YIN Lihe, ZHOU Yangxiao, XU Dandan, et al. Response of phreatophytes to short-term groundwater pumping in a semiarid region: Field experiments and numerical simulations [J]. *Ecohydrology*, 2018, 10, 1002/eco.1948.