

doi: 10.12029/gc20210408

尹立河,张俊,王哲,董佳秋,常亮,李春燕,张鹏伟,顾小凡,聂振龙. 2021. 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, 48(4): 1094-1111.

Yin Lihe, Zhang Jun, Wang Zhe, Dong Jiaqiu, Chang Liang, Li Chunyan, Zhang Pengwei, Gu Xiaofan, Nie Zhenlong. 2021. Groundwater circulation patterns and its resources assessment of inland river catchments in northwestern China[J]. *Geology in China*, 48(4): 1094-1111(in Chinese with English abstract).

西北内陆河流域地下水循环特征与地下水资源评价

尹立河^{1,2}, 张俊^{1,2}, 王哲³, 董佳秋^{1,2}, 常亮^{1,2}, 李春燕⁴, 张鹏伟⁵, 顾小凡^{1,2}, 聂振龙³

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局干旱半干旱区地下水与生态重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 4. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 5. 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830057)

摘要:在系统梳理前人调查研究成果基础上,总结了西北内陆河流域主要的含水层特点,对山区、平原区和沙漠区的地下水循环特点进行了分析,着重对平原区地下水水流系统进行了讨论。由于西北内陆河流域地下水与地表水关系密切,形成了具有密切水力联系的含水层-河流系统,不论是上游开发地表水还是地下水,都会引起整个流域内地下水资源的强烈变化。地下水资源评价表明,西北内陆河流域地下水资源量为 783 亿 m³/a,其中平原区的地下水资源量为 487 亿 m³/a,山区与平原区的地下水资源重复量为 199 亿 m³/a,现状开采量为 128 亿 m³/a。地下水开发潜力分析表明,除柴达木盆地、塔里木盆地南缘等地区外,其他地区的地下水开采潜力有限,应通过提高水资源的利用效率来提高其承载能力。今后应加大(微)咸水资源化、地下水水库的调查研究,加强地下水的生态功能和生态需水量评价,为地下水资源的合理开发利用提供技术支撑。

关键词:西北内陆河流域;水文地质条件;地下水资源;开发潜力;地下水水流系统;水文地质调查工程

中图分类号: TV 211.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2021)04-1094-18

Groundwater circulation patterns and its resources assessment of inland river catchments in northwestern China

YIN Lihe^{1,2}, ZHANG Jun^{1,2}, WANG Zhe³, DONG Jiaqiu^{1,2}, CHANG Liang^{1,2},
LI Chunyan⁴, ZHANG Pengwei⁵, GU Xiaofan^{1,2}, NIE Zhenlong³

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Groundwater and Ecology in Arid Regions of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Institute of Hydrogeology and Engineering Geology of CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 4. China Geological Environmental Monitoring Institute, Beijing 100081, China; 5. Urumqi Comprehensive Survey on Natural Resources of China Geological Survey, Urumqi 830057, Xinjiang, China)

Abstract: Based on the systematic synthesis of previous studies, main aquifers in inland catchments in northwestern China were summarized, groundwater circulation in mountains, plains and deserts were described, and groundwater flow systems in plains were

收稿日期: 2021-04-24; 改回日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(41877199)、陕西省创新能力支持计划(2019TD-040)及中国地质调查局项目(DD20190351)联合资助。

作者简介: 尹立河,男,1977年生,博士,研究员,主要从事旱区水文地质调查研究; E-mail: ylihe@cgs.cn。

specifically analyzed. Due to the tight connection between groundwater and surface water, aquifers and rivers are hydraulically connected to form a system. Therefore, either groundwater or surface water exploitation in the upper stream can result in significant changes in water resources in the entire catchment. Groundwater resources assessment shows that the total groundwater resources are 78.3 billion m^3/a , of which it is 48.7 billion m^3/a in plains, 19.9 billion m^3/a in mountainous areas and plains, and the current mining rate is 12.8 billion m^3/a . Groundwater resource potential analysis indicates that groundwater potential is limited except the Cadam basin and the southern marginal areas of the Tarim basin. Hence, groundwater carrying capacity can only be increased by enhancing groundwater utilization efficiency. In the further, saline or brackish water utilization, research on underground water reservoirs, studies on groundwater ecological function and ecological water requirements should be enhanced to provide technical support for the rational development of water resources.

Key words: hydrogeological conditions; groundwater resources; development potential; groundwater flow system; hydrogeological survey engineering; inland catchment of northwestern China

About the first author: YIN Lihe, male, born in 1977, PhD, professor, engaged in hydrogeological survey and research in arid regions; E-mail: ylihe@cgs.cn.

Fund support: Supported by National Natural Sciences Foundation (No.41877199), Innovation Capability Support Program of Shaanxi (No.2019TD-040) and the project of China Geological Survey (No.DD20190351).

1 引言

西北内陆河流域行政区地跨新疆、青海、甘肃和内蒙古,总面积约250万 km^2 ,占全国陆地面积的26%左右。该区地处中国和亚欧大陆腹地,东牵亚太经济圈,西系发达的欧洲经济圈,地理位置突出,是丝绸之路经济带核心区和实施西部大开发战略的重点地区,中国战略资源的重要基地和对外开放的门户,也是我国生态安全战略格局中的重点区域。然而,该区水资源短缺,生态环境问题严峻,水资源供需矛盾日益突出,制约了其经济和社会发展。

该地区有诸多大型沉积盆地,如塔里木盆地、准噶尔盆地、吐鲁番—哈密盆地、柴达木盆地、河西走廊等(图1)。盆地上游均为高大山区,如昆仑山、天山、阿尔泰山、祁连山等,这些高大山体截留环流水汽,山区降水丰富,且终年积雪并发育巨大冰川,降雨和冰雪融水为平原区提供了可靠的水源补给,是水资源的形成区(王德潜等,2000)。盆地中部为绿洲区,是水资源的主要转化区和消耗区,也是社会经济发展和人类活动的主要地区。盆地下游为沙漠区,中国的主要沙漠都分布在内陆河流域,主要有塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠等(图1),由于蒸发强烈,成为水资源的最终消亡区。

西北内陆河流域深居欧亚大陆腹地,距离海洋较远,再加上众多高大山脉对湿润气流的阻挡,形

成了典型的大陆干旱性气候。水气主要来自大西洋和北冰洋,少量来自印度洋(胡汝骥等,2002;刘维成等,2017),多年平均降水量(1960—2019年)约为152 mm。但山区降水量大,可达200~500 mm/a,最大出现在伊犁河上游(可达1000 mm/a以上),因此西北内陆河流域的降水主要发生在上游山区,中下游地区的降水非常稀少。以新疆为例,其多年平均降水量为2400亿 m^3 ,其中约84%来自山区,而盆地中部的沙漠区年降水量多小于25 mm。西北内陆河流域的降水60%~80%集中在6—9月份,多以强降水形式出现,且年际变化剧烈(胡汝骥等,2002;王德潜等,2002;曲炜,2005;郭江勇等,2006)。受全球气候变化的影响,该区降水量总体呈现增长趋势,特别是在新疆和柴达木盆地增长明显,长序列的降水数据(1961年以来)表明,降水量增加幅度约为9.3 mm/10a(姚俊强等,2015;刘维成等,2017)。与降水相比,蒸发能力大,一般在1500 mm/a以上,盆地中部区可达4000 mm/a以上(王德潜等,2000)。因为降水稀少,蒸发强烈,降水不能满足农作物生长的需要,区内以灌溉农业为主。

西北内陆河流域共有河流600多条,多以长度不大的小河为主,较长的河流包括塔里木河(2179 km)、黑河(948 km)等。西北内陆河年地表径流量约为900亿 m^3 ,其中大于1亿 m^3 的河流有90多条,接近或是大于10亿 m^3 的河流有14条,这些大河的径流量占该区总径流量的60%以上。河水的补给

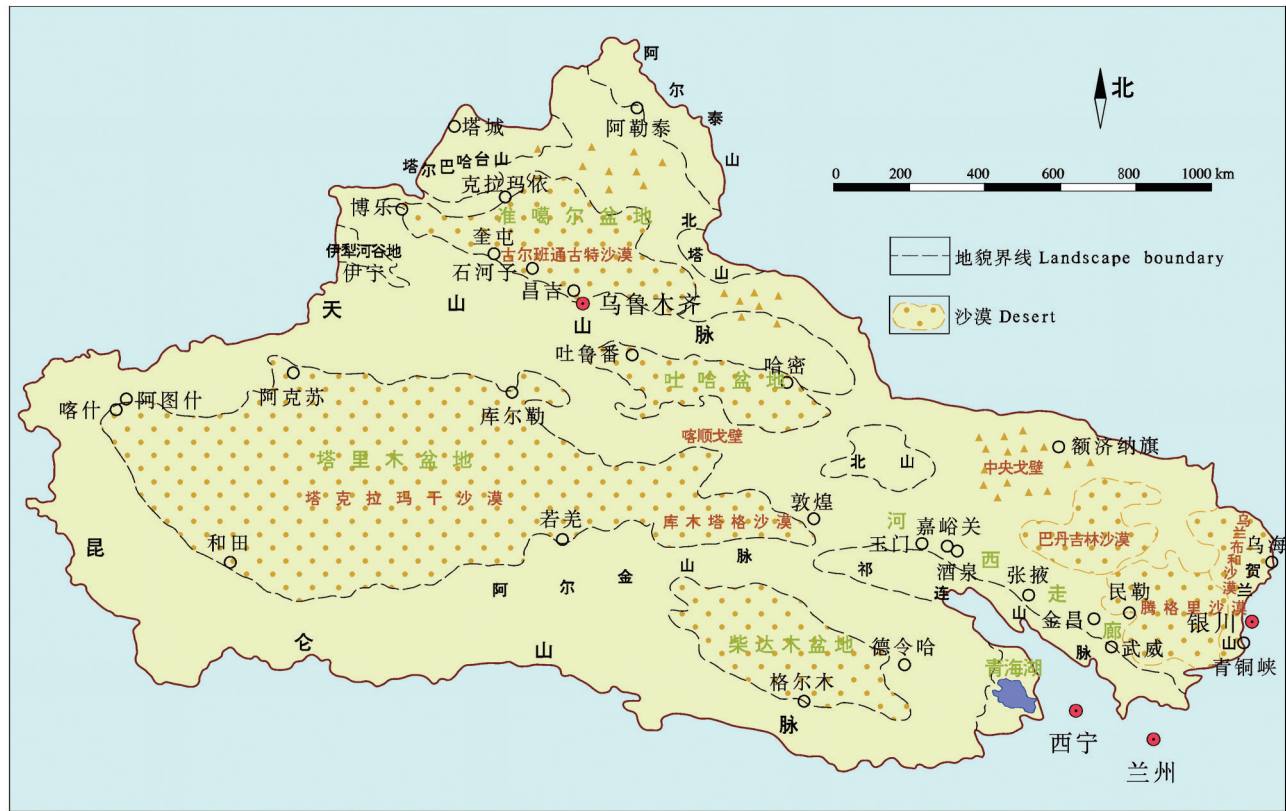


图1 西北内陆河流域的主要盆地、山脉与沙漠(据钱正英等,2004)

Fig. 1 Main basins, mountains and deserts of inland river catchments in northwestern China (after Qian Zhengying et al., 2004)

来源主要是降水、冰川融水形成的地表径流,以及山区地下水的补给。河流发源地均为降水量大的山区,降水形成的地表径流是河水的主要来源。此外山区冰川广布,面积约为2.7万 km²,约占全国冰川总面积的50%(王宗太,2001),冰川融水也是山区河流的重要补给源,在发源于天山和昆仑山的河流中,冰川融水和雪融水可占年径流量的40%~50%(杨针娘,1981)。河流出山后,流经绿洲区,最终汇聚到尾间部位,形成尾间湖,如塔里木河下游的台特马湖、石羊河下游的青土湖、黑河下游的东居延海等。受强烈蒸发作用的影响,湖水矿化度高,多为咸水湖(如塔里木盆地的罗布泊、柴达木盆地的察尔汗盐湖等),是西北地区盐化工所需原料的主要产地。

西北内陆河流域地处干旱区,水资源是社会发展、生态环境保护的重要保障。由于地表水分布极不均匀,动态变化大,且开发利用程度已较高,部分地区已超过70%,历史上最高达90%以上(李文鹏等,1996;李文鹏,1999;王德潜等,2000;潘世兵

等,2002)。由于地下水具有分布范围广、水质水量稳定、多年调节能力强、蒸发损失小、不易污染等特点,在内陆河流域具有不可替代的作用,许多地区甚至是唯一的可用水源。内陆河流域的地下水具有悠久的开发历史,新疆的坎儿井是中国早期利用山前平原地下水的经典案例。随着地表水可用资源的减少,人们日益寄希望于向地下索取更多的水资源。但随着地下水开发程度的不断增大,出现了诸如地下水水位持续下降、泉流量衰减、水质恶化、植被退化、沙漠化以及盐渍化等生态环境问题(范锡朋,1991;王德潜等,2000;丁宏伟等,2002;丁宏伟,2004)。

由于地下水的重要性,建国以来对西北内陆河流域开展了较为系统的水文地质调查研究工作,1:20万水文地质普查是其中最重要的一项,覆盖了主要的绿洲平原区,基本查明了区域水文地质条件。以水文地质普查成果为基础,20世纪50—70年代,老一辈水文地质工作者总结了内陆河流域山前平原的水文地质特征、绘制了典型的水文地质剖面、

分析了地下水水化学特征与成因(陈墨香,1959;段永侯等,1964;阎锡璵等,1973)。20世纪80年代以后,随着地下水开采量的逐步增大,调查研究更加关注地下水开发引起的生态环境问题和地下水的可持续利用(李宝兴,1983;范锡朋,1991;徐兆祥,1992;李文鹏,1999);2000年之后,随着生态环境问题的日益突出与生态环境保护意识的不断提高,更加关注地下水的生态功能与生态需水量评价(郭占荣等,2005;王文科等,2011;聂振龙等,2012)。在地下水资源评价方面,从20世纪80年代开始,西北内陆河流域做过4次覆盖全区的地下水资源评价,对地下水的资源量与潜力进行了较为系统的评价。本文是在系统梳理前人工作的基础上,总结了在水文地质条件、地下水循环规律、地下水资源评价等方面开展的工作和取得的主要认识,提出需要进一步研究的问题和方向,以期实现西北内陆河流域地下水可持续利用。

2 水文地质条件

2.1 主要含水层

按沉积相和地层时代,西北内陆河流域主要的含水层有4大类,分别是:山麓相、河-湖相新近系、古近系和白垩系含水层;冲洪积相第四系中、上更新统含水层;河-湖相第四系中、下更新统含水层;沙漠相第四系全新统含水层。其中,松散岩类孔隙水和基岩裂隙水是主要的地下水类型,其次在高山区分布有冻结层水,岩溶水只是零星分布(图2)。

2.1.1 山麓相、河-湖相新近系、古近系和白垩系含水层岩组

在新疆和青海柴达盆地的山前地带,白垩系和新近系、古近系碎屑岩赋存较为丰富的基岩裂隙地下水(赵运昌,2002)。在塔里木盆地和准噶尔盆地山前和前山地带古-新近纪地层多组成低山和丘陵,构成一套砾岩、砂岩弱含水层,呈带状断续排列于盆地边缘。由于受构造作用影响较小,成层清晰,层间以泥质为主的隔水岩层厚度大,多为单斜和楔状储水构造,普遍含有层间孔隙裂隙潜水和局部承压自流水,水交替条件滞缓,一般水量较小,钻孔单位涌水量一般小于 $10\text{ m}^3/\text{d}$,泉流量小于 2 L/s ,一般为微咸水。柴达木盆地西部和东北部分布以新近系为主的半胶结岩类承压水系统,埋藏较深,

一般都在数百米以下,由多个含水层组成,钻孔初喷水量很大,但矿化度均在 100 g/L 以上,水化学类型主要为Cl-Na型,温度较高,富含微量元素。

2.1.2 冲湖积相第四系中、下更新统含水组

广泛分布在内陆河流域腹地,冲洪积扇以下的河湖平原地区,为砂、黏土互层的承压水系统。含水层由砂砾、砂与黏性土层相间的多层结构组成,承压水顶板埋深数十米至百余米,多埋藏于不同程度高矿化潜水层之下。承压水头高于潜水水位,地势较低处为自流水层,单井涌水量由扇前向盆地中心由 $1000\sim 2000\text{ m}^3/\text{d}$ 至小于 $1000\text{ m}^3/\text{d}$ 变化。含水层总厚度向盆地腹地变薄,含水层逐渐尖灭,被黏性土层替代,富水性也逐渐减弱。承压-自流水带的上部潜水主要接收各类地表水体补给,单井涌水量一般小于 $1000\text{ m}^3/\text{d}$ 。蒸发强烈,水质多已矿化,矿化度由 1 g/L 过渡为大于 3 g/L ,水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3-\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型,在人类活动比较活跃的地区,浅层地下水受到一定的污染。而深层承压自流水与扇区潜水具有直接水动力联系,水质优良,矿化度多小于 1 g/L ,是广大农牧区主要供水水源。

2.1.3 冲洪积相第四系中、上更新统含水层

山前冲-洪积倾斜平原分布着巨厚的第四系松散层,主要分布在山前沉降带内及山前倾斜砾质平原区,在地貌上形成冲洪积扇群组成的山前倾斜平原,主要是由巨厚的松散单一卵砾石和砂砾石层组成的潜水含水层,富含冲洪积层孔隙水(图2)。含水层厚度大,最厚可达近千米,单井涌水量在 $1000\sim 3000\text{ m}^3/\text{d}$ (王德潜等,2000)。孔隙率高,又有大量的河水入渗补给,为地下水提供了良好的赋存条件,是整个西北内陆河流域最主要的富水地段,构成平原区巨大的地下水储水盆地。该区水质好,多为矿化度小于 1 g/L 的淡水,水化学类型主要为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型或是 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型。因受山前区域压性冲断层阻隔,地下水埋深在扇顶大于 100 m ,到中部地区为 $10\sim 50\text{ m}$,而扇面前缘仅为 $3\sim 10\text{ m}$,甚至溢出地表。扇缘地下水埋深小于 50 m 的地段,成为特大型和大型水源分布区。

2.1.4 沙漠相第四系全新统含水层

主要是沙漠区的含水层,分布于盆地腹部,形成沙丘孔隙水(图2)。一般在沙漠边缘地带,大多

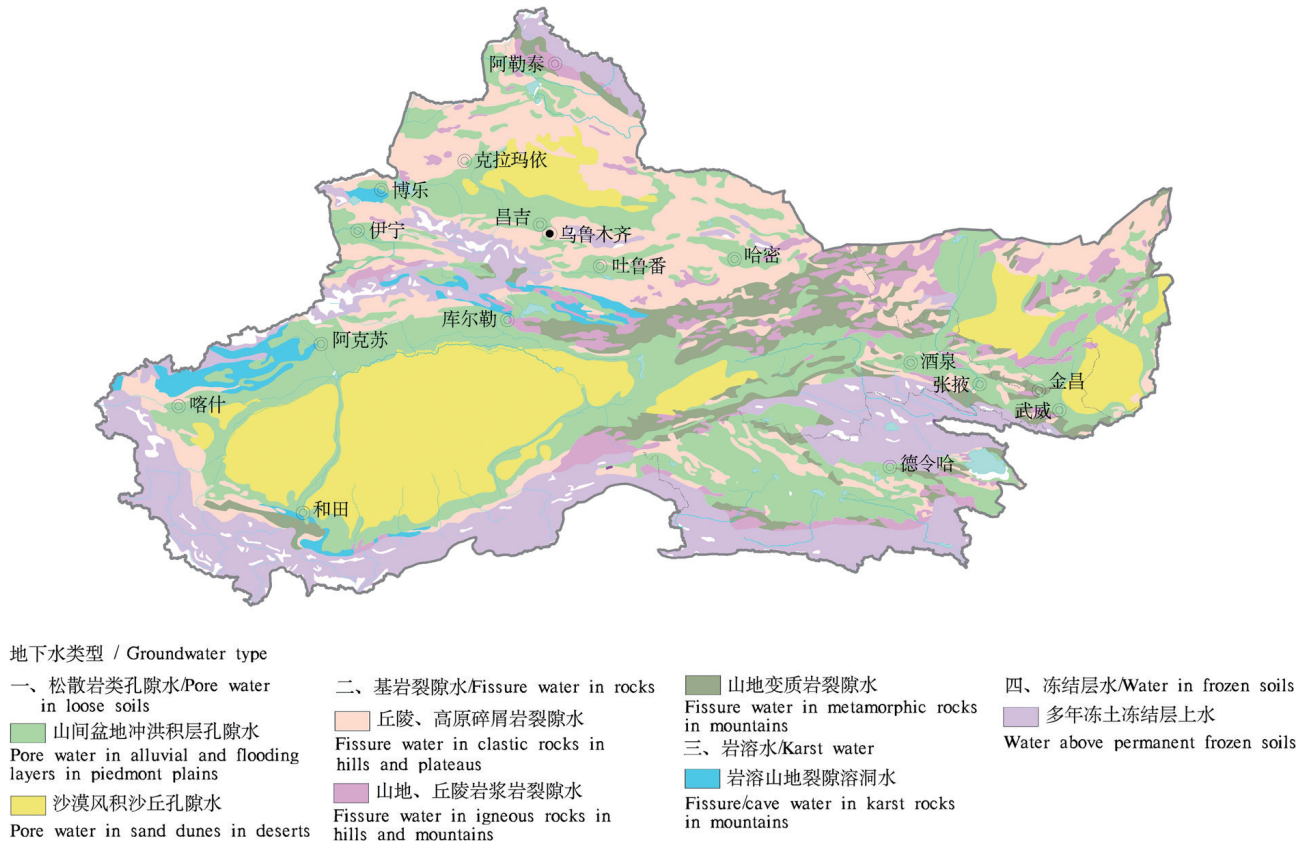


图2 西北内陆河流域地下水类型图
Fig.2 Groundwater types of inland river catchments in northwestern China

分布有第四系冲洪积层潜水和承压水。沙漠腹地的地下水,主要取决于储水构造、赋水介质和边界补给条件,主要有现代风积砂、第四系冲洪积潜水含水层、第四系冲洪积和冲湖积承压含水层。现代风积砂潜水含水层分布普遍,含水层岩性主要是细砂,厚度数米到数百米,水位埋深不大于10 m,单井出水量不大,矿化度1~5 g/L。第四系冲洪积潜水含水层在沙丘下的古河道普遍分布,由砂砾石及中粗砂组成,矿化度3~6 g/L,单井涌水量小于500 m³/d。沙漠区的浅层地下水受强烈蒸发作用的影响,水质一般较差,相对于巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和古尔班通古特沙漠,塔克拉玛干沙漠区的水质最差,地下水的矿化度平均值达4.1 g/L,水化学类型以SO₄·Cl-Na型、SO₄·Cl-Na·Mg型和SO₄·Cl-Na·Ca型为主(范薇等,2019)。第四系冲洪积和冲湖积承压含水层由砂砾石、砂和多层亚黏土组成,承压水头可高出地面,水量不大,水质复杂。从宏观上分析,大多数沙漠区地下淡水,均为隐伏的古

冲湖积平原或古河道带的地下水。

2.2 地下水循环

西北内陆河流域地下水循环的基本特点有3个:(1)主要的内陆盆地构成了各自独立的水循环系统,形成了没有水力联系的内陆河大小流域(胡汝骥等,2002);在流域的过渡带,一般水资源贫乏,生态环境脆弱;(2)由于平原区降水稀少,山区的水资源是平原区地下水和地表水的重要补给源,平原地下水与地表水为同一补给源的表现形式,具有密切的水力联系(范锡朋,1991);(3)地表水与地下水的多次转化是水资源循环的基本方式(图3)。从山区到尾间湖,地下水与地表水的转化至少为3次(李文鹏,1999)。在河西走廊地区,由于分布有2~3排构造盆地,这种转化可以达到4~5次(胡汝骥等,2002)。地下水与地表水的频繁转化,使得水资源可以多次利用,增加了可用水量,但水质越来越差。在水资源开发强烈的地区,水质恶化趋势明显,如在水资源开发大幅增加的时期,在河西走

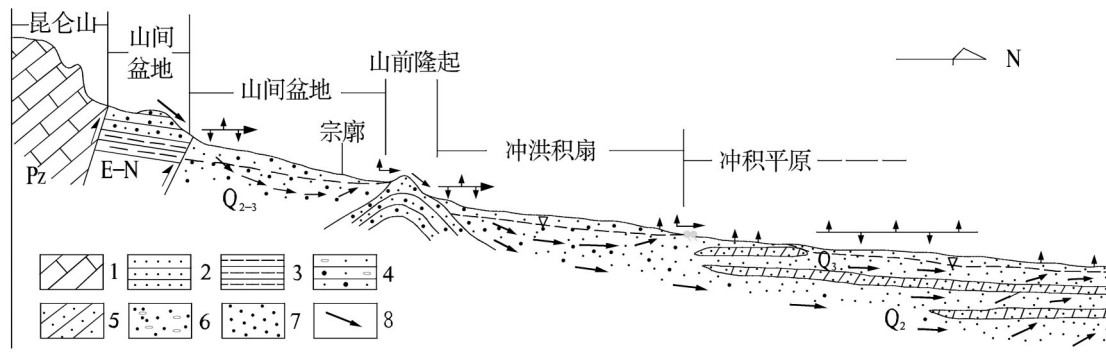


图3 塔里木盆地地下水与地表水多次转化示意图

1—灰岩;2—砂岩;3—泥岩;4—砾岩;5—亚砂土;6—卵砾石;7—砂层;8—水资源转化方向

Fig.3 Multiple transformation between surface water and groundwater in the Tarim Basin

1—Limestone;2—Sandstone;3—Mudstone;4—Conglomerate;5—Sandy soil;6—Gravel;7—Sand layer;8—Transformation direction of water resources

廊、塔里木河下游以及焉耆盆地等地区,水质恶化显著(范锡朋,1991)。

2.2.1 山区地下水循环

3500~4000 m以上的极高山区,发育多年冻土,赋存冻结层水(图2),冻结层水主要是接受降水和冰雪融水的补给,其中降水补给占85%左右,地下水在冻结层中由高向低运动,在适当的部位以下降泉的形式排泄于沟谷中。

3500 m以下的中低山区,主要发育基岩裂隙水,其次还有岩溶裂隙水(图2);低山丘陵区及盆地边缘地区,发育碎屑岩类裂隙孔隙水(张鸿义等,2011)。山区地下水的埋藏受地形和裂隙发育不均匀的影响,一般很难形成统一的地下水位。在这些山区,降水是地下水的主要补给源,沿节理、裂隙和断层破碎带入渗补给地下水,沿地形由高向低运动,以下降泉的形式汇入地表水。据地下水资源评价的结果,山区地下水资源量为487亿 m^3/a ,其中以裂隙水为主,资源量为459亿 m^3/a ;其次为孔隙水和岩溶水,分别为11亿 m^3/a 和17亿 m^3/a 。按流域排序,准噶尔盆地和塔里木盆地山区地下水资源量较大,分别为213亿 m^3/a 和196亿 m^3/a 。

2.2.2 平原区地下水循环

平原与山体的接触关系是决定平原区地下水循环的重要因素。前人研究表明,大体上有5种基本类型(图4):(1)山区地下水可以直接进入山前平原,补给第四系松散砾石层中的潜水;(2)山区地下水不能自由进入山前平原,与砾石层中潜水无直接水力联系;(3)山区地下水可自由进入上戈壁或南

盆地,补给那里的潜水,然后再通过溢出转化为河水而进入下戈壁或北盆地;(4)山区地下水虽可自由进入山前平原,但第四系含水层较薄而蓄水性能差;(5)盆地的标高呈阶梯式下降,隆起带亦依次降低,每个盆地中的河水和地下水都能相互转化,水资源具有明显的重复性。

在天然条件下,河流出山后大量渗漏,小于0.5万 m^3/a 的河流渗失殆尽,渗漏量可占到河水量的35%~80%(范锡朋,1991;邵新民,2002)。河流出山后的大量渗漏是平原区地下水的重要补给源,占地下水总补给量的74%~86%(范锡朋,1991)。这些由河水转化而来的地下水,在平原的中、下部,主要是通过河水入渗、渠道入渗、田间入渗补给地下水(Sun Fangqiang et al., 2020)。地下水的排泄主要是以泉的形式出现,泉水是下游河流的重要补给源,占到河水总补给量的50%~80%。除此以外,随着人类活动的增加,人工开采成为越来越重要的排泄项。据地下水资源评价的结果,平原区地下水资源量为487亿 m^3/a ,全部为孔隙水。按流域排序,塔里木盆地和准噶尔盆地平原区地下水资源量较大,分别为227亿 m^3/a 和158亿 m^3/a 。

平原区的这种循环特征,使得山前到细土平原,水文地质条件具有明显的分带性:地下水位埋深由山前大于200 m变为1~3 m或是以泉水的形式溢出;岩性结构由单一大厚度砂砾卵石粗粒相地层渐变为砂砾石、砂与黏土互层的细粒相多层结构(图3);地下水由单一大厚度潜水变为上部潜水、下部多层承压水的综合含水层;单井涌水量从大于10000 m^3/d 渐变为小

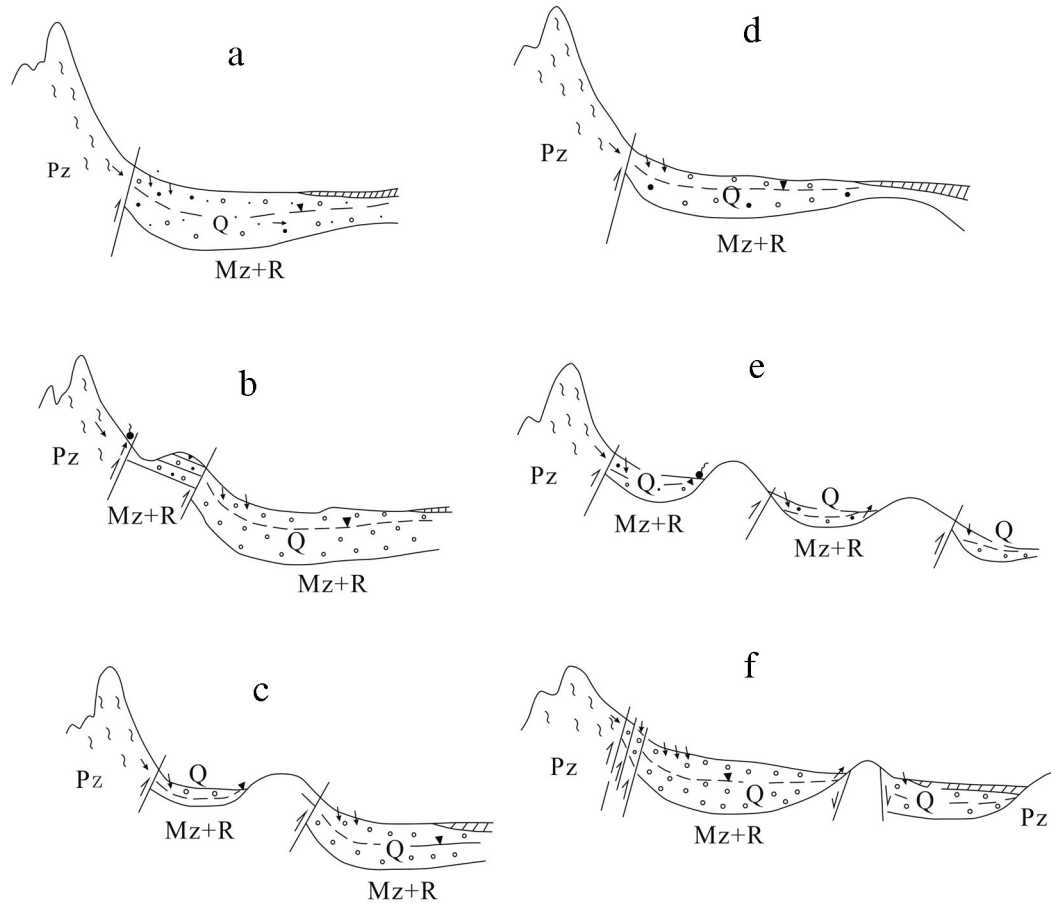


图4 山前平原地下水补给类型示意图(据李宝兴,1982)

Pz—古生界; Mz+R—中生界; Q—第四系; a—基岩山体 and 第四系直接补给型(天山南北麓东、西段型); b—基岩山体 and 第四系有中生界界隔的补给型(昆仑山北麓东段型); c—基岩山前有中生界隆起的补给型(天山南北麓中段); d—山前平原有隐伏隆起的补给型(阿勒泰山前型); e—山前有多排隆起的补给型(昆仑山北麓西段型); f—南、北盆地补给型(河西走廊型)

Fig.4 Schematic diagrams showing groundwater recharge of piedmont plain (after Li Baoxing, 1982)

Pz— Paleozoic; Mz+R—Mesozoic and Cenozoic; Q—Quaternary; a—Direct contact between rocky mountains and Quaternary (east and west part of southern and northern food of Tian Mt.); b—Mountains and Quaternary separated by Mesozoic and Cenozoic layers (east part of northern food of Kunlun Mt.); c—Mesozoic and Cenozoic uprising in front of rocky mountains (middle part of southern and northern food of Tian Mt.); d—Hidden uprising in front of piedmont plains (in front of Altai Mt.); e—Multi-row uprising in front of mountains (west part of northern food of Kunlun Mt.); f—From southern basin to northern basin (Hexi Corridor)

于 $1000 \text{ m}^3/\text{d}$; 地下水水质类型由山前的重碳酸型淡水渐变为氯化物型咸水(或卤水)(丁宏伟,2004)。

2.2.3 沙漠区地下水循环

对于沙漠区的地下水循环,目前研究的还不多。地下水的主要补给源为大气降水、平原区的侧向补给以及凝结水补给。2019年以来,中国地质调查局在塔里木盆地利用5000多个水井的水位测量资料,完成了地下水等水位线图(图5)。从图中可以看出,地下水在平原区侧向径流的驱动下,向台特玛湖和罗布泊方向运移,并通过蒸散发的形式排泄。在塔克拉玛干沙漠区,地下水水质一般较差,

淡水较少,具有明显的水平和垂直分带规律,呈现从山前平原向沙漠腹地水质逐渐变差,由地表向深部逐渐变好的特征(李文鹏等,1996)。根据评价,塔克拉玛干沙漠区地下水总补给量约为 $6.5 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$,主要来自地表水的渗漏补给,其他为少量的降水补给(李文鹏等,2000)。古尔班通古特沙漠水源条件较塔克拉玛干沙漠要好,在固定半固定的沙丘中蕴藏着淡水,有的与下伏冲湖积层的地下水连通(李宝兴,1982)。

近年来,在巴丹吉林沙漠开展了系统调查研究工作。依据遥感解译和地面调查结果,巴丹吉林沙

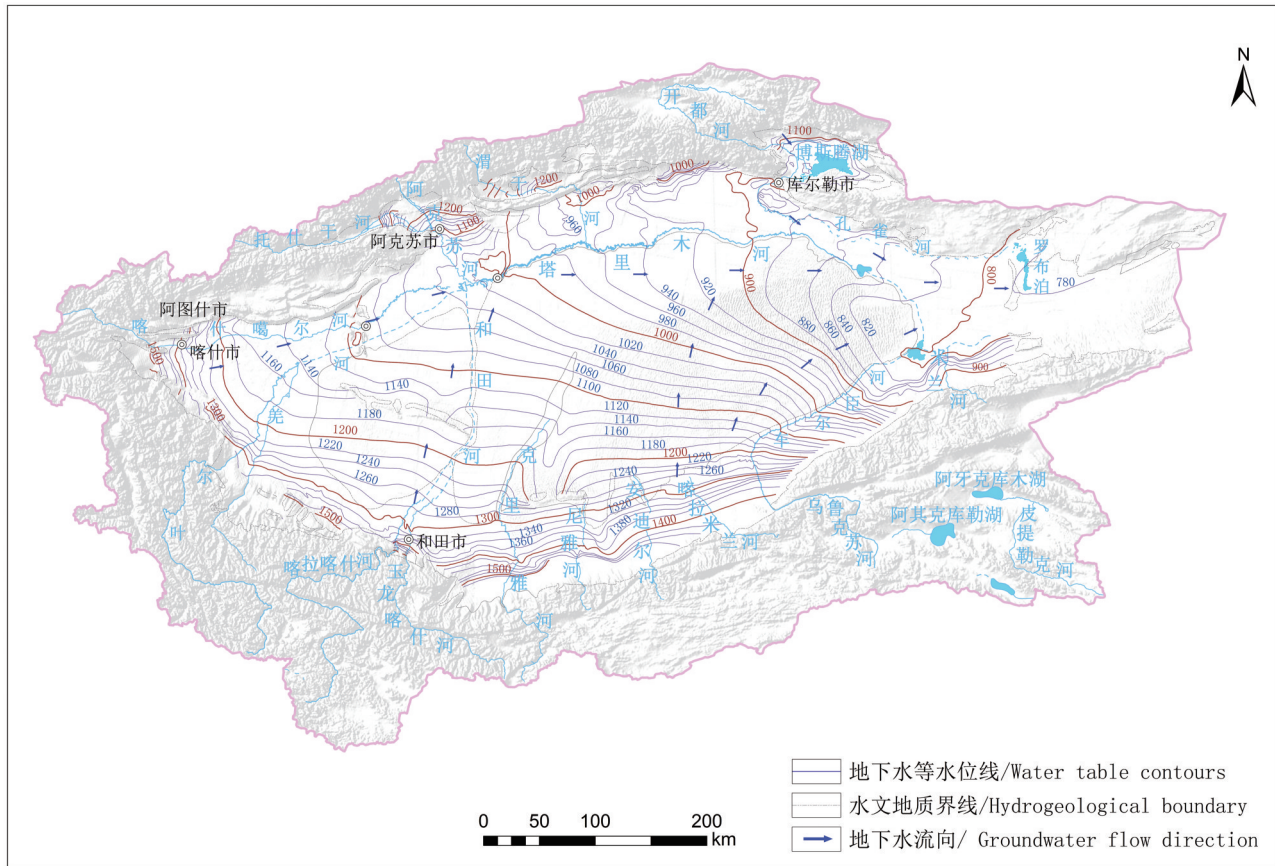


图5 塔里木盆地地下水等水位线及流向图
 Fig. 5 Water table contours and flow directions in the Tarim Basin

漠中部因基岩隆起带具有阻水性,将巴丹吉林沙漠分为南、北两大地下水系统。南部地下水系统的浅部地下水接受当地大气降水入渗和深部地下水的顶托补给,地下水由周边沙山向洼地中心的湖泊汇流;深部地下水在沙漠周边山区边缘接受出山雨洪水补给,在沙漠腹地深部地下水向上径流,以泉的形式向湖泊排泄,并最终通过湖水蒸发散失(申建梅等,2019;王旭升等,2019)。北部地下水系统年均降水量不足40 mm,降水入渗补给地下水量十分微弱,地下水可能主要来自宗乃山区的雨洪水补给,向西部沙漠边界和北部拐子湖方向径流排泄。根据最新的评价结果,巴丹吉林沙漠区地下水总补给量约为1.9亿 m³/a,主要来自外围山区、山前戈壁带季节性河道形成的脉冲式洪流补给和沙漠区降水入渗补给。

2.3 平原区地下水系统

对于西北内陆河流域平原区地下水水流系统的研究,经典著作是《中国西北典型干旱区地下水

流系统》(李文鹏等,1995)。通过分析柴达木盆地、准噶尔盆地典型流域的地下水流系统,总结出了内陆河流域具有四级地下水流系统(图6),即山前局部地下水流系统(I)、区域地下水流系统(II)、滞流地下水流系统(III)和下游易变局部地下水流系统(IV)(李文鹏等,1999)。潘世兵等(2003)从区域地下水资源量和可再生能力角度,从地下水流系统的水交替方式、循环速度、盐分运移过程以及资源可再生性等方面,将地下水流系统划分为局部地下水流系统和区域地下水流系统,又进一步划分为6个亚类。在局部水流系统上这两种划分基本上是对应的;在区域水流系统上,略有差别,潘世兵等(2003)的划分是从洪积扇前缘溢出带开始,而不是从山前倾斜平原开始。

从山前到冲洪积扇前缘溢出带为山前局部地下水流系统,由单一大厚度潜水含水层组成。该系统地下水循环积极,地下水的主体年龄为1~3 ka,处于盐分溶滤带,矿度化低,多为小于1 g/L的淡水,因

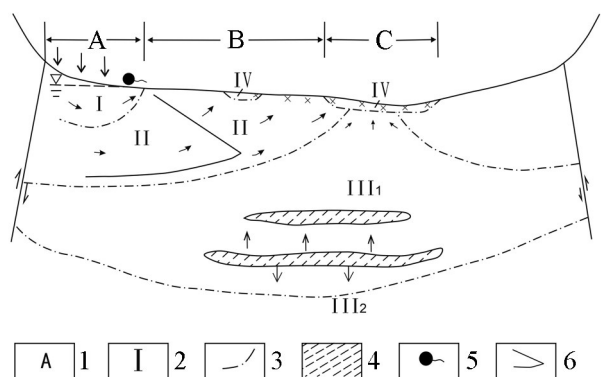


图6 西北内陆河流域地下水系统(据李文鹏等,1999)
1—盐分迁移分带;2—水流系统类型;3—水流系统界线;4—弱透水层;5—泉;6—舌状淡水水体;A—溶滤带;B—迁移带;C—聚集带

Fig. 6 Groundwater flow systems of inland river catchments in northwestern China (after Li Wenpeng et al., 1999)

1—Salt transport zones; 2— System type; 3— System boundary;
4—Aquitard; 5— Spring; 6—Tongue-shaped freshwater bodies;
A—Dissolution zone; B—Transport zone; C—Accumulation zone

此这个系统是地下水资源最丰富的地区,且更新能力也最强。由于这个系统的主要补给源是出山河水的入渗补给,径流速度快,在较大的内陆河流域从补给到在溢出带形成泉水只需几十年的时间(李文鹏等,1999),因此在该区对水资源进行大规模开发利用会在较短时间内对泉水及其周围的生态系统造成比较严重的影响。以河西走廊的石羊河流域为例,根据地下水、地表水的开发量,以及相应的泉水流量数据,分析得出在局部地下水系统中每开发1亿 m^3 的水资源,泉水将减小0.23亿 m^3 。如果是单纯开发利用1亿 m^3 的地下水,泉水将衰减得更厉害,达0.32亿 m^3 (丁宏伟等,2002)。

从山前到尾间湖为区域地下水系统,该系统的下游为砂、泥岩互层的多层承压水系统。该系统地下水的径流交替速度十分缓慢,几乎处于停滞状态, ^{14}C 年龄一般在10~30 ka,个别可以达到50 ka,水质一般较差。从 ^{81}Kr 年龄与 ^{14}C 年龄的对比看,当 ^{14}C 年龄大于30 ka时,有可能已有一定误差(Cartwright et al., 2017),因此推断区域地下水的年龄应更老。在塔里木盆地孔雀河流域分层取样的数据也证明了这一猜测,地下水的 ^{81}Kr 年龄为182 ka,而 ^{14}C 年龄为3万多年(尹立河等,2020)。滞流地下水系统目前了解比较少,推断其水质差,几乎为咸水,属盐分聚集带(图5)。根据国内外地下水系统研究的最新进展,应加大分层取样与测

试、 ^{81}Kr 等新的测年技术应用,深化对深层地下水循环规律的认识。

对于地下水系统,还有两个没有完全解决的问题。一是各个水流系统的界线在平面上已比较明确(图5),但在垂向上,还不十分明确。以按能否检测出氡为标准,对于大型河流,推断山前局部地下水系统的下边界在水面以下300 m;对于小型河流,估计在几十米到百米之间,这与利用数值模拟技术发现的河西走廊局部水流系统的底界在水面100~150 m之下基本一致(潘世兵等,2002)。对于区域水流系统,滞流地下水系统的底界,认识就更有限了(李文鹏,1995;李文鹏等,1999;潘世兵等,2002)。随着分层取样技术的发展,通过分层测定水位和采集水化学、同位素样品,有望获得突破性认识。二是从水流系统角度解释下游地区地下水具有上咸下淡的成因,也有两种解释,一种是认为区域地下水系统循环途径远,受上游水压力传递作用,使得咸淡水界面在下游推移距离更远,形成了下游区地下水具有上咸下淡的现象;另一种解释是地下水不断将下部土层中的盐分溶解带到地表,使下部地层可溶盐分少,从而形成上咸下淡的分布规律。

3 地下水资源评价与潜力分析

3.1 资源评价

3.1.1 评价单元划分与评价方法

地下水资源量计算以地下水资源区为计算单元,其划分主要是依据地下水的补、径、排条件。考虑到地下水与地表水不可分割的关系和便于计算总水资源量,一般按流域或是水文地质单元划分地下水资源区。前人一般将西北内陆河流域划分为四个一级地下水资源区,即塔里木盆地、准噶尔盆地、河西走廊和柴达木盆地,在此基础上又划分若干二级分区(张宗祜等,2004)。

由于山丘区和平原区的补给、径流、排泄和储存条件不同,评价方法也不同。在评价工作中,一般将大、中型盆地的平原部分作为平原区,而将山间小盆地、山间河谷平原按山丘区考虑。山丘区地下水资源主要源于大气降水和冰雪融水补给,一般采用排泄量法计算(刘花台等,1999),排泄量包括天然河川基流量、山前潜水侧向流出量、山前泉水

流量等。其中天然河川基流量采用基流分割或基流系数计算,山前潜水侧向流出量、山前泉水流量根据实测数据计算。在工作程度低的地区,如青海、甘肃等地,采用补给量法或径流模数法计算山丘区地下水资源量。径流模数的取得,可采用补给量法,也可采用排泄量法。

平原区一般采用补给量法计算,同时计算排泄量,用水均衡方法进行校验。平原区的补给主要包括降水入渗、山前侧向补给、地表水渗漏补给(包括河道、渠系、坑塘)、田间入渗等。其中降水入渗补给、地表水渗漏补给、田间入渗均利用入渗系数求得,山前侧向补给采用山丘区计算结果。在山区和平原区地下水资源计算中,有一部分资源量是重复的。一是两者都包括了山前侧向径流量和河谷潜流量;二是山区流入平原的河水中含一定比例的基流量,其中部分基流又在平原区转化为地下水,也属于重复量。在分别计算山区和平原区的地下水资源量后,在扣除重复量,即可得到一个流域的地下水资源量。

3.1.2 评价结果

本次主要是根据第一次、第二次和部分第三次全国地下水资源评价的结果进行分析。第一次地下水资源评价的成果主要反映在1987年出版的《中国水资源评价》(水力电子部水文局,1987),第二次地下水资源评价出版了系列专著,包括全国综合卷和分省卷(张宗祜等,2004)。此外,相关各省区以及科技攻关项目也开展了地下水资源评价工作,据不完全统计,包括整个或是部分西北内陆河流域的地下水资源评价成果还有:“九五”国家重点科技攻关项目成果报告《西北内陆盆地地下水可利用量及其分布研究》(朱延华,2001)、《中国西北地区地下水资源》(赵运昌,2002)、《中国西部地区水资源开发利用》(张宗祜等,2002)。根据这些评价成果,前人发表了数十篇的学术论文(李宝兴,1982;徐兆

祥,1992;刘花台等,1999;朱延华,2001;胡汝骥等,2002;丁宏伟,2004;荆继红等,2007;陈德华,2009;张鸿义,2009),总体上对水量的评价居多,对水质的评价相对较少。以第二次地下水资源评价的结果为基础,汇总了各主要盆地的地下水资源量(表1)。据第二次地下水资源评价结果,西北内陆河流域地下水资源量为774亿 m^3/a ,其中塔里木盆地和准噶尔盆地的地下水资源量最大,约为300亿 m^3/a ,其次为河西走廊为84亿 m^3/a ,柴达木盆地最小为61亿 m^3/a 。

通过梳理地下水资源评价结果(表1),发现第二次评价的地下水资源量比第一次明显增高,从656亿 m^3/a 增加到774亿 m^3/a ,平均增幅为18%。从各主要流域看,增幅介于8%~100%,其中增幅最大的是河西走廊地区,地下水资源量变化的原因主要是与地表水的开发利用有关。因为地表水是地下水的重要补给来源,地表水转化量占到平原区地下水补给量的60%~88%(荆继红,2007)。第二次地下水资源评价结果也表明,由地表水转化的地下水补给在几个大型盆地中都占到了70%以上,特别是河流入渗量和渠道入渗量是最重要的补给项(表2)。在这期间耕地面积持续扩大,根据遥感解译结果,河西走廊的石羊河流域耕地面积增加了近10万 hm^2 (聂振龙,2019),新疆地区的耕地面积增加了约32万 hm^2 (赵晓丽等,2014)。当时渠道防渗差、大水漫灌现象普遍,随着耕地的增加渠道入渗量和田间入渗量明显增加,是造成地下水资源量增加的主要原因。但在此期间,虽然地下水资源量总体增加,但在流域下游平原(包括下游北盆地)地下水资源也有减小的情况发生,主要是由下游地下水开采量增多和上游来水减小造成的(刘花台等,1999)。比如2000年前后的评价结果,与20世纪70年代末相比,由于上游引水量增大,变化最明显的就是石羊河下游、黑河下游和塔里木河下游地区,地下水补给量

表1 西北内陆河流域第一次和第二次地下水资源评价结果

Table 1 Results of first and second groundwater resources assessments for the inland river catchments in northwestern China

地区	山区补给资源量/($10^8 m^3/a$)		平原区补给资源量/($10^8 m^3/a$)		总资源量/($10^8 m^3/a$)	
	第一次	第二次	第一次	第二次	第一次	第二次
塔里木盆地	370.9	195.5	221.8	227.3	579.5	333.4
准噶尔盆地		213.9	130.7	158.0		296.2
河西走廊	14.2	27.5	45.66	56.7	41.8	83.7
柴达木盆地	/	49.8	35.1	44.9	35.0	61.0

表2 西北内陆河流域第二次地下水资源评价中平原区地下水分项补给量

Table 2 Components of groundwater recharge in plains from the second groundwater resources assessment of inland river catchments in northwestern China

地区	地下水补给/(10 ⁸ m ³ /a)							地表水 转化比例
	降水	河流	渠道	田间	库塘	洪流	山前侧渗	
塔里木盆地	5.5	68.3	80.2	18.9	6.4	8.7	39.2	80%
准噶尔盆地	11.4	62.6	32.7	9.0	4.4	4.2	33.8	71%
河西走廊	5.5	21.0	9.7	6.8	/	4.6	5.9	79%

减少52%~69%。

目前,从水利部组织的第三轮地下水资源评价的结果看,渠道渗漏量有明显的减小趋势,主要原因是随着渠道衬砌水平不断提高,水资源有效利用系数也在不断提高,目前西北内陆河流域的平均水资源利用系数与全国平均相当。准噶尔盆地玛纳斯流域的研究结果表明,渠道利用系数每提高一个百分点,地下水资源减少800万m³/a(刘花台等,1999)。与第二次地下水资源评价相比,新疆渠道渗漏量减少了20多亿m³/a。同时,受全球气候变化的影响,降水增多,河川径流量增大,相应的降水入渗、河流入渗补给量也有增多的趋势。

应该指出的是,在地下水资源评价中,各个参数取值受主客观因素的影响,都有较大的不确定性,因此评价结果也具有一定的不确定性(邵新民,2002)。地下水资源评价所需参数可分为两大类,一类是与源汇项有关的参数,一类是与含水层有关的参数,获取这些参数的手段主要是野外试验和室内外原位试验。均衡试验是获取源汇项参数(如降水入渗系数、田间入渗系数、蒸散发系数等)的重要途径,但试验条件难以完全与野外复杂的地质条件一致。含水层参数是客观的,但受抽水条件、成井条件的不同,其计算结果可以产生数倍的差异。

从水质角度讲,小于2 g/L、且积极参与现代水循环、可更新的潜层地下水(包括潜水和浅层承压水)是评价的重点,也有学者对2~5 g/L的微咸水和大于5 g/L的咸水进行了评价,因为这些水对西北地区也具有一定的用途(刘花台等,1999;张宗祜等,2004)。主要流域的地下水水质表明,I~III类水质点占比18%,IV类水质点占比59%,V类水质点占比23%(图7)。水质差主要是由蒸散发能力强的天然原因造成的,人类活动造成的污染主要发生在城镇附近。

人类开发利用水资源,也会对地下水水质产生

正、负两方面的影响。正面影响就是由于人类开采,地下水位下降,蒸发减弱,天然条件下的盐渍化区潜水水质向着好的方向发展,这在塔里木盆地孔雀河流域的溢出带上表现明显(张俊等,2021)。不利的影晌体现在两个地区,一是在原生环境下非盐渍化区,地下水的强烈开采,会导致常量组分升高,矿化度增大,污染组分和污染程度增加(刘君等,2017);二是在流域的中下游地区,随着地下水的持续开发利用,泉水流量减小,泉水进入河流的量也随之减小,在强烈的蒸发浓缩作用下,浅层地下水的水质趋于恶化,如河西走廊的民勤盆地浅层地下水的矿化度由20世纪50—60年代的2 g/L上升到90年代的4~6 g/L(丁宏伟等,2002)。

3.2 开采潜力分析

在西北内陆河流域,地下水的可采资源量主要集中在盆地平原区,一般采用地下水可采系数法计算(王贵玲等,2003;陈德华等,2009)。据2019年全国和甘肃、青海水资源公报,西北内陆河流域地下水开采量128.1亿m³,其中塔里木盆地和准噶尔盆地共计106.4亿m³,河西走廊19.9亿m³,柴达木盆地1.8亿m³。与第二次地下水评价时期相比,增加了近54亿m³的开采量。地下水的开采主要是用于农业,占到总开采量的80%以上,其次为工业和生活用水。地下水是生活用水的主要来源,如在新疆生活用水量为4.71亿m³,占总生活供水量的43.8%;在河西走廊地区生活用水量为1.06亿m³,占总生活供水量的88.3%。历次地下水资源评价计算的可开采量、实际开采量以及开采潜力见表3。

对地下水开采潜力的评价,一般采用开采程度的概念,以采补平衡为基础,即开采程度=100%×开采量/可开采资源量。开采程度大于100%的地区定义为超采区,80%~100%为平衡区,小于50%为具有潜力区(孙培善等,1998;陈德华等,2009)。从目前的实践情况看,划分标准不尽合理,原因有两方面,

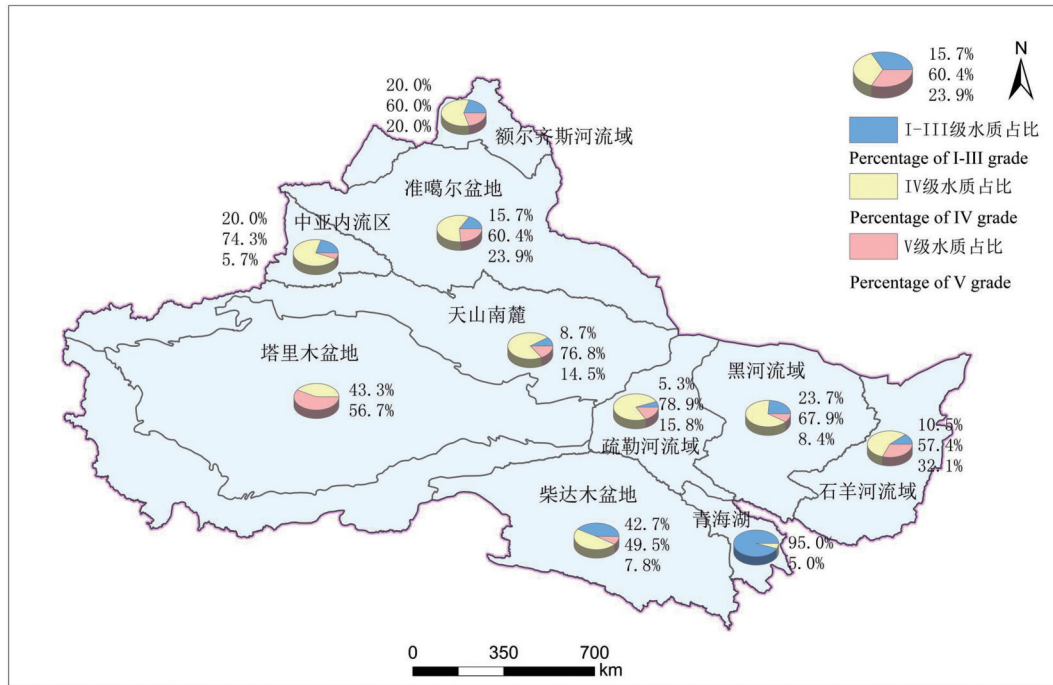


图7 西北内陆河流域地下水水质图

Fig.7 Groundwater quality of inland river catchments in northwestern China

一是地下水可开采资源的确定具有不确定性,它涉及国民经济建设需求与地质生态环境保护等众多因素,尚无统一的计算方法,是随着社会发展不断变化的概念(高京印,1996),目前地下水开采资源量评价总体偏大(雷志栋等,2006)。二是地下水开采量统计偏小,有的学者认为有些地区有可能偏小30%~50%。因此,两方面的因素导致开采程度的计算值比实际情况小,造成一种潜力还比较大的错误概念。早在20世纪80—90年代,有学者就认为西北地区的河西走廊、准噶尔盆地南部、塔里木盆地的部分地区,已出现了地下水开发引起的生态环境问题(李宝兴,1982;徐兆祥,1992)。前人利用模型或是同位素方法,对西北内陆典型流域进行了评价,发现大部分地区已处于不可持续的状态(王

思佳等,2019)。国外学者估算了全球主要含水层储量的消耗程度和恢复能力,认为美国加利福尼亚州中央谷地和中国塔里木盆地的地下水消耗最严重,恢复能力最弱(Richey et al., 2015)。利用2019年、2020年的地下水统测成果,结合历史上地下水的等水位线,在西北内陆河流域圈定出了21个地下水漏斗区(表4),面积约3.03万km²(图8),也证实了部分地区的地下水已处于过量开采状态。

对于水资源而言,内陆干旱区水资源配置的总体框架是生态环境用水不能低于总资源量的50%,也就是人类的用水不能超过50%(钱正英等,2004)。但对于地下水的开发利用程度上限,尚无定量的结论。以塔里木盆地叶尔羌绿洲灌区为例,山区来水量70多亿m³,地下水补给量40多亿m³,可

表3 西北内陆河流域地下水资源开采潜力分析

Table 3 Groundwater potential of inland river catchments in northwestern China

地区	第一次地下水评价/(10 ⁶ m ³ /a)			第二次地下水评价/(10 ⁶ m ³ /a)		
	可开采量	开采量	潜力	可开采量	开采量	开采潜力
塔里木盆地	149.1	26	202.2	144.4	27.0	117.4
准噶尔盆地	79.1	/	/	90.4	24.3	66.1
河西走廊	19.0	/	/	41.1	23.6	17.5
柴达木盆地	21.1	/	/	31.0	1.4 ^[1]	29.6

注:*数据引自张宗祜和李烈荣(2005)。

表4 西北内陆河流域地下水漏斗一览

Table 4 Groundwater depression zones of inland river catchments in northwestern China

序号	流域名称	明显下降区名称	下降区面积/km ²				合计	亏损量 (亿m ³)	对比 年份
			5~10 m	10~20 m	20~30 m	30 m以上			
1		沙雅喀腊其兰地下水下降区	150.62	43.80			194.42	2.36	2000
2		沙雅红旗镇地下水下降区	16.12				16.12	0.17	2000
3		阿拉尔双城镇地下水下降区	256.49	83.08			339.57	6.13	2000
4	塔里木盆地	伽师北部地下水下降区	378.90				378.90	5.88	2000
5		墨玉地下水下降区	8.13				8.13	0.13	2000
6		焉耆盆地下降区	1520.10	3133.51			4653.61	120.87	1961
7		孔雀河流域下降区	327.21	921.44	560.94	705.35	2514.95	121.12	1971
8		玛纳斯一呼图壁下降区	1769.39	2239.42	1390.74	518.94	5918.50	143.46	2008
9		沙湾下降区	169.44	73.68	17.73		260.86	3.80	2008
10	准噶尔盆地	乌苏下降区	1859.56	1424.87			3284.43	45.13	2008
11		东三县下降区	1729.82	2533.24	1034.31	396.49	5693.87	130.86	2008
12		柴窝堡下降区	164.17	262.09	24.12	0.62	451.00	7.55	2008
13		乐土驿下降区	143.84	36.76			180.59	2.17	2008
14		甘州区党寨一石岗墩下降区	185	313			498	9.12	1999
15		高台县骆驼城一南华下降区	328				328	2.46	1999
16	河西走廊 黑河流域	肃州区铨间镇一下河清下降区	220	150			370	3.90	1999
17		金塔县中东镇一大庄子下降区	293	194			487	5.11	1999
18		金塔县生地湾农场下降区	250				250.00	1.88	1999
19	河西走廊 石羊河流域	金昌下降区	120	396	381	207	1104	35.44	1999
20		民勤下降区	1260	413			1673	18.74	1999
21		武威下降区	778	528	253	129	1688	57.02	1999
		总计	11927.8	12745.9	3661.8	1957.4	30292.9	723.3	

开采量27亿m³,但开采量达到6亿m³时(天然补给量的15%左右),10年间地下水平均下降0.54 m,表明开采量已偏大(雷志栋等,2006)。建议利用开采量与总补给量的比值确定开采潜力,对于西北内陆河流域,地下水资源利用量应小于总补给总量的25%。以此为标准,除柴达木盆地、塔里木盆地南缘部分地区、伊犁地区和阿勒泰地区外,其他地区已无进一步开发潜力。

4 建议

在西北内陆河流域,河流-含水层系统具有密切的水力联系,开发利用所引起的水资源重分配比一般地区更为强烈,并且开发利用的规模越大,水资源重分配涉及的地区越广,延续的时间越长,生态负效应显现的滞后时间也越长。因此,今后西北内陆河流域需进一步降低水资源的利用量,“开源”与“节流”并重,通过提高水资源的利用效率来提高其承载能力。同时充分利用气候变化带来的水量

增加,让河流恢复其盐分输送与河岸林涵养的功能,并加强地下水的生态功能与生态需水量的研究,支撑服务生态保护修复。

4.1 开源与节流并举

4.1.1 加强新疆地区水资源“开源”技术研究

加强地下(微)咸水的资源化利用。西北内陆河流域受气候干旱的影响,存在大面积的地下(微)咸水。以南疆地区为例,中盐度地下水(矿化度2~7 g/L,能直接或间接用于农业灌溉的地下水)分布面积为9.2万km²,占塔里木盆地平原区总面积的30.6%,总补给资源量11.16亿m³/a。下一步应加强咸淡水时空分布规律及其成因机理等方面的调查研究,开展水资源分质调查和评价,加强咸水的资源化利用。

4.1.2 加强储水构造及地下水库关键技术研究

受构造运动影响,西北内陆盆地表现出盆山相间的构造特征。典型的储水构造有四大类,包括盆地储水构造、山间断陷盆地储水构造、山前向斜

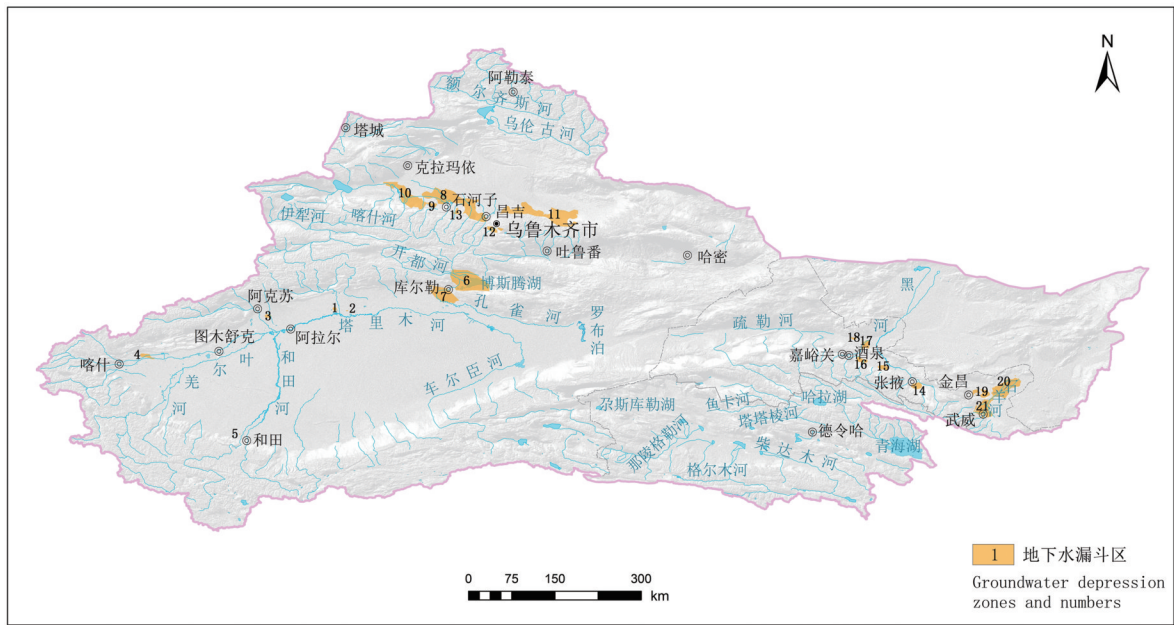


图8 西北内陆河流域地下水漏斗区分布图

Fig.8 Groundwater depression zones of inland river catchments in northwestern China

凹陷储水构造和山前凹陷带储水构造(李文鹏等, 1996; 邓铭江等, 2014)。受新生代以来沉降作用影响, 盆地内广泛堆积了新生代沉积物, 厚度可达上千千米。在山体隆起及褶皱运动的影响下, 前山地带还分布有许多由向斜构造形成的凹陷洼地, 而且山前冲洪积扇底部大都都有一个山前凹陷带。因此, 盆地—山间断陷盆地—山前向斜凹陷—山前凹陷带的盆山构造格局构成了巨大的地下储水构造。同时, 盆地周边山区降水量大, 高山冰川和冰雪融水丰富, 为地下储水构造提供了大量的地下水补给来源, 为地下水库的建设提供了良好的自然条件。地下水库既有积极参与循环的地下水资源可供长期平衡开采, 又有巨大的储存空间可供多年调节。虽然建设和利用地下水库并不增加水资源总量, 但可极大地拓展地下水与地表水联合调度的时间和空间尺度, 有效提升水资源调蓄能力。

4.2 地下水的生态功能与生态需水量评价

在干旱区忽视水资源与生态环境系统之间的关系, 挤占生态用水, 直接导致了生态环境的恶化, 并严重威胁人类的生存环境(雷志栋等, 2006, 王文科等, 2011)。生态环境维持在西北干旱区尤为重要, 而地下水是河流、湖泊、湿地和荒漠植被生态系统维持和可持续发展的关键因子, 有水即为绿洲, 无水即为荒漠。前人对西北内陆盆地的地下水生

态水位进行了总结, 如黑河流域、塔里木盆地和柴达木盆地等(郭占荣等, 2005; 王文科等, 2011), 认为地下水位在干旱地区控制在3~6 m, 但对地下水的生态功能、生态需水量等尚没有开展系统的评价。特别是生态需水量的研究不足影响了水资源的合理配置方案的制定, 目前河道内生态需水量已有比较完善的计算方法, 如水文学法、水力学法、栖息地评价法等(林炜等, 2018), 但对于确定陆生植被的生态需水量还存在较大不确定性。

5 结论

(1) 西北内陆河流域的地下水与地表水频繁转化, 含水层—河流系统具有密切的水力联系, 因此不论是上游开发地表水还是地下水, 都会引起整个流域内地下水资源的强烈变化。

(2) 地下水水流系统研究表明, 局部地下水流系统中地下水水质好, 循环交替积极, 是地下水开采的最有利地段; 而区域和滞流地下水流系统水质一般较差, 可更新能力差, 应限制其开发利用。

(3) 西北内陆河流域地下水资源量为774亿 m^3/a , 其中平原区的地下水资源量为487亿 m^3/a , 山区与平原区的地下水资源重复量为199亿 m^3/a ; 地下水现状开采量约为128亿 m^3/a 。

(4) 西北内陆河流域地下水开发利用程度相对

较高,除柴达木盆地和塔里木盆地南缘的部分地区外,其他地区已基本无开发潜力,今后应通过提高水资源的利用效率来提高水资源的承载能力。

References

- Cartwright I, Cendón D, Currell M, Meredith K. 2017. A review of radioactive isotopes and other residence time tracers in understanding groundwater recharge: Possibilities, challenges, and limitations [J]. *Journal of Hydrology*, 555, 797–811.
- Chen Dehua, Chen Hao, Zhang Wei. 2009. Potential evaluation of groundwater in the major plain of North China[J]. *Ground Water*, 31(2): 1–4(in Chinese with English abstract).
- Chen Dehua, Wang Guiling, Chen Xi, Chen Hao, Zhang Wei. 2009. Strategic analysis of groundwater resources sustainable use in northwest inland basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 7(3):71–73(in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang. 1959. Patterns of hydrogeochemistry in Turpan basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, (6):185–192(in Chinese).
- Deng Mingjiang, Li Wenpeng, Li Tao, Shu Longcang. 2014. Investigation of key technologies for underground water storage structures and groundwater reservoirs in Xinjiang[J]. *Quaternary Sciences*, 34(5): 918–932((in Chinese with English abstract).
- Ding Hongwei, Zhang Hesheng. 2002. Changes of groundwater resources in recent 50 years and their impact on ecological environment in Hexi Corridor[J]. *Journal of Natural Resources*, 17(6): 691–697(in Chinese with English abstract).
- Ding Hongwei. 2004. Inland basins in arid region of northwest China: Groundwater resources and direction of survey[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 21(5): 1–6(in Chinese with English abstract).
- Duan Yonghou, Zhao Xuedun. 1964. Hydrological and geochemical characteristics of Junggar artesian basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 44(1): 102–118(in Chinese).
- Fan Wei, Zhou Jinlong, Ceng Yanyan, Zhou Yinzhu, Chen Yunfei, Li Ling, Hou Jun. 2019. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater along the Tarim desert highway[J]. *South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology*, 17(2): 157–165 (in Chinese with English abstract).
- Fan Xipeng. 1991. Regional hydrological effects and environmental impacts caused by water resources exploitation in the Northwest inland plain[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 46(4): 415–426 (in Chinese).
- Gao Jingyin. 1996. A preliminary discussion on the subregional evaluation of minable groundwater resource in the arid inland basin plain of Northwest area[J]. *Acta Geologica Gansu*, 5(2): 87–91(in Chinese with English abstract).
- Guo Jiangyong, Li Yaohui. 2006. Climatic characteristics of summer precipitation in northwestern China[J]. *Arid Zone Research*, 23(3): 489–494(in Chinese with English abstract).
- Guo Zhanrong, Liu Huatai. 2005. Eco-depth of groundwater table for natural vegetation in Inland Basin, Northwestern China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 19(3): 157–161(in Chinese with English abstract).
- Hao Shaomin. 2002. Summary on the problem of groundwater resource assessment and development in inland arid basin, Northwest China[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 29(3):20–20(in Chinese with English abstract).
- Hu Ruji, Fan Zili, Wang Yajun, Jiang Fengqing. 2002. Groundwater resources and their characteristics in arid lands of Northwestern China[J]. *Journal of Natural Resources*, 17(3): 321–326(in Chinese with English abstract).
- Hydrological Bureau of Ministry of Water Resources and Electric Power. 1987. *Water Resources Assessment in China*[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press(in Chinese).
- Jing Jihong, Sun Jichao, Han Shuangping, Wang Shan. 2007. Distribution of groundwater resources and the state of development and utilization in the northwestern area[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 5(5): 54–56(in Chinese).
- Lei Zhidong, Ni Guangheng, Cong Zhentao, Yang Shixiu. 2006. On some hot spots of water resources sustainable utilization of oasis within arid zone[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 37(2):31–33(in Chinese with English abstract).
- Li Baoxing. 1982. Rational utilization and development of ground water in arid zone of the Northwestern China[J]. *Journal of Desert Research*, 2(1): 5–16(in Chinese).
- Li Wenpeng, Hao Aibing, Li Peng, Fan Yitian. 1996. Some understandings on groundwater resources in arid area of China[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 23(5):14–15(in Chinese).
- Li Wenpeng, Hao Aibing. 1999. The formation and evolution model of groundwater and its significance in inland arid basin, Northwest China[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 26(4): 28–32 (in Chinese).
- Li Wenpeng, Zhou Hongchun, Zhou Yangxiao, Jiao Peixin, Hao Aibing. 1995. *Groundwater Flow System in Typical Arid Area of Northwest China*[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- Li Wenpeng. 1991. Origin of deep fresh groundwater and shallow saline groundwater in the Minqin basin, Gansu Province[J]. *Geological Review*, 37(6):546–554(in Chinese with English abstract).
- Li Wenpeng. 1999. Development and utilization of water resources and sustainable development of society in arid area of Northwest China[J]. *Resources and Industries*, 1(9): 41–44(in Chinese).
- Li Wenpeng, Hao Aibing, Liu Zhengying, Wan Li. 2000. *Potential Areas of Groundwater Exploitation in the Tarim Basin*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Li Yamin, Hao Aibing, Luo Yuechu, Li Wenpeng. 2009. Issues and approaches to groundwater resources development in inland basins

- in Northwest China[J]. Resources and Industries, 11(6): 48–54(in Chinese with English abstract).
- Lin Wei, Chu Li. 2018. Research on river ecological water demand[J]. Shaanxi Architecture, 44(14): 211–212(in Chinese with English abstract).
- Liu Huatai, Guo Zhanrong, Dong Hua, Zhang Zhaoji, Zhu Yanhua. 1999. Groundwater resource quantity and its change trend analysis in Northwest area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 26(6): 35–39(in Chinese).
- Liu Jun, Chen Zongyu, Wang Ying, Wei Wen, Chen Jiang. 2017. Evaluation of hydrochemical characteristics of regional groundwater systems in Northern china under the conditions of large-scale exploitation[J]. Earth and Environment, 45(4): 408–414(in Chinese with English abstract).
- Liu Weicheng, Zhang Qiang, Fu Chao. 2017. Variation characteristics of precipitation and its affecting factors in Northwest China over the past 55 years[J]. Plateau Meteorology, 36(6): 1533–1545(in Chinese with English abstract).
- Nie Zhenlong, Zhang Guanghui, Shen Jianmei, Yan Mingjiang, Wang Jinzhe. 2012. 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, 26(1):63–66(in Chinese with English abstract).
- Nie Zhenlong. 2019. Annual Hydrogeological Survey Report of Shiyang River Basin in Hexi Corridor[R]. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- Pan Shibing, Wang Zhongjing, Cao Liping. 2003. Groundwater circulation and evolution model and its sustainable utilization in inland basins of northwest of China[J]. Geography and Territorial Research, 19(1):321–326(in Chinese with English abstract).
- Pan Shibing, Wang Zhongjing, Tian Wei. 2002. Discussions on numerical modeling methods of groundwater system in Hexi Corridor[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 29(5): 59–61 (in Chinese with English abstract).
- Qian Zhengying, ShenGuofang, Pan Jiazheng. 2004. Strategic Study on Allocation of Water Resources, Conservation and Upgrading of Eco-Environment and Sustainable Development in North-West China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Qu Huanlin. 1991. Evaluation of Groundwater Resources in Arid and Semiarid Areas of China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Qu Wei. 2005. Study on Available Water Resources in Arid Inland Region of Northwest[D]. Nanjing: Hohai University(in Chinese with English abstract).
- Richey A S, Thomas B F, Lo M H, Famiglietti J S, Swenson S, Rodell M. 2015. Uncertainty in global groundwater storage estimates in a total groundwater stress framework[J]. Water Resource Research, 51(7): 5198–5216.
- Richey A S, Thomas B F, Lo M H, Reager J T, Famiglietti J S, Voss K, Swenson S, Rodell M. 2015. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE[J]. Water Resources Research, 51(7): 5217–5238.
- Shen Jianmei, Nie Zhenlong, Wang Zhe. 2019. Report on the Results of 1:250 000 Hydrogeological Survey in The Badain Jaran Desert and its Surrounding Areas[R]. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese).
- Sun Fangqiang, Yin Lihe, Jia Wuhui, Zhang Jun, Wang Xiaoyong, Zhu Lifeng, Zhang Xinxin, Tang Xiaoping, Dong Jiaqiu. 2020. Soil water movement and deep drainage through thick vadose zones on the northern slope of the Tianshan Mountain: Croplands vs. natural lands[J]. China Geology, 3:113–123.
- Sun Peishan, Li Jihong, Qin Yisu. 1998. The general situation of groundwater resources and the suggestion of rational exploitation and utilization in Northwest China[J]. Developing, (10):10–11(in Chinese).
- Wang Deqian, Liu Zuzhi, Liu Fang, Dong Tianyin, Li Yichao, Xu Chaomei. 2000. Features and sustainable utilization of water resource in the Northwest China[J]. Quaternary Sciences, 20(6): 493–503(in Chinese with English abstract).
- Wang Deqian, Liu Zuzhi. 2002. Discussion of several problems of water resources in the Northwest China[J]. Northwestern Geology, 35(3):1–6(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Liu Zhiming, Liu Huatai, Zhang Junpai, Gao Yexin, Lin Wenjing. 2003. Assessment method of groundwater exploitation potential[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 30(1): 63–66,72(in Chinese with English abstract).
- Wang Guoya, Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Jin, Mao Weiyi, Gao Qianzhao, Wang Shunde. 2008. Runoff changes in Aksu river basin during 1956–2006 and their impacts on water availability for Tarimriver[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 30(4): 562–568(in Chinese with English abstract).
- Wang Sijia, Liu Hu, Zhao Wenzhi, Li Zhongkai. 2019. Groundwater sustainability in arid and semi-arid environments: A review[J]. Advances in Earth Science, 34(2): 210–223(in Chinese with English abstract).
- Wang Wenke, Yang Zeyuan, Cheng Donghui, Wang Wenming, Yang Hongbin. 2011. Methods of ecology-oriented groundwater resource assessment in arid and semi-arid area[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 41(1): 159–167(in Chinese with English abstract).
- Wang Xusheng, Hu Xiaonong, Jin Xiaomei, Hou Lizhu, Qian Rongyi. 2019. Hydrogeological Conditions and Groundwater Circulation Model of Badain Jaran Desert[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Wang Zongtai, Liu Chaohai. 2001. Geographical characteristics of the distribution of glaciers in China[J]. Journal of Glaciology and

- Geocryology, 23(3): 231–237(in Chinese with English abstract).
- Xu Hengli, Zhou Aiguo, Xiao Guoqiang, Zhi Bingfa, Ye Hanchun. 2000. Arid trend and eco– environmental effect of water– salt imbalance in northwest China[J]. Earth Science– Journal of China University of Geosciences, 29(5): 59–61(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhaoxiang. 1992. Groundwater exploitation and ecological environment problems in arid inland basin of northwest China[J]. Gansu Environmental Study and Monitoring, 5(4): 19– 23(in Chinese).
- Yan Xiyu, Duan Yonghou, Jia Yongrui. 1973. Hydrogeological characteristics of the arid regions in northwest China and Inner Mongolia[J]. Acta Geological Sinica, 1(1): 102–112(in Chinese).
- Yang Zhenniang. 1981. Mountain streamtypes in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 3(2): 14–31(in Chinese).
- Yao Junqiang, Yang Qing, Liu Zhihui, Li Chengzhi. 2015. Spatio– temporal change of precipitation in arid region of the Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 35(17): 5846– 5855(in Chinese with English abstract).
- Yin Lihe, Gu Xiaofan, Zhang Jun. 2020. Annual Hydrogeological Survey Report of Kaidu River – Kongke River Basin, Tarim Basin[R]. Xi 'an Geological Survey Center of China Geological Survey(in Chinese).
- Zhang Hongyi, Zeng Fanhong, An Haitang. 2011. Formation, distribution and transport of shallow groundwater in arid areas, China[J]. Arid Zone Research, 28(1): 67– 73(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongyi. 2009. Groundwater resources and their exploitation potential in arid areas in China[J]. Arid Zone Research, 26(2):149– 161(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jun, Yin Lihe, Gu Xiaofan, Li Ying, Yang Bingchao, Jiang Jun, Jia Wuhui, Xie Wanbing, Wang Tuo, Tang Xiaoping, Dong Jiaqiu, Wang Qian, Chang Liang. 2021. Study on the relationship between groundwater and surface water in Xinjiang Kongque river basin using isotopes and hydrochemistry method[J]. Northwestern Geology, 54(1): 185–195(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zonghu, Li Lierong. 2004. Groundwater Resources in China (Xinjiang Volume)[M]. Beijing: Sinomaps Press(in Chinese).
- Zhang Zonghu, Lu Yaoru. 2002. Development and Utilization of Water Resources in Western China[M]. Beijing: China Water and Power Press(in Chinese).
- Zhao Xiaoli, Zhang Zengxiang, Wang Xiao, Zuo Lijun, Liu Bin, Yi Ling, Xu Jinyong, Wen Qingke. 2014. Analysis of Chinese cultivated land's spatial– temporal changes and causes in recent 30 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 30(3):1–11(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yunchang. 2002. Groundwater Resources in Northwest China[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- Zhu Yanhua. 2001. Study on groundwater availability and distribution in northwest inland basin[C]//Compilation of Scientific and Technological Achievements in the Ninth Five– Year Plan of Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈德华, 陈浩, 张薇. 2009. 我国北方主要平原地下水潜力评价[J]. 地下水, 31(2): 1–4.
- 陈德华, 王贵玲, 陈玺, 陈浩, 张薇. 2009. 西北内陆盆地地下水资源可持续利用战略分析[J]. 南水北调与水利科技, 7(3):71–73.
- 陈墨香. 1959. 吐鲁番盆地水文地球化学的规律[J]. 地质科学, (6): 185–192.
- 邓铭江, 李文鹏, 李涛, 束龙仓. 2014. 新疆地下储水构造及地下水库关键技术研究[J]. 第四纪研究, 34(5): 918–932.
- 丁宏伟, 张荷生. 2002. 近 50 年来河西走廊地下水资源变化及对生态环境的影响[J]. 自然资源学报, 17(6): 691–697.
- 丁宏伟. 2004. 西北干旱区内陆盆地地下水资源及其勘查方向[J]. 国土资源科技管理, 21(5): 1–6.
- 段永侯, 赵学悫. 1964. 准噶尔自流盆地的水文地质特征[J]. 地质学报, 44(1): 102–118.
- 范薇, 周金龙, 曾妍妍, 周殷竹, 陈云飞, 李玲, 侯珺. 2019. 塔里木沙漠公路沿线浅层地下水化学特征[J]. 南水北调与水利科技, 17(2): 157–165.
- 范锡朋. 1991. 西北内陆平原水资源开发引起的区域水文效应及其对环境的影响[J]. 地理学报, 46(4): 415–426.
- 高京印. 1996. 西北内陆盆地平原地下水开采资源分区评价初探[J]. 甘肃地质学报, 5(2): 87–91.
- 郭江勇, 李耀辉. 2006. 中国西北地区夏季降水的气候特征[J]. 干旱区研究, 23(3): 489–494.
- 郭占荣, 刘花台. 2005. 西北内陆盆地天然植被的地下水生态埋深[J]. 干旱区资源与环境, 19(3): 157–161.
- 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 姜逢清. 2002. 中国西北干旱区的地下水资源及其特征[J]. 自然资源学报, 17(3): 321–326.
- 荆继红, 孙继朝, 韩双平, 汪珊. 2007. 西北地区地下水资源分布及开发利用状况[J]. 南水北调与水利科技, 5(5): 54–56.
- 雷志栋, 倪广恒, 丛振涛, 杨诗秀. 2006. 干旱区绿洲水资源可持续利用中的几个热点问题的认识[J]. 水利水电技术, 37(2): 31–33.
- 李宝兴. 1982. 我国西北干旱地区地下水资源的合理开发和利用[J]. 中国沙漠, 2(1): 5–16.
- 李文鹏, 郝爱兵, 李鹏, 范以田. 1996. 对我国干旱区地下水资源的几点认识[J]. 水文地质工程地质, 23(5): 14–15.
- 李文鹏, 郝爱兵. 1999. 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, 26(4):28–32.
- 李文鹏, 周红春, 周仰效, 焦培新, 郝爱兵. 1995. 中国西北典型干旱区地下水水流系统[M]. 北京:地震出版社.
- 李文鹏. 1991. 甘肃省民勤盆地深层淡水及表层咸水成因[J]. 地质论评, 37(6):546–554.
- 李文鹏. 1999. 西北干旱区水资源开发利用与社会可持续发展[J]. 资源·产业, 1(9): 41–44.
- 李文鹏, 郝爱兵, 刘振英, 万力. 2000. 塔里木盆地地下水开发远景区

- 研究[M].北京:地质出版社.
- 李亚民,郝爱兵,罗跃初,李文鹏.2009.西北内流盆地地下水资源为开发利用的问题及其对策研究[J].资源与产业,11(6):48-54.
- 林炜,褚丽.2018.河道内生态需水量研究[J].山西建筑,44(14):211-212.
- 刘花台,郭占荣,董华,张兆吉,朱延华.1999.西北地区地下水资源量及其变化趋势分析[J].水文地质工程地质,26(6):35-39.
- 刘君,陈宗宇,王莹,卫文,陈江.2017.大规模开采条件下我国北方区域地下水水化学变化特征[J].地球与环境,45(4):408-414.
- 刘维成,张强,傅朝.2017.近55年来中国西北地区降水变化特征及影响因素分析[J].高原气象,36(6):1533-1545.
- 聂振龙,张光辉,申建梅,严明疆,王金哲.2012.西北内流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,26(1):63-66.
- 聂振龙.2019.河西走廊祁连山河流域水文地质调查年度报告[R].中国地质科学院水文地质环境地质研究所.
- 潘世兵,王忠静,曹丽萍.2003.西北内流盆地地下水循环模式及其可持续利用[J].地理与地理信息科学,19(1):321-326.
- 潘世兵,王忠静,田伟.2002.河西走廊地下水系统数值模拟中的几个问题探讨[J].水文地质工程地质,29(5):59-61.
- 钱正英,沈国舫,潘家铮.2004.西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究(综合卷)[M].北京:科学出版社.
- 曲焕林.1991.中国干旱半干旱地区地下水资源评价[M].北京:科学出版社.
- 曲炜.2005.西北内陆干旱区水资源可利用量研究[D].南京:河海大学.
- 邵新民.2002.中国西北内陆干旱盆地地下水资源评估与开发[J].水文地质工程地质,29(3):20-20.
- 申建梅,聂振龙,王哲.2019.巴丹吉林沙漠及周边地区1:25万水文地质调查成果报告[R].中国地质科学院水文地质环境地质研究所.
- 水利电力部水文局.1987.中国水资源评价[M].北京:水利电力出版社.
- 孙培善,李继江,秦毅苏.1998.我国西北地区地下水资源概况及合理开发利用建议[J].发展,(10):10-11.
- 王德潜,刘祖植,刘方,董天印,李益朝,许超美.2000.西北地区水资源特征与可持续利用[J].第四纪研究,20(6):493-503.
- 王德潜,刘祖植.2002.西北地区水资源若干问题探讨[J].西北地质,35(3):1-6.
- 王贵玲,刘志明,刘花台,张俊牌,高业新,蔺文静.2003.地下水潜力评价方法[J].水文地质工程地质,30(1):63-66,72.
- 王国亚,沈永平,苏宏超,王进,毛炜峰,高前兆,王顺德.2008.1956—2006年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响[J].冰川冻土,30(4):562-568.
- 王思佳,刘鸽,赵文智,李中恺.2019.干旱、半干旱区地下水可持续性研究评述[J].地球科学进展,34(2):210-223.
- 王文科,杨泽元,程东会,王文明,杨红斌.2011.面向生态的干旱半干旱地区区域地下水资源评价的方法体系[J].吉林大学学报:地球科学版,41(1):159-167.
- 王旭升,胡晓农,金晓媚,侯立柱,钱荣毅.2019.巴丹吉林沙漠的水文地质条件及地下水循环模式[M].北京:科学出版社.
- 王宗太,刘潮海.2001.中国冰川分布的地理特征[J].冰川冻土,23(3):231-237.
- 徐恒力,周爱国,肖国强,支兵发,叶含春.2000.西北地区干旱化趋势及水盐失衡的生态环境效应[J].地球科学——中国地质大学学报,29(5):59-61.
- 徐兆祥.1992.西北干旱内陆盆地地下水开发与生态环境问题[J].甘肃环境研究与监测,5(4):19-23.
- 阎锡璵,段永候,贾永瑞.1973.中国西北和内蒙干旱地区的水文地质特征[J].地质学报,1(1):102-112.
- 杨针娘.1981.我国西北山区河流类型[J].冰川冻土,3(2):14-31.
- 姚俊强,杨青,刘志辉,李诚志.2015.中国西北干旱区降水时空分布特征[J].生态学报,35(17):5846-5855.
- 尹立河,顾小凡,张俊.2020.塔里木盆地开都河—孔雀河流域水文地质调查年度报告[R].中国地质调查局西安地质调查中心.
- 张鸿义,曾凡江,安海棠.2011.中国干旱区浅层地下水的形成、分布与运移[J].干旱区研究,28(1):67-73.
- 张鸿义.2009.中国干旱区地下水资源及开发潜力分析[J].干旱区研究,26(2):149-161.
- 张俊,尹立河,顾小凡,李瑛,杨炳超,姜军,贾伍慧,谢万兵,王拓,唐小平,董佳秋,王倩,常亮.2021.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,54(1):185-195.
- 张宗祜,李烈荣.2004.中国地下水资源(新疆卷)[M].北京:中国地图出版社.
- 张宗祜,卢耀如.2002.中国西部地区水资源开发利用[M].北京:中国水利水电出版社.
- 赵晓丽,张增祥,汪潇,左丽君,刘斌,易玲,徐进勇,温庆可.2014.中国近30a耕地变化时空特征及其主要原因分析[J].农业工程学报,30(3):1-11.
- 赵运昌.2002.中国西北地区地下水资源[M].北京:地震出版社.
- 朱延华.2001.西北内流盆地地下水可利用量及其分布研究[C]//中国地质科学院"九五"科技成果汇编.