

doi: 10.12029/gc20220724002

尹立河, 张俊, 姜军, 张鹏伟, 顾小凡, 董佳秋, 郭培宏, 杨炳超, 李瑛. 2023. 南疆地区水资源问题与对策建议[J]. 中国地质, 50(1): 1-12.

Yin Lihe, Zhang Jun, Jiang Jun, Zhang Pengwei, Gu Xiaofan, Dong Jiaqiu, Guo Peihong, Yang Bingchao, Li Ying. 2023. Issues and countermeasures on water resources in the Southern Xinjiang[J]. Geology in China, 50(1): 1-12(in Chinese with English abstract).

南疆地区水资源问题与对策建议

尹立河^{1,2,3,4}, 张俊^{1,2,3,4}, 姜军^{1,2,3,4}, 张鹏伟², 顾小凡^{1,2,3,4},
董佳秋^{1,2,3,4}, 郭培宏^{1,2,3,4}, 杨炳超^{1,2,3,4}, 李瑛^{1,2,3,4}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830057; 3. 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; 4. 陕西省水资源与环境工程技术研究中心, 陕西 西安 710054)

摘要:【研究目的】南疆地区是中国重要的能源矿产基地和诸多国家战略的核心区。该区地处干旱区, 水资源短缺是制约社会经济发展和生态环境保护修复的主要因素, 查明水资源开发利用中的问题, 提出针对性的对策建议是实现水资源可持续利用与环境保护的重要保障。【研究方法】通过系统收集分析前人已有成果, 从南疆地区的水资源开发利用现状、存在的问题与对策建议 3 个方面进行论述。【研究结果】南疆地区的水资源主要形成于山区, 山区的降水和冰雪融水是河流的主要补给源。河流出山后, 地表水与地下水频繁转化, 最终以蒸散发的形式消亡于流域下游。南疆地区多年平均水资源 451 亿 m³, 其中地表水资源量 432 亿 m³, 地下水资源量 268 亿 m³, 重复量 249 亿 m³。近年的开发利用量已达 327 亿 m³, 开发利用程度超过 70%, 远超过水资源开发利用的警戒线, 总体上已处于过度开发状态。南疆地区的地表水水质总体较好, 优于Ⅲ类水的地表水占 94%。地下水的水质从山前倾斜平原向盆地腹部, 浅层地下水水质逐渐变差, 由 I-Ⅲ 类转变成Ⅳ-Ⅴ类地下水(高矿化度水), 部分地区常规水化学、有机物含量等超标。水资源开发利用中的主要问题有水资源利用效率和效益偏低、水资源不合理开发利用造成土壤盐渍化和沙漠化等环境问题、生态需水量的估算存在较大不确定性以及气候变化对水资源的影响研究不足等。【结论】针对以上问题, 应大力发展节水农业及提高咸水的资源化利用程度, 统筹上、中、下游的水资源调度, 优化水资源在生活、生态、生产之间的配置, 加强南疆地区气候变化对水资源的影响研究以及生态需水量研究。

关键词: 水资源; 沙漠; 干旱区; 问题; 对策建议; 水文地质调查工程; 南疆

创 新 点: (1) 系统论述了南疆地区水资源的形成转化规律, 总结了水资源开发利用中存在的主要问题; (2) 指出了下一步南疆地区水资源调查研究需要重点攻关的问题。

中图分类号: P641.8; TV213.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)01-0001-12

Issues and countermeasures on water resources in the Southern Xinjiang

YIN Lihe^{1,2,3,4}, ZHANG Jun^{1,2,3,4}, JIANG Jun^{1,2,3,4}, ZHANG Pengwei², GU Xiaofan^{1,2,3,4},
DONG Jiaqiu^{1,2,3,4}, GUO Peihong^{1,2,3,4}, YANG Bingchao^{1,2,3,4}, LI Ying^{1,2,3,4}

收稿日期: 2022-07-24; 改回日期: 2022-09-25

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划(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, 从事旱区水文地质调查研究工作; E-mail: ylihe@mail.cgs.gov.cn。

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Urumqi Integrated Natural Resources Survey Center of China Geological Survey, Urumqi 830057, Xinjiang, China; 3. Key Laboratory on Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid regions of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Shaanxi Province Engineering Research Center on Water and Environment, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] The southern Xinjiang is characterized by an important mineral and energy base and a key area of many national strategies. Water resources shortage is a key factor that hinders the social and economic developments as well as ecological protection and restoration in the southern Xinjiang where the climate is arid. To secure sustainable water resources development and environmental protection, identifying water-related issues and taking countermeasures are required. **[Methods]** Through a systematic synthesis on previous studies, the current status, issues and countermeasures of water resources development will be discussed. **[Results]** Water resources originate from the mountainous regions where rivers receive precipitation and snow (glacier) melting water contribution. The interaction between groundwater and surface water is frequent after rivers flow out of the mountains and water resources are consumed by evaporation finally at lowest reaches. The mean annual water resources are $4.51 \times 10^{10} \text{ m}^3$ among which surface water resources are $4.32 \times 10^{10} \text{ m}^3$, groundwater resources are $2.68 \times 10^{10} \text{ m}^3$, and the overlapping resources are $2.49 \times 10^{10} \text{ m}^3$. The consumption in recent years reaches $3.27 \times 10^{10} \text{ m}^3$, corresponding to a development level of over 70% that significantly exceeds the alarming level. The development rate indicates that water resources are over-used currently. Surface water quality is good in general, water quality superior to the third category accounts for 94%. Groundwater water quality becomes worse from the piedmont plains to the heart of the basin, and decreases from I – III level to IV – V level (high total dissolved solids). In some areas, common elements and organic pollutants exceed the safety levels. The main problems related to water resources development are low efficiency and output of water resources, salinization and desertification due to unreasonable water development, high uncertainty on ecological water use and limited studies on the impact of climate change on water resources. **[Conclusions]** Aiming to solving these questions, water-saving agriculture and saline water use should expand, the water allocation among different reaches (upper, middle and lower) and sectors (human, ecology and production) should be considered and detailed studies on the impact of climate change on water resources and on the ecological water demand should be carried out.

Key words: water resources; desert; arid areas; issues; countermeasures; hydrogeological survey engineering; southern Xinjiang

Highlights: (1) Formation and transformation patterns of water resources in the southern Xinjiang have been systematically discussed and main issues on water resources development have been summarized; (2) Main questions needed to solve in the future have been put forward.

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

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

1 引 言

南疆地区是指新疆天山以南、昆仑山以北地区,主体为塔里木盆地,包括巴音郭楞蒙古自治州(巴州)、阿克苏地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州(克州)、喀什地区及和田地区(图1),同时还包括新疆生产建设兵团的四个师,该区是国家重要的能源矿产基地、优质棉生产基地以及特色水果生产基地。如根据国家统计局、新疆和新疆生产建设兵团2020年统计年鉴数据,南疆地区棉花生产量约为266万t,占全国

总产量的516万t的50%以上。同时,众多国家战略涉及到南疆地区,该区是国家“西气东输”的源头、生态文明建设的重点区,是兵团向南发展、“一带一路”战略核心区,因此南疆地区的经济发展与社会稳定对国家具有重要的战略意义。南疆地区经济发展相对落后,是国家级深度贫困地区,人均GDP不及全国平均值的40%。据新疆统计年鉴数据,2000年以来,南疆地区人口总体呈现持续增长,2020年人口1195.0万,但人口密度最高的绿洲区也仅和全国平均水平相当。

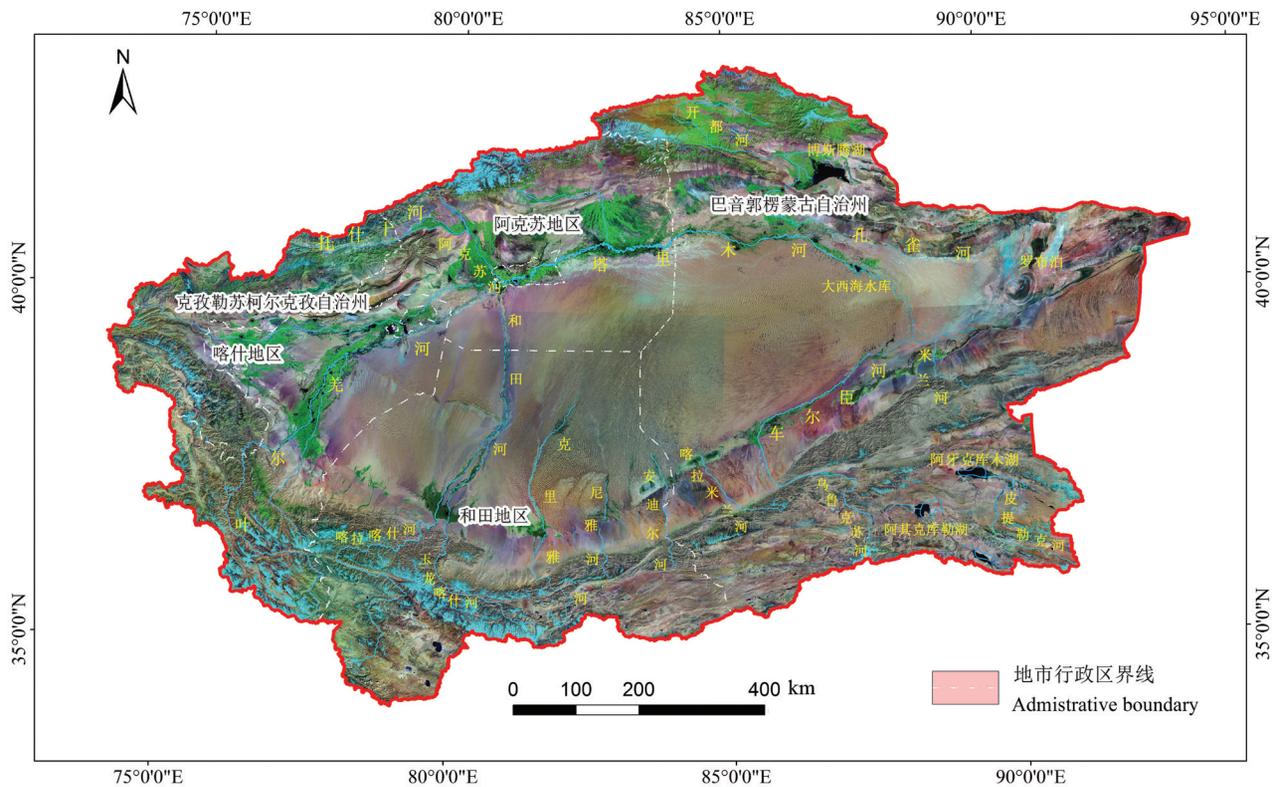


图1 南疆地区行政区划与水系图

Fig.1 Administrative divisions and river systems in the southern Xinjiang

南疆地区面积106万 km^2 ,其中绿洲区8万 km^2 ,山区59万 km^2 ,荒漠区39万 km^2 (主要是塔克拉玛干沙漠),其中绿洲区是人类与经济社会活动的主要地区,也是水资源开发利用的集中区,也是盐渍化、荒漠化等生态环境问题最严重的地区。由于地处内陆地区,南疆地区降水相对较少,根据气象站点实测资料分析,南疆地区年平均降水量约为120 mm,但空间分布极不均。其中,山区年降水量一般为100~500 mm,盆地边缘一般50~80 mm,东南缘仅有20~30 mm,盆地中心的沙漠区年均降水量小于10 mm。南疆地区的水系主要包括开都河—孔雀河、迪那河、渭干河、阿克苏河、喀什噶尔河、叶尔羌河、和田河、克里雅河、车尔臣河等9大水系和塔里木河干流。其中塔里木河干流全长1321 km,是中国第一大内陆河;博斯腾湖面积约1000 km^2 ,山区59万 km^2 ,荒漠区39万 km^2 (主要是塔克拉玛干沙漠),其中绿洲区是人类与经济社会活动的主要地区,也是水资源开发利用的集中区,也是盐渍化、荒漠化等生态环境问题最严重的地区。博斯腾湖是中国最大的内陆淡水湖,整个南疆地区地表水资源

量多年平均约为432亿 m^3 (据全国第三轮水资源评价结果,评价周期为2001—2016年),主要是来源于山区的降雨和冰雪、冻土融水,水质较好,多为淡水。南疆地区的地下水主要赋存在第四系冲洪积、冲湖积和风积含水层以及山区的基岩裂隙含水层中,地下水资源量约为268亿 m^3/a (据全国第三轮水资源评价结果),主要来源于地表水补给,水质从山前到沙漠依次为淡水、微咸水和咸水(甚至为卤水)。

水是生命之源、生产之要、生态之基。对于地处典型干旱内陆区的南疆地区而言,更是如此。从流域上游山区的水资源形成与演化,到平原绿洲区的水资源开发与保护,最后到沙漠区维系植被的适生水位,水贯穿始终,对维系南疆社会经济发展和生态环境保护起着关键作用。目前,水资源已成为制约南疆地区社会经济发展和生态保护修复的最主要的因素。在人类活动、气候变化的双重影响下,南疆地区水资源在开发利用过程中出现了一些生态环境问题。经过近十多年各级政府的持续努力(如最严格水资源管理制度的执行、地下水超采区治理、塔里木河生态修复等),环境问题已趋于好

转,但由于这些问题累积时间长、程度较重,总体上仍需要长时间的修复治理。本文在介绍南疆地区水资源形成、转化的基础上,阐明水资源数量、质量的空间分布特征,分析水资源开发、利用中存在的主要问题,并提出针对性的应对措施,以期为南疆地区水资源合理开发利用提供技术支撑。

2 水资源形成、转化与分布特征

2.1 河川径流是主要水源

塔里木盆地周边高山地区是水资源的形成区,在这些地区降水丰富,海拔4000 m以上被冰川覆盖,降水与高山冰雪融水是本区水资源的主要来源(图2)。盆地平原区降水稀少,一般很难形成地表径流,对地下水补给很少,平原区地下水天然补给量约为20亿 m^3 (邓铭江,2016),只占水资源总量的4%左右。因此,发源于中高山区的河流出口径流量基本代表了区内的水资源量,这也是中国西北干旱区水资源的普遍特点。根据塔里木盆地水资源调查评价结果,出口口河川径流中冰川融水和降水形成的地表径流占76%,河川基流(地下水)占24%。正是由于冰川融水稳定的补给,南疆地区河流流量年际变化一般不大。正是由于水资源的这种构成特点,南疆地区的水资源对气候特别敏感。在历史上气温比较高的时期,河水流流量应比现在大得多,有些可以到达沙漠腹地。例

如,大约在魏晋时期(距今约1800 a)消失的精绝古国曾深入沙漠近百千米,位于沙漠腹地克里雅河下游的喀拉墩古城距离现代绿洲200 km,都表明那时的河水量比现在要大,均可深入沙漠腹地(殷晴,1987;熊黑钢等,2006)。

河川径流年内分配极不均。具有“春旱、夏洪、秋缺、冬枯”的特征。塔里木盆地河川径流量与气温同步,一年集中在夏季,6—9月来水量占到全年径流量的70%~80%,大多为洪水,且洪峰高、起涨快、洪灾重,造成夏季洪水泛滥。3—5月灌溉季节来水量仅占全年径流量的10%左右,极易造成春旱和春季灌溉用水不足。

2.2 地表水与地下水频繁转化

天然状态下,塔里木盆地河流出口口后的水资源转化模式分多次转化型和一次转化型两种(李文鹏等,2010)。多次转化型指前山带存在一个或多个(串珠状)山间小盆地,以开都河—孔雀河流域、渭干河流域和叶尔羌河流域为典型代表。在每个山间小盆地内,河流出口后在戈壁砾石带大量渗漏补给地下水,一些小型河流甚至渗失殆尽。因构造隆起阻水,或因洪积扇前缘的地形坡度变缓、含水层颗粒变细,地下径流受阻后大量溢出形成泉集河,并与主河流汇合后,流入下游盆地,之后又重复上述水资源转化过程。一次转化型指河流出口口

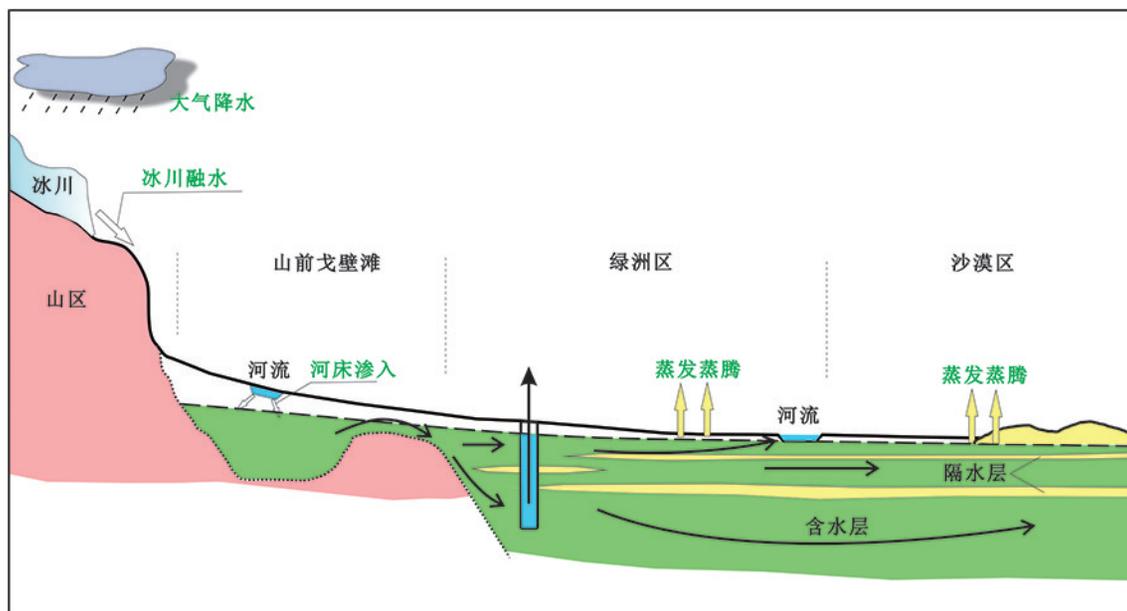


图2 南疆水资源形成转化模式示意图

Fig.2 Schematic diagram of groundwater formation and circulation in the southern Xinjiang

后直接进入塔里木大盆地,其水资源转化模式与上述的类似,以盆地南缘和田河、克里雅河及诸多小型河流为典型代表。

从水资源转化模式来看,盆地平原区地表水和地下水转化频繁、相互依存,构成一个不可分割的整体。从转化量上来看,盆地山前平原80%以上的地下水资源由地表水通过各种渗漏补给,包括河道渗漏、渠系渗漏、田间渗漏和暴雨洪流入渗等。根据评价结果,渠系渗漏、河道渗漏、田间渗漏各占地下水补给量的39.6%、34.9%和11.5%^①。因此,地下水资源量是当前地表水利用情况下的资源量,当地表水利用情况改变时地下水资源量也将发生变化。例如,随着地表水利用系数的不断提高,渠系渗漏量自2000年以来明显降低,据第三次全国地下水资源评价的结果,与第二次相比新疆渠系渗漏补给量减少了20亿m³/a。

由于地下水与地表水的紧密联系,地下水的开发也会影响地表水。细土平原溢出带的泉水是河水的重要补给源,随着地下水开发强度的不断加大,2019年以来的地下水统测表明,在南疆地区已形成了7个地下水漏斗(尹立河等,2021),这必将导致溢出带的泉水流量减小,进而减小河水的流量。但地表水与地下水的转化可以使得水资源可以多次利用,增加可用的水资源量。

2.3 人类活动严重影响水资源形成转化与分布

自古以来,随着农业的发展,人类活动强烈改变了南疆地区水资源的自然空间分布和转化方式。人类通过兴修水利工程,引水灌溉,将河流出山径流引至细土平原的灌区,大量发展人工绿洲,不断改变地下水与地表水的补排关系,打破了原有的水平衡和生态平衡。历史上,塔里木河流域分为源流区和干流区,形成“九源一干”格局(图1)。随着盆地周边绿洲的不断开发,九大水系中的车尔臣河、克里雅河、迪那河、喀什噶尔河、渭干河相继断流,无水进入塔里木河。目前,归属于塔里木河流域的只有叶尔羌河、和田河、阿克苏河和开都河—孔雀河等4个支流及塔里木河干流,形成“四源一干”的格局(邓铭江,2009)。

人类活动对水资源的最大影响就是水库的建设,自20世纪60年代开始,南疆地区开始修建山区和平原水库。据最新的统计结果,截止2019年,南

疆地区已建成水库173座,总库容约71亿m³,近20年是南疆水库建设的一个高峰期,修建了70多座水库(李江等,2020)。水库的修建对河道下游产生一定的影响,导致下游河道断流和湖泊萎缩、干涸,如孔雀河下游、塔里木河下游断流以及罗布泊等干涸等,进而导致河岸林退化和湖泊周边湿地萎缩。

3 水资源现状

3.1 水资源数量

据全国第三次水资源评价结果(2001—2016年),南疆地区多年平均水资源量451亿m³。其中,地表水资源量432亿m³,地下水资源量268亿m³,重复量249亿m³。南疆地区人均水资源量4447 m³,是全国平均水平的2.1倍。与以往的水资源评价结果相比,受气候暖温化影响,地表水资源量呈现增加趋势(李江和龙爱华,2021);而受地表水用水效率提高等影响,地下水资源量呈现减小的趋势(尹立河等,2021),但水资源的总体空间分布模式变化不大(邓铭江,2005)。按行政区统计,阿克苏和巴州地区水资源量最多,分别为111亿m³和106亿m³;喀什地区水资源量最少,为77亿m³。按流域统计,水资源总量最大的是阿克苏河流域(104亿m³,含55亿m³的入境地表水),其次为叶尔羌河流域(75亿m³)。车尔臣诸河和克里雅诸河流域水资源量较小,分别是23亿m³和26亿m³。

南疆地区水资源可利用量409亿m³,地表水和地下水可利用量分别为285亿m³和124亿m³(张宗祐和李烈荣,2004)。据最新的统计年鉴数据,现状水资源利用量327亿m³,开发利用程度为70%,占可利用量的80%,远高于国际公认的40%的警戒界。其中,地表水利用量281亿m³,开发利用程度63%,占地表水可利用量的99%;地下水利用量46亿m³,开发利用程度17%,占地下水可采资源量的37%。南疆地区2020年用水总量红线为312亿m³,目前水资源已处于超用状态。

从各个地州看,喀什和阿克苏地区的用水量接近或是超过水资源总量,是南疆地区用水程度最高的区域。其次为巴州、和田地区,克州用水程度最低,仅为13%。从用水结构看,第一产业用水占比一直高达95%以上,其中又以农业灌溉用水为主。生活用水量占总水量的1.5%左右,生态环境用水

(主要是城市绿化)占比不足1%。

3.2 水资源质量

南疆地区地表水水质总体较好,优于Ⅲ类水的地表水占94%。受生活污水、工业废水、农田排水和自然因素等影响,喀什河、孔雀河以及塔里木河干流下游部分河段水质较差,主要超标组分为氨、氮和总硬度(常玉婷等,2021)。南疆地区有国内最大的内陆湖泊,即博斯腾湖,其水质受到广泛关注。最新的评价表明,博斯腾湖水水质长期保持在Ⅲ类水平,通过分析单因子权重值发现,COD、Mn、溶解氧、氨氮、总氮和总磷等有机类和营养盐是影响博斯腾湖水质的主要因素(帕提古丽·热合曼,2018)。

地下水水质受淋溶—迁移—汇集的水文地球化学作用控制,从山前倾斜平原向盆地腹部,浅层地下水水质逐渐变差,由Ⅰ—Ⅲ类转变成Ⅳ—Ⅴ类地下水(高矿化度水),形成明显的水平分带(尹立河等,2021)。水质好的Ⅰ—Ⅱ类淡水主要分布在山前单一结构潜水区、溢出带前缘承压水区,主要包括渭干河、开都河、阿克苏河、喀什噶尔河、叶尔羌河、车尔臣河等河流上游山区和山前砾质平原区;水质较好的Ⅲ类水主要分布在山前倾斜平原地下水溢出带,部分常规化学指标超标;其他地区地下水属于Ⅳ—Ⅴ类,水质总体较差(图3)。水质较差表现为矿化度、硫酸根、氯酸根含量超标。城镇地下水集中供水水源总体达到饮用水水质标准,部分地区常规水化学指标超标。

由于自然环境的原因,部分地区地下水氟离子和碘离子超标,导致出现地方病。如喀什地区的伽师县、巴楚县、阿克苏地区阿瓦提县、温宿县以及和田地区各市县,地下水氟含量不符合饮用水标准;喀什地区伽师、巴楚、叶城等县,地下水中碘含量较低,成为南疆缺碘性地甲病(俗称大脖子病)重病发病区。除了西缘外,在塔里木盆地的南缘绿洲区也存在导致地方病的水化学组分,最新的研究成果显示地下水高砷、高氟和高碘水样分别占总水样的7.3%、47.2%和11.6%,砷氟碘共富集占比为3.0%,主要分布于36.0~60.0 m的浅层承压水含水层中(孙英等,2022)。受人类活动的影响,局部地区出现了地下水有机污染情况,来源主要是牧草地使用的杀虫剂、城市的污水处理厂和垃圾填埋场等(曾妍妍

等,2015)。有机污染物检出率表现出牧草地>耕地>建设用地的特征,并表现出包气带颗粒越细,检出率越高的特征(赵江涛等,2016)。

4 主要问题

4.1 农业用水占比大,水资源利用效率低

农业灌溉仍存在大水漫灌现象,特别是冬灌、春灌期间,为淋滤盐分大水漫灌比较普遍。南疆地区农业综合亩均灌溉用水量 757 m^3 ,是全国平均水平的2倍,是华北地区的3.6倍。节水灌溉面积近年来不断增加,但仍有较大的节水空间。南疆地区五地州中,除巴州节水灌溉面积比例大于80%外,其他地区均小于50%。虽然近年来灌溉水利用系数显著提高,目前已达到0.5以上,低于全国平均水平约0.07(中国水资源公报,2020),同以色列等节水先进国家的0.7~0.8相比,仍有较大的提升空间。同时,水资源利用效益低,万元GDP用水量 834 m^3 ,远高于全疆平均水平的 562 m^3 ,是全国平均水平的5.6倍。

从用水结构看,农业灌溉用水比重超过90%,是导致总用水量不断增高的主要原因。由于过度开发利用水资源,“渠库结构”组成的人工水系替代“河湖结构”组成的天然水系,人工绿洲挤占天然绿洲生态空间。南疆地区在20世纪50年代,灌溉面积约 6667 km^2 ,此后耕地面积增长迅速(乔西现,2003)。仅在1998年至2017年的20年里,南疆地区耕地面积增加了140%。开都河—孔雀河流域的遥感解译也表明,在上世纪80年代初,流域内的耕地为 4333 km^2 ,缓慢增长至2000年的 4713 km^2 ,随之快速增加到2010年的 7467 km^2 ,然后缓慢下降至2018年的 7333 km^2 。随着耕地的增加,灌溉用水量随之大幅增加,挤占了生态用水,使原本脆弱的荒漠生态系统进一步退化。可以通过不断调整农业种植结构和提高用水效率,降低农业用水量,把节约下来的水资源用于生态输水,持续改善下游的生态环境。目前在南疆地区采取了系列措施控制水资源的开发利用量,比如退地减水计划,对地下水开发采用井电双控的监管措施,提高水资源利用成本等,取得了比较明显的成效。

4.2 水资源配置不合理产生系列环境问题

塔里木河流域管理局(塔管局)成立之前,塔里木河流域水资源分属各地州、兵团等多部门管理。塔

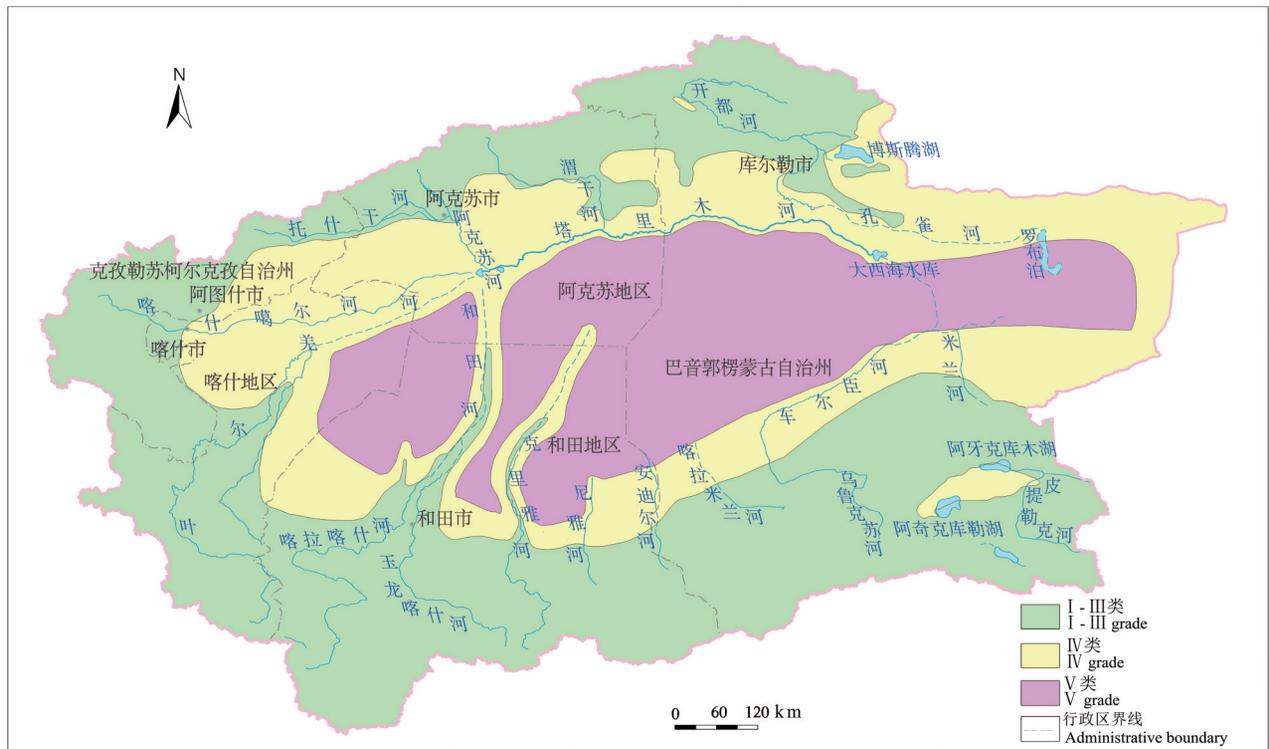


图3 新疆地区地下水水质分布图

Fig.3 Groundwater quality distribution in the southern Xinjing

管局成立后,对全流域行使水资源统一管理,经过10余年坚持不懈的努力,有效缓解了流域生态严重退化的被动局面,但流域上、中、下游和生活、生态、生产间的用水统筹还不尽合理,地质环境问题的修复治理还有很长的路要走。上游过度利用地表水灌溉,重灌轻排,灌区地下水位上升,水盐平衡破坏,耕地次生盐渍化严重。如焉耆盆地,20世纪80年代初受盐渍化威胁面积为46%,2017年增加至66%(姜红等,2017)。上游过度使用地表水造成中下游部分河道断流和土地沙化,不得不开采利用地下水,进而造成部分地区地下水超采。地下水超采区主要分布在巴州库尔勒市平原区、和硕县平原区,均为严重超采区,超采面积分别为1403 km²和977 km²,造成这些地区的水资源利用不可持续。据最近的地下水水位统测结果与历史水位(20世纪80年代)的对比,估计库尔勒市平原区地下水的超采量约为20亿m³。

同时过度使用水资源造成的河流断流和地下水水位下降,使得下游湿地和植物生态系统退化。塔里木河中游地区分布着长100 km、总面积980 km²的天然胡杨林带和灌木林带,是维护绿洲生态

和生产安全的生态屏障。2000年以前,由于塔里木河长时间断流,造成下游两岸胡杨林大片死亡,隔开塔克拉玛干沙漠和库木塔格沙漠的绿色屏障退化严重,防风固沙、蓄水保土、涵养水源的能力大大降低,两大沙漠呈现“握手”之势。随着塔里木河下游生态输水工程的实施,植物生态系统呈现逐步好转的趋势。过度的水资源开发利用,也会对湖泊产生影响。以塔里木河下游的尾间湖—台特玛湖为例,20世纪70—80年代由于水利工程的实施,塔里木河下游干涸,导致台特玛湖面积大幅减小。2000年以来,随着塔里木河下游输水工程的实施,台特玛湖面积随着输水量的变化而变化,2017年水面面积达500 km²(图4),此后保护基本稳定(霍天赐等,2020)。尽管如此,塔里木河流域生态系统整体退化的格局还没有发生根本改变,生态环境问题依然存在,生态与经济发展用水的矛盾依旧突出。

4.3 生态用水量评估差异较大

新疆地区在过去的50年中,荒漠河岸林生态系统受到人类活动影响,以胡杨为主的荒漠河岸林大面积衰败,下游地区的“绿色走廊”受到严重威胁,

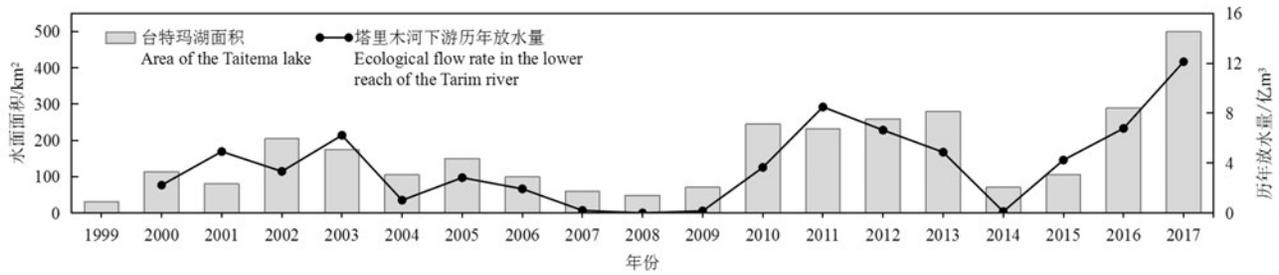


图4 台特玛湖面积与塔里木河下游放水量历时曲线图

Fig.4 Variations of the lake area of Taitema and the flow rate of the lower reach of the Tarim River

流域生态问题成为西部生态环境研究的热点(陈亚宁等,2018;Yin et al.,2021)。保护和修复塔里木河流域的生态系统,需要评估生态需水量。目前不同学者对该区的生态需水量进行了评价,但评价结果差异较大。陈亚宁等(2018)利用潜水蒸发法和定额法计算了天然植被生态保护区(约2.6万 km²)的生态需水量为86亿 m³。贾宝全和慈龙骏(2000)利用定额法,估算出整个南疆地区的生态需水量约183亿 m³。胡顺军(2007)基于潜水蒸发公式和蒸散模型,估算塔里木河干流天然植物生态需水量为20~30亿 m³。白元等(2014)也估算了塔里木河干流区天然植被的生态需水量,约为21亿 m³。而高凡等(2010)估算的塔里木河干流区的生态需水量略高,为33~41亿 m³。周金龙等(2006)对南疆地区非灌区自然植被生态耗水量进行了评估,约为54亿 m³。由此看来,由于不同的计算方法、不同的计算区域,南疆地区的生态需水量尚无统一的说法。即使对同一地区,生态需水量估算结果也差异较大,如塔里木河干流区的生态需水量估算结果为21~41亿 m³,最高值是最低值的2倍左右。

4.4 气候变化对水资源的影响加剧

南疆地区从20世纪60年代开始,气温呈现增加趋势(满苏尔·沙比提和楚新正,2007),并在某个时间点发生了跳跃式突变(陈亚宁等,2008),但各个流域气温突变时间不同。渭干河流域1960—2013年气温增温率为0.27℃/10 a,高于全国平均的增温速率,气温的突变时间在1993年左右(秦鹏等,2016)。阿克苏流域1960—2015年气温显著增加,增温率约为0.18℃/10 a(王志成等,2018),气温的突变时间在1996—1997年左右(陈青青等,2017)。气温上升必然导致冰雪消融速度加快,冰川面积减小。南疆地区是中国冰川面积分布最广的地区之

一,依据冰川编目数据,南疆地区的两大山系冰川众多,其中天山山系冰川有8100多条,昆仑山系7200多条,这些冰川分布在海拔3200~6500 m的山区(李龙等,2019)。南疆地区的冰川随着气候变化也出现显著的亏损,且亏损总体呈现加剧趋势。典型流域的研究表明,随着气温升高,阿克苏地区的积雪覆盖率以抛物线形式显著减小(穆振侠等,2012)。在开都河流域,1970—2000年,冰川年均面积的退缩率为0.9%/a,而在2000—2009年,退缩率增大到1.1%/a,表明2000年之后冰川消退的速率在持续增大(朱弯弯等,2014)。从冰川分布的山脉看,2005—2015年喀喇昆仑山和昆仑山中部冰川退缩的面积最大,分别约为2000 km²和1500 km²(鄢雪英等,2019)。

南疆地区的降水也呈现增加的趋势。通过分析南疆地区1960年以来的降水数据,降水量总体上呈现增加趋势,其中塔里木盆地北部区增加趋势明显要高于南部(张广朋等,2015)。不同季节降水的增加速率也有所不同,其中夏季增加最快,其次为秋季,冬季最小(唐冶等,2014)。但对于具体的增加速率,目前还没有统一的结论。比如阿克苏流域不同气象站的降水量增加速率介于2.23~21.11 mm/10 a(王志成等,2018),平均值值为10.42 mm/10 a;而平原区32个气象站的数据表明,降水量的增加速率是5.87 mm/10 a。

由于降水量增加,同时气温升高导致冰雪消融量增加,塔里木盆地的河流总体呈现流量增加趋势。研究显示,塔里木河上游三源流的年径流量除和田河表现出轻微减少趋势外,叶尔羌河和阿克苏河的径流均呈增加趋势,其中阿克苏河表现出明显的单调增加趋势(傅丽昕等,2009),其两条主要支流托什干河和库玛拉克河1961—2014年流量增速

分别为1.6亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ 和3.1亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ (穆振侠和姜卉芳,2012)。其他流域地表水流量也多表现出增加趋势,如渭干河流域1960—2013年,径流量持续增加,平均增速为1.8亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ (秦鹏等,2016)。根据最新的模拟结果,流域冰川持续融化,但融水径流增加趋势不一致,阿克苏河流域冰川融水在2050—2060年到达峰值,叶尔羌河流域冰川融水径流量在2070年达到最高,渭干河流域、和田河流域和克里雅河流域在2080年之前冰川融水一直稳定增加,但增加趋势逐渐趋于平缓(倪明霞等,2022)。

5 对策建议

5.1 大力发展节水农业和咸水资源化利用

南疆地区农业用水占比大,用水效率相对较低,尚有一定的节水潜力。应加大推广节水灌溉,提高渠系防渗水平,提高用水效率。平原区地下微咸水和咸水占比大,分布面积分别为15.1万 km^2 和4.4万 km^2 (周金龙等,2009)。应扩大适宜微咸水和咸水灌溉的作物种植面积,加大咸水或咸淡水混合灌溉,提高咸水资源化利用水平。特别是加大筛选适用于咸水灌溉的作物,比如近年的相关研究表明,盐地碱蓬等盐生植物具有超耐盐碱性,且具有菜、饲、油等多种价值,可充分利用咸水资源进行种植(赵振勇等,2020)。

5.2 统筹水资源调度和优化水资源配置

针对水资源不合理开发利用问题,将流域作为统一整体,统筹考虑上、中、下游的水平衡,统筹考虑山水林田湖草等生态要素,把水资源作为刚性约束,按照主体功能区定位,加强水资源承载能力和国土空间开发适宜性评价,提出水资源合理开发利用和优化调度方案,优化生活、生态、生产用水配置,逐步实现水-土-盐平衡,实施生态整体保护、系统修复与综合治理。下一步要开展绿洲区水平衡分析以确定其承载能力,确定水资源开发的上限,重新评价地下水的可采资源量,在阿克苏等地区的生态保护恢复中要充分考虑水资源的承载能力。从已有的数据来看,巴州水资源开发利用程度相对较低(57%),后备耕地面积最大达1.9万 km^2 (李和平等,2000),可进行适当土地开发。和田地区和克州后备耕地相对较少,为次优先地区。阿克苏和喀什地区水资源开发利用已严重超出承载能力,从水

资源角度,不推荐进一步开发。

5.3 加强南疆地区气候变化对水资源的影响研究

在全球气候变暖的背景下,冰川衰退虽然在短时间内可以提高下游河道的径流量,长此以往,一旦冰川完全衰退,会导致下游地区的供水困难(柳葳等,2005;王璞玉等,2014)。因此,需要采取一系列对策,应对气候变化对水资源的影响。应加强降水、地表水、地下水监测站网建设,开展全区水资源动态分析评价、预报预警和风险评估,以应对水资源可持续利用不确定性增加的风险。重点是结合最新的中国第四次气候变化国家评估报告,预测南疆地区气候变化对水资源的影响,评价水资源变化及可利用水量的变化,评估水资源变化对水资源可持续利用的潜在风险。中近期,应充分利用水资源持续增长的特点,加大生态输水力度,修复被破坏的生态系统。

5.4 确定切合南疆地区实际情况的生态需水量

生态需水量的确定是南疆地区水资源合理配置的关键难点所在。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(林炜和褚丽,2018)。但对于陆生植被的生态需水量的确定还存在较大的不确定性,应开展专题研究工作,提出南疆地区植被生态系统的优先保护顺序和保护程度,确定优势植被种群的生态耗水量,提供不同植被生态系统状态下的生态需水量,结合社会经济发展对水资源的需求,提出切合南疆实际情况的生态需水量。

6 结论

(1)天然条件下,南疆地区的水资源形成在山区,出山后地下水与地表水频繁转化,最终以蒸散发的形式消散。据最新的水资源评价结果,南疆地区多年平均水资源量451亿 m^3 ,其中地表水资源量432亿 m^3 ,地下水资源量268亿 m^3 ,重复量249亿 m^3 。在人类活动条件下,南疆水资源的自然空间分布和转化方式发生了显著改变,塔里木河流域从历史上的“九源一干”演变为“四源一干”。

(2)南疆地区的水资源开发利用程度已达70%,远高于国际公认的40%的警戒界,水资源已处于过度开发状态。由于农业用水比例高达90%以上,应不断提高节水灌溉占比和用水效率。地表水

水质总体较好,地下水水质从山前倾斜平原向盆地腹部逐渐变差,局部地区水质超标。

(3)水资源利用效率偏低是南疆水资源开发利用中面临的最大问题;优化水资源在流域不同地段和不同用户间的分配,是保护修复生态环境的关键;加强气候变化对南疆水资源的影响,是今后需重点关注的方向。

注释

①刘斌, 门国发. 2006. 塔里木盆地地下水勘查[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区地质调查院.

②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]. 西安: 中国地质调查局西安地质调查中心.

References

- Bai Yuan, Xu Hailiang, Ling Hongbo, Wang Xiyi. 2014. Spatial distribution characteristics and ecological water requirement of natural vegetation along the mainstream of the Tarim River [J]. *Journal of Desert Research*, 34(5): 1410–1416 (in Chinese with English abstract).
- Chang Yuting, Fan Wugan, An Haiyan. 2021. Analysis on the changing trend of surface water environmental quality in arid area of Xinjiang [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 35(2): 75–81 (in Chinese with English abstract).
- Chen Qingqing, Chen Chaoqun, Yang Zhiyong, Feng Jie. 2017. Runoff variation in the Aksu River Basin and its response to climate change [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 28(1): 88–93 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yaning, Li Weihong, Chen Yapeng, Zhu Chenggang. 2018. Science in supporting the ecological restoration and sustainable development of the Tarim River Basin [J]. *Arid Land Geography*, 41(5): 3–9 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yaning, Xu Changchun, Hao Xingmin, Li Weihong, Cheng Yapeng, Zhu Chenggang. 2008. Fifty-year climate change and its effect on annual runoff in the Tarim River Basin, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30(6): 921–929 (in Chinese with English abstract).
- Deng Mingjiang. 2016. Prospecting development of south Xinjiang: Water strategy and problem of Tarim River Basin [J]. *Arid Land Geography*, 39(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Deng Mingjiang. 2009. *Theory and Practice of Water Management in the Tarim River of China* [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Deng Mingjiang. 2005. *Water Resources and Sustainable Utilization in Xinjiang Uygur Autonomous Region* [M]. Beijing: China Water & Power Press (in Chinese).
- Fu Lixin, Chen Yaning, Li Weihong, Xu Changchun, He Bin. 2009.

- Analyses of the durative and tendency of annual runoff in the headwaters of the Tarim River in the recent 50 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 31(3): 457–463 (in Chinese with English abstract).
- Gao Fan, Huang, Qiang, Yan Zhenglong. 2010. Study on dynamic monitor of ecological level and ecological water requirement in the main stream of Tarim River based on 3S technology [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 38(1): 188–194 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shunjie. 2007. *Research on Eco-environmental Water Requirement of Tarim Mainstream Watershed* [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forest University (in Chinese with English abstract).
- Huo Tianci, Yan Wei, Ma Xiaofei. 2020. A study of the variation and driving factors of the watec area of the terminal lake of inland river: A case study of Taitema Lake region [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 32(3): 149–156 (in Chinese with English abstract).
- Jia Baoquan, Ci Longjun. 2000. The primary estimation of water demand by the eco-environment in Xinjiang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 20(2): 243–250 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Hong, Yusufujiang Rusuli, Reyilai Kadeer, Adilai Wufu. 2017. Evaluation and analysis of soil salinization in the arid zones based on neural network model [J]. *Journal of Geo-information Science*, 19(7): 983–993 (in Chinese with English abstract).
- Li Heping, Fan Zili, Liu Xiaoming, Jia Changlu. 2000. Classification and evaluation of the reserve resources of land suiting farming in Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 23(4): 337–343 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiang, Long aihua. 2021. Water resources variations and sustainable development in Xinjiang in recent 60 years [J]. *Water Resources Planning and Dsign*, 33(7): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiang, Liu Ying, Wu Tao, Peng Zhaoxuan. 2020. 70 years of dam construcion in Xinjiang. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 18(5): 322–330 (in Chinese with English abstract).
- Li Long, Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Bu Yaping, Gong Peng, Li Xiaofeng. 2019. Glacier changes along the Silk Road Economic Belt in China in the past 50 years [J]. *Journal of Natural Resources*, 34(7): 1506–1520 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenpeng, Hao Aibing, Liu Zhengying. 2000. *Potential Development Areas for Groundwater in the Tarim Basin* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Lin Wei, Chu Li. 2018. Research on river ecological water demand [J]. *Shaanxi Architecture*, 44(14): 211–212 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wei, Xu Youpeng, Huang Yun. 2005. Effect of global warming on precipitation and runoff volume in Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, (5): 597–602 (in Chinese with English abstract).

- Mansur Sabit, Chu Xinzhen. 2007. Study on the change of climate and runoff volumes of the Tarim River Basin in recent 40 years [J]. Areal Research and Development, 26(4): 97–101 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Water Resources People's Republic of China. 2020. Beijing: China Water Resources Bulletin in [M]. Beijing: China Water and Power Press (in Chinese).
- Mu Zhenxia, Jiang Huifang. 2012. The response of snow cover ablation to climate change in the Kumalik River Basin, Southern Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 34(6): 1284–1292 (in Chinese with English abstract).
- Ni Mingxia, Duan Zhengrong, Xia Jianxin. 2022. Melting of mountain glacier and its risk to future water resources in Southern Xinjiang, China [J]. Mountain Research, 40(3): 329–342 (in Chinese with English abstract).
- Patiqui Reheman. 2018. Water quality evaluation of Bosten Lake in Xinjiang[J]. Guangxi Water Resources and Hydropower Engineering, 182(2): 104–106 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Xixian. 2003. Options on issues related to recent comprehensive treatments of the Tarim River Catchment [J]. China Water Resources, (5): 39–40 (in Chinese with English abstract).
- Qin Peng, Zhao Chengyi, Sheng Yu, Dong Yiyang. 2016. Runoff change characteristics of Weiganhe River in recent 54 years and their influencing factors analyzing [J]. Hydrology, 36(2): 85–91 (in Chinese with English abstract).
- Sun Ying, Zhou Jinlong, Yang Fangyuan, Ji Yuanyuan. 2022. Distribution and co-enrichment genesis of arsenic, fluorine and iodine in groundwater of the oasis belt in the southern margin of Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 22(1): 1–18 (in Chinese with English abstract).
- Tang Ye, Yang Zhihua, Cao Zhanzhou, Sheng Hongfeng. 2014. Climate change characteristics and impacts on fruit tree growth in Tarim Basin rim area of Southern Xinjiang in recent 50 years [J]. Agriculture Network Information, (4): 27–31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Puyu, Li Zhongqin, Zhou Ping, Jin Shuang, Chen Hui. 2014. Changes of representative glaciers in Xinjiang Hami and their impact to water resources [J]. Advances in Water Science, 24(5): 518–525 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhicheng, Fang Gonghuan, Zhan, Hui, Li Wanjiang, Chen Yaning, Zhou Honghua. 2018. Analysis of hydrometeorological variations based on the sounding and near-surface observations in the Aksu River Basin [J]. Climate Change Research, 14(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Heigang, Han Chunxian. 2006. The relationship between traffic line change and the environment of southern Tarim Basin in historical period[J]. Human Geography, 21(6): 40–44 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xueying, Zhang Qinqin, Zhang Sicong, Gu Fang. 2019. Monitoring research on glaciers and perennial snow change in Xinjiang from 2005 to 2015 [J]. Geospatial Information, 17(8): 36–39 (in Chinese with English abstract).
- Yin Lihe, Xu Dandan, Jia Wuhui, Zhang Xinxin, Zhang Jun. 2021. Responses of phreatophyte transpiration to falling water table in hyper-arid and arid regions, Northwest China[J]. China Geology, 4(3): 410–420.
- 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).
- Yin Qing. 1987. Historical investigation of the Hotan stream systems and oasis evolution and the account of the two main roads through the south and north of the Taklamakan Desert[J]. Social Sciences in Xinjiang, (5): 79–91 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Yanyan, Zhou Jinlong, Li Qiao, Zhao Jiangtao, Meng Qi. 2015. Assessment of groundwater quality and pollution in Ruoqiang and Qiemo region of Xinjiang [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 38(1): 72–78 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guangpeng, Xu Hailiang, Du Qing, Bai Yufeng, Wei Maosheng. 2015. Comparative study and prediction of nonlinear temporal and spatial variation of precipitation in Tarim River basin [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 26(2): 58–63 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zonghu, Li Lierong. 2004. Groundwater Resources in China (Xinjiang Volume)[M]. Beijing: Sinomaps Press(in Chinese).
- Zhao Jiangtao, Zhou Jinlong, Gao Yexin, Luan Fengjiao, Li Qiao, Du Liangming. 2016. Assessment of organic pollution and study on pollution cause of groundwater in the plain area of Yanqi Basin, Xinjiang [J]. China Environmental Science, 36(1): 117–124 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenyong, Sun Dong, Lin Qiuhua, Cui Songsa, Li Gang, Luo Hui, Zhang Ke, Tian Changyan. 2020. Research progress on multipurpose utilization on Suaeda salsa[J]. Soil Science, 8(4): 164–168 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jinlong, Liu Feng, Hou Jiangtao, Zhong Ruisen. 2006. Calculation of ecological water use of natural vegetation in non-irrigated area of Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 20(4): 162–165 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jinlong, Wu Bin, Wang Yiping, Guo Xiaojing. 2009. Distribution and quality assessment of medium salinity groundwater in plain areas in Tarim Basin, Xinjiang[J]. China Rural Water and Hydropower, 9: 32–36 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Wanwan, Shangguan Donghui, Guo Wanqing, Xu Junli. 2014. Glaciers in some representative basins in the middle of the Tianshan Mountains: Change and response to climate change[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 36(6): 1376–1384 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白元,徐海量,凌红波,王希义. 2014. 塔里木河干流区天然植被的空间分布及生态需水[J]. 中国沙漠, 34(5): 1410-1416.
- 常玉婷,范武刚,安海燕. 2021. 新疆干旱区地表水环境质量变化趋势分析[J]. 干旱环境监测, 35(2): 75-81.
- 陈青青,陈超群,杨志勇,冯杰. 2017. 阿克苏河径流演变及其对气候变化的响应[J]. 水资源与水工程学报, 28(1): 88-93.
- 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,朱成刚. 2018. 科技支撑新疆塔里木河流域生态修复及可持续管理[J]. 干旱区地理, 41(5): 3-9.
- 陈亚宁,徐长春,郝兴明,李卫红,陈亚鹏,朱成刚. 2008. 新疆塔里木河流域近50a气候变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 30(6): 921-929.
- 邓铭江. 2005. 新疆水资源及可持续利用[M]. 北京:中国水利水电出版社.
- 邓铭江. 2009. 中国塔里木河治水理论与实践[M]. 北京:科学出版社.
- 邓铭江. 2016. 南疆未来发展的思考—塔里木河流域水问题与水战略研究[J]. 干旱区地理, 39(1): 1-11.
- 傅丽昕,陈亚宁,李卫红,徐长春,何斌. 2009. 近50a来塔里木河流域区年径流的持续性和趋势性统计特征分析[J]. 冰川冻土, 31(3): 457-463.
- 高凡,黄强,闫正龙. 2010. 基于3S的塔里木河干流生态水平动态监测及生态需水研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 38(1): 188-194.
- 胡顺军. 2007. 塔里木河干流流域生态—环境需水研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学.
- 霍天赐,颜伟,马晓飞. 2020. 内陆河尾间湖泊水域面积变化及驱动因素研究—以台特玛湖地区为例[J]. 国土资源遥感, 32(3): 149-156.
- 贾宝全,慈龙骏. 2000. 新疆生态用水量的初步估算[J]. 生态学报, 20(2): 243-250.
- 姜红,玉素甫江·如素力,热伊莱·卡得尔,阿迪来·乌甫. 2017. 基于神经网络模型的干旱区绿洲土壤盐渍化评价分析[J]. 地球信息科学学报, 19(7): 983-993.
- 李和平,樊自立,刘校明,贾长录. 2000. 新疆宜农后备土地资源划分与评价[J]. 干旱区地理, 23(4): 337-343.
- 李江,龙爱华. 2021. 近60年新疆水资源变化及可持续利用思考[J]. 水利规划与设计, 33(7): 1-7.
- 李江,柳莹,吴涛,彭兆轩. 2020. 新疆水库大坝70年建设成就[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 18(5): 322-330.
- 李龙,姚晓军,刘时银,卜亚平,宫鹏,李晓锋. 2019. 近50年丝绸之路经济带中国境内冰川变化[J]. 自然资源学报, 34(7): 1506-1520.
- 李文鹏,郝爱兵,刘振英. 2000. 塔里木盆地地下水开发远景区研究[M]. 北京:地质出版社.
- 林炜,褚丽. 2018. 河道内生态需水量研究[J]. 山西建筑, 44(14): 211-212.
- 柳威,许有鹏,黄云. 2005. 气候变暖对新疆降水和径流的影响分析[J]. 干旱区地理, (5): 597-602.
- 满苏尔·沙比提,楚新正. 2007. 近40年来塔里木河流域气候及径流变化特征研究[J]. 地域研究与开发, 26(4): 97-101.
- 穆振侠,姜卉芳. 2012. 新疆阿克苏河流域昆马力克河积雪消融规律对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 34(6): 1284-1292.
- 倪明霞,段峥嵘,夏建新. 2022. 新疆南疆周边高山冰川融化及其未来水资源安全风险[J]. 山地学报, 40(3): 329-342.
- 帕提古丽·热合曼. 2018. 新疆博斯腾湖水质评价[J]. 广西水利水电, 182(2): 104-106.
- 乔西现. 2003. 关于塔河流域近期综合治理若干问题的思考[J]. 中国水利, (5): 39-40.
- 秦鹏,赵成义,盛钰,董义阳. 2016. 近54年渭干河流域径流变化特征及影响因素分析[J]. 水文, 36(2): 85-91.
- 孙英,周金龙,杨方源,纪媛媛,曾妍妍. 2022. 塔里木盆地南缘绿洲带地下水砷氟碘分布及共富集成因[J]. 地学前缘, 22(1): 1-18.
- 唐治,杨志华,曹占洲,盛洪峰. 2014. 南疆环塔里木盆地林果种植区近50a气候变化特征及对果树生长的影响[J]. 农业网络信息, (4): 27-31.
- 王璞玉,李忠勤,周平,金爽,陈辉. 2014. 近期新疆哈密代表性冰川变化及对水资源影响[J]. 水科学进展, 24(5): 518-525.
- 王志成,方功焕,张辉,李万江,陈亚宁,周洪华. 2018. 基于高空与地面观测的阿克苏河流域气候水文要素变化分析[J]. 气候变化研究进展, 14(1): 1-10.
- 熊黑钢,韩春鲜. 2006. 历史时期塔里木盆地南缘交通线路变迁与环境的关系[J]. 人文地理, 21(6): 40-44.
- 鄯雪英,张琴琴,张思聪,顾芳. 2019. 2005-2015年新疆冰川与常年积雪变化监测研究[J]. 地理空间信息, 17(8): 36-39.
- 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.
- 殷晴. 1987. 和田水系变动和绿洲兴衰的历史考察—兼述穿越塔克拉玛干沙漠的两条南北通道[J]. 新疆社会科学, (5): 79-91.
- 曾妍妍,周金龙,李巧,赵江涛,孟奇. 2015. 新疆若羌—且末地区地下水质量与污染评价[J]. 新疆农业大学学报, 38(1): 72-78.
- 张广朋,徐海量,杜清,白玉锋,魏茂盛. 2015. 塔里木河流域降水量的非线性时空变化对比研究及预测[J]. 水资源与水工程学报, 26(2): 58-63.
- 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.
- 赵江涛,周金龙,高业新,栾凤娇,李巧,杜明亮. 2016. 新疆焉耆盆地平原区地下水有机污染评价及污染成因[J]. 中国环境科学, 36(1): 117-124.
- 赵振勇,孙栋,蔺秋花,崔松山,李刚,罗会,张科,田长彦. 2020. 盐地碱蓬综合利用研究进展[J]. 土壤科学, 8(4): 164-168.
- 中华人民共和国水利部. 2020. 中国水资源公报[M]. 北京:中国水利水电出版社.
- 周金龙,刘丰,侯江涛,钟瑞森. 2006. 新疆平原非灌区自然植被生态耗水量的计算[J]. 干旱区资源与环境, 20(4): 162-165.
- 周金龙,吴彬,王毅萍,郭晓静. 2009. 新疆塔里木盆地平原区中盐度地下水分布及其质量评价[J]. 中国农村水利水电, 9: 32-36.
- 朱弯弯,上官冬辉,郭万钦,许君利. 2014. 天山中部典型流域冰川变化及对气候的响应[J]. 冻土, 36(6): 1376-1384.