

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.001

# 西北旱区水文水资源科技进展与发展趋势

黄 强,孟二浩

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘 要:** 西北旱区水资源短缺,生态环境脆弱,严重制约了社会经济可持续发展和生态环境良性循环。尤其是在变化环境下,全球气候变暖加快了冰川融化速率,西北旱区的水文要素和水资源都发生了剧烈变化。因此,综述西北旱区水文水资源科技进展与发展趋势具有重要的意义。本文在大量查阅国内外水文和水资源科技研究文献的基础上,简述了西北旱区水文水资源特点和存在问题,对水文水资源科技进展进行了较系统总结;同时,指出了旱区水文水资源科技的发展趋势,可为进一步研究旱区水文水资源关键学科问题和关键技术提供有益参考。

**关键词:** 西北旱区;水文科技;水资源科技;变化环境;发展趋势

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)03—0001—09

## Research Progress and Development Trends of Hydrology and Water Resources in Northwest Arid Regions

HUANG Qiang, MENG Erhao

(State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic in Northwest Arid Region of China,  
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** The shortage of water resources and the fragile ecological environment has seriously restricted the sustainable development of social economy and the virtuous cycle of ecological environment, in the northwest arid region, especially in the changing environment. Global warming has accelerated the melting rate of glaciers, and the hydrology and water resource have undergone drastic changes in the northwest arid region. Therefore, it is of great significance to summarize the progress in science and technology and development trends of hydrology and water resources in northwest arid region. Based on the study of a large number of progress in science and technology and development trends of hydrology and water resources at home and abroad, the main research objectives of this paper are to: analyze the characteristics and existing problems of hydrology and water resources in the northwest arid region, systematically summarize the progress in science and technology of hydrology and water resources, points out the development trend of hydrology and water resources in the northwest arid region, which can provide beneficial reference to further study the problems of hydrology and water resources in the northwest arid region.

**Keywords:** Northwest arid region; hydrology science and technology; water resource science and technology; changing environment; development trend

我国西北干旱区位于东经 73°~106°和北纬 35°~50°,包括新疆全境、宁夏回族自治区和内蒙古自治区的绝大部分,甘肃河西走廊、青海柴达木盆地,以及山西、河北和陕西等省的部分地区<sup>[1]</sup>。

西北旱区大部分地区平均降水量在 400 mm 以

下,自东向西由 400 mm 以下一直减少到 50 mm 以下。蒸发量高达 1 000 mm~2 800 mm,降水少而蒸发大,使得西北地区具有水资源稀缺的特点。西北干旱区的水资源量为 1 303 亿 m<sup>3</sup>,约占全国总量的 5.7%,土地面积约为全国总面积的 35.9%,每平方

公里水资源仅为  $7.36 \text{ 万 m}^3$ , 约为全国平均水平的  $1/5$ 。

西北旱区水文水资源特点主要有水资源时空分布极其不均, 年际、年内变化大, 7 月—9 月径流量占年径流量的 70% 以上, 且丰、枯水年水量相差悬殊, 通常两者比值达 5 倍~10 倍, 个别水文站的比值高达几十倍<sup>[2]</sup>。旱区水文水资源系统特征主要表现在:

(1) 水系、降雨特征。绝大多数水系发源于高山地区, 然后向盆地汇集, 形成“向心式”水系。内陆干旱区地处欧亚大陆腹地, 远离海洋, 气候干燥, 蒸发强烈, 造成水资源极度匮乏; 山区降雨多、平原区降水稀少, 使得水资源分布极不均匀, 给水资源开发利用带来困难。因此, 在揭示水文水资源基本规律的基础上, 进行水文预测、预报, 利用水利工程合理调配水资源是一项宏观战略。

(2) 水循环特征。山区是产流区, 98% 的水资源形成于山区降水; 平原区产流较少, 年平均降水量在  $150 \text{ mm}$  以下, 是水资源主要扩散与消耗区, 地下水 80% 来自地表水转化补给。因此, 研究三水转化规律是首要任务。

(3) 农业经济特征。农业以灌溉为主、耗水量大, 形成了独特的“灌溉农业, 荒漠绿洲”模式。因此, 水利不仅是农业也是国民经济的命脉, 研究水资源高效利用已成为热点。

(4) 生态系统特征。由于水资源短缺, 所以大部分地区生态环境十分脆弱。干旱区内陆河流域生态呈现干湿交替带、农牧交错带、森林边缘带, 以及沙漠边缘带等多种形式的生态环境脆弱带, 生态系统极度脆弱性, 使其对水土资源开发响应强烈。因此, 在变化环境下, 识别旱区内陆河流域生态水文过程变化, 考虑生态的水资源合理配置是研究的难点问题。

西北干旱区水文及水资源系统存在的问题主要有: 水资源匮乏且时空分布严重失衡、水资源利用效率低、节水意识和措施不到位、生态环境恶化、人工绿洲与天然绿洲结构严重失调, 跨界河流水资源开发利用失控, 干旱和洪水并存的水安全问题突出等。

同时, 西北干旱区是对全球气候变化响应最敏感的地区之一<sup>[3]</sup>。多种模型模拟结果显示, 如果  $\text{CO}_2$  的排放量以每年 1% 的速度递增, 中亚干旱区平均温度的上升将超过全球平均上升水平的 40%<sup>[4]</sup>。在全球变暖的大背景下, 西北干旱区以冰雪融水为基础的水资源系统变得更加脆弱。随着人口压力的

不断增加和不合理的水资源开发活动的不断扩大, 西北干旱区绿洲经济与荒漠生态两大系统的水资源供需矛盾也将更加尖锐<sup>[5]</sup>。

综上所述, 研究干旱区的水文水资源问题和关键技术是十分迫切, 也是十分必要的, 对支撑社会经济可持续发展、生态环境良性循环具有重要意义。

## 1 水文科技进展

变化环境下, 大气和陆面水循环发生了明显变化, 西北干旱区的降水趋势也发生了变化, 极端降水事件出现的概率增大, 洪水的风险增加, 干旱的发生几率也在增加。同时, 气候变化也导致了水文系统出现变异现象, 水文一致性假设不复存在。因此, 亟待研究变化环境下水文基础学科问题。在中国科学院及中国自然科学基金的支持下, 已经开展了“黑河重大计划”、“变化环境下工程水文计算的理论与方法”、“中国气候与海面变化及其趋势和影响研究”重大项目等, 并取得了丰富的研究成果<sup>[6]</sup>。

水循环系统是气候系统的重要组成部分, 气候变化必然引起水资源的时空变化, 尤其是西北干旱地区流域, 径流对气候的微小变化和波动非常敏感。中国西北干旱区生态系统十分脆弱, 稳定性不高, 容易受到各种自然因素和人为因素的影响, 对全球变化极为敏感。在区域气候暖湿化背景下, 西北旱区以山区降水和冰雪融水补给为主的水资源系统更为脆弱。气温升高加速了山区冰川消融和退缩, 改变了水资源的构成, 加剧了水资源的波动性和不确定性。在气候变化的作用下, 西北干旱区独特的水文过程也发生了明显变化。研究表明, 1961 年以来西北干旱区呈现明显暖湿化趋势, 其中冬季增温最快, 夏季降水增加速率最大。如新疆的伊犁河谷、塔城等地区增温趋势最大, 北疆降水量增加最多。受气候变暖导致冰雪快速消融和山区降水增加的影响, 西北干旱区西部的黑河、疏勒河、塔里木河出山口径流量显著增加; 而东部的石羊河和渭河径流的补给主要靠降水, 降水的减少导致径流呈现下降趋势<sup>[7]</sup>。

IPCC 第五次气候变化评估报告指出: 过去半个多世纪以来, 全球几乎所有地区都经历了升温过程<sup>[8]</sup>, 变暖最快的区域为北半球中纬度地区包括中国西北干旱区<sup>[9]</sup>。西北干旱区径流主要来源于山区降水和冰雪融水, 河川径流对冰川(积雪)的依赖性较强, 气温升高加速了冰川融化使冰川水资源变得复杂, 冰雪水文模型能够更好的研究变化环境下冰雪径流的变化情况。Murray 等<sup>[10]</sup>在 1995 年提出了

一个低阶的非线性差分方程来描述冰川下部汇流过程,随后,Com等用人工智能方法(遗传算法、神经网络、模糊数学等)改进了Murray和Clarke提出的模型算法。Come等<sup>[11]</sup>将一种类似电路分析的概念性集总模型应用到冰川融化汇流计算中。Arnold等<sup>[12]</sup>把美国环保局开发的雨洪管理模型SWMM(storm water management model)中的管网汇流子系统引入分布式冰川模型中。Luo等<sup>[13]</sup>提出了模拟冰川面积变化的动态HRU(Hydrological Response Unit)概念,并利用HRU模拟了冰川面积渐变的过程和冰川物质积累、消融和蒸发的过程。同时,Luo等<sup>[14]</sup>提出了“双库”基流算法,模拟雪冰补给河流丰水期快速消退,枯水期保持长时间相对稳定的径流过程形态,模拟效果显著提高,实现了西北干旱区内陆河流域包含雨、雪、冰三个元素的产流过程的分布模拟。中国冰雪水文模型发展较晚,较国外的理论和模型都有所欠缺,目前还没有开发出被国际认可的冰雪水文模型,冰川产流模块研究成为西北干旱区水文模型中不可或缺的一部分<sup>[5]</sup>。我国西北干旱区冰雪模型开发重点一方面应集中在冰川和降雪数据基础数据的收集和积累;另一方面应结合遥感技术和GIS手段进行尺度转换,加强冰川内部水热耦合理论研究和水分迁移理论研究,构建适合西北干旱区的分布式冰雪水文模型。

旱灾是制约中国西北地区社会经济发展、农业生产和生态文明建设的重要自然灾害,而且随着气候变暖西北地区极端干旱事件发生频率和强度均呈增加趋势,影响不断加重<sup>[15]</sup>。随着西北地区社会经济的发展 and 生态文明建设的不断推进,该地区对干旱预警能力的依赖性日益增加,提高西北干旱区干旱预测能力以有效应对干旱危害,已经成为变化环境下西北干旱区亟待解决的重要科学问题。干旱预测研究的基础是干旱指数,在干旱指数研究方面,通常利用气象、径流和土壤湿度等资料,或用卫星遥感资料来建立不同的干旱指数。据世界气象组织统计,常用的干旱指数多达55种,如降水距平百分率、Palmer干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)、标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)、标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)、相对湿润度指数、综合气象干旱指数(Compound Index, CI)等。Mo等<sup>[16]</sup>利用多模型集成的方法对全球SPI进行了预测研究。Madadgar等<sup>[17]</sup>构建了一种统计——动力混合模型对美国西南的气象干旱进行了预测研究。杨肖丽

等<sup>[18]</sup>利用统计降尺度和SPI对黄河流域气象干旱进行了预测研究。西北干旱区干旱预测研究起步较晚,但干旱相关理论的研究已经比较完备,为干旱预测研究提供了有力的理论支撑。西北干旱区干旱预测研究的重点一方面应继续研究西北干旱区干旱特征,构建精准的干旱指标;另一方面应借鉴径流预测相关理论,构建适合西北干旱区的干旱预测模型。

洪水灾害是一种不容忽视的自然灾害。变化环境下,西北干旱区极端降水事件出现的概率增大,洪水的风险增加,提高西北干旱区洪水预报能力能够有效减少因洪灾引起的经济损失。洪水预报的理论基础是洪水演算和汇流理论。初期的洪水预报以“经验相关线”为典型代表,此方法简单实用,但预报精度不稳定,预报精度因人而异<sup>[19]</sup>。随着对水文过程认识的加深,开发了基于水文概念的物理模型,如中国的“新安江模型”、美国的“斯坦福模型”及“萨克拉门托模型”等<sup>[20-21]</sup>。此类模型参数较多,对数据的依赖性较强,精度不能满足实际精度要求,因此在实践中很难进行推广<sup>[22]</sup>。20世纪80年代初,日本提出了一种纯数学模型——“坦克模型”,它通过多个线性水箱的串、并联来模拟径流的运动,但此模型仍属于线性模型且在功能结构设计方面比较欠缺,难以准确、全面地模拟复杂的降雨径流形成过程,如对季节性气候变化强的流域以及人类活动干扰明显的流域的洪水预报就存在一定的问题<sup>[23]</sup>。随后具有物理意义的分布式水文模型被提出并得到了发展。丹麦、法国和英国的水文学者们联合开发并改进了SHE模型,开启了分布式水文模型研究的先河<sup>[24]</sup>。然后,SWAT模型、THALES模型、HEC模型、VIC模型等大批分布式水文模型相继被开发出来,为洪水预报提供了新的研究空间。随着计算机技术的高速发展,人工智能算法也为洪水预报提供了新的空间,BP、SVM、ARMA等也被广泛应用到西北干旱区的洪水预报<sup>[25]</sup>。变化环境下,西北干旱区洪水预报研究重点一方面应尝试将水文模型与气象模型耦合,利用雷达观测降雨分布,对未来段时间的降雨进行预报,结合降雨预报利用水文模型进行洪水预报;另一方面应尝试先进的机器学习算法进行洪水预报。同时,洪水调度、洪水资源化、水库的旱限水位等已成为研究的热点问题。

生态水文过程是指水文过程与生物动力过程之间的功能关系<sup>[26]</sup>,它是揭示生态格局和生态过程变化水文机理的关键<sup>[27]</sup>。不同于传统水文学,生态水文过程研究更重视不同生态系统及其变化与水文过

程间相互关系的探讨。生态水文过程主要包括生态水文物理过程、化学过程及其生态效应。生态水文物理过程主要是指植被覆盖和土地利用对降雨、流域产汇流、蒸发、径流等水文要素的影响;生态水文化学过程主要指水质及水污染研究,生态效应研究主要包括植被生长和分布受水文要素的影响研究。西北干旱区具有明显的特点,高山冰川、森林草原、平原绿洲和戈壁荒漠构成了一个干旱区复合生态系统,生态系统要素之间相互依存,相互制约,水资源是维持该符合生态系统的纽带。此外,在旱区人类活动引起的荒漠化和绿洲化同时发生。因此,西北旱区生态水文过程具有特殊复杂性<sup>[28]</sup>。干旱区生态水文过程已初步开展研究,在水文方面已经基本掌握了内陆河流域黑河和塔里木河的生态水文循环过程的时空分布和变化规律<sup>[29]</sup>,在干旱区植物水分生理方面对主要植物的耐旱性和林地的土壤水分已有较为清楚的认识<sup>[30]</sup>。西北旱区生态水文过程的研究,应加强干旱区天然植被格局及其生态水文学机制、具有水力提升功能的植物识别、确定植物吸收的水分来源、计算不同尺度的生态需水量,以及主要植被类型的生态地下水位等方面的研究<sup>[31]</sup>。

西北旱区国际河流众多,它们几乎都位于新疆。北疆拥有中国唯一属于北冰洋水系的额尔齐斯河,它与哈萨克斯坦及俄罗斯相连;乌伦古河上游部分河水来自蒙古;额敏河水流入哈萨克斯坦的阿拉湖;发源于新疆的伊犁河流入哈萨克斯坦的巴尔喀什湖;其支流霍尔果斯河为界河。南疆也有很多国际河流,其中阿克苏河上游支流昆马力克河与托什干河的上游部分径流来自吉尔吉斯斯坦;克孜河上游部分水量也来自吉尔吉斯斯坦;帕米尔阿克苏河流入吉尔吉斯斯坦。虽然西北旱区拥有较多的国际河流,但主要的国际河流只有额尔齐斯河、伊犁河和阿克苏河。这三条国际河流的径流补给来源呈多样化,除了雨水、地下水补给,还包括高山冰雪融水和季节积雪融水。国际河流开发应坚持可持续发展的战略,对三个流域的水资源要保护和利用同时进行,以保证水资源的永续利用和发展<sup>[32]</sup>。

水、能源和粮食均是人类生存发展必不可少的资源,三者相互依存,联系紧密<sup>[33]</sup>。在人口增长、环境恶化、资源短缺、气候变化影响加剧的背景下,西北干旱地区水-能源-粮食之间的相互关系显得日益重要,如何保障水安全、能源安全和粮食安全是复杂的系统性问题<sup>[34]</sup>。当前,国内外在水-能源-粮食协同优化领域的研究尚处于起步阶段,主要成果

包括:揭示了能源和粮食生产与水资源消耗之间的关联关系与反馈机制<sup>[35-39]</sup>,构建了水-能源-粮食的分析框架<sup>[40-42]</sup>,探索了互动关系模拟分析方法,提出了应对水-能源-粮食系统风险的措施<sup>[43-45]</sup>,并从作物品种改良<sup>[46]</sup>、用水效率改进<sup>[47-49]</sup>、水权交易<sup>[50]</sup>、水足迹和虚拟水贸易<sup>[51-53]</sup>等方面探讨了解决问题的途径。然而,水-能源-粮食之间存在复杂的相互作用和纽带关系,以往研究大多侧重于水-能源、水-粮食两两之间关系的改善,而忽视了水-能源-粮食之间的互馈关联作用,对三者之间纽带关系的定量揭示和整体优化研究较少,尤其是针对一路一带的水-能源、水-粮食问题,水文系统演化规律和水安全保障等涉足较少;同时,在系统优化方法和协同建模技术等方面研究不足<sup>[54]</sup>。

总的来说,西北旱区水文科技研究已取得长足进展。但是,由于水文资料短缺、监测手段相对落后、高科技应用不足等,还有许多基础科学问题没有得到解决,水文科技的含量及贡献也有待提高。

## 2 水资源科技进展

由于气候变化和人类活动的影响,西北整个地区呈现干旱化的趋势。研究表明 20 世纪以来,全球气候变暖,中国西北地区变暖显著,尤其是冬季升温明显。导致以冰川融水补给为主的河流将经历初期流量增加,后期大幅度减少的过程。西北干旱区水资源在空间上和时间上分布不均,在空间上水资源呈现出北多南少,西多东少的分布规律;在时间上,夏季降水占全年降水的 80% 左右。所以,西北旱区可用水量极为短缺,尤其是西北经济发达地区,缺水的矛盾日益尖锐。因此,开源节流、发展节水技术和跨流域调水是缓解水资源短缺的重要手段。同时,水资源合理配置和科学调控可以使水资源发挥最大综合利用效益。

西北大部分地区水资源开发利用程度已超过 40% 的国际警戒线,开源潜力不大,必须全面建立节水型社会,以水资源的可持续利用来促进区域可持续发展<sup>[55]</sup>。农业是西北干旱区的用水大户,应大力挖掘农业节水潜力,提高农业用水效率。实现农业节水必须要做到工程和管理两手抓。工程方面应推行节水灌溉,改造有节水潜力的大型灌区,提高农业用水有效利用系数。管理方面,进一步完善西北地区黄河干流、黑河干流和塔里木河干流等水资源统一调度,以提高水资源的合理配置。同时,应适

当压缩耗水量大的农作物种植面积,发展特色农业,节约西北旱区宝贵的水资源。面对西北地区严峻的水资源短缺问题,还应调整工业结构,发展节水型工业。并在保障生活用水质量的前提下,实施用水定额控制管理制度,实行分段水价政策,鼓励节约用水。西北干旱区建设节水型社会仍面临一些问题,针对旱区水资源极度短缺的问题,一方面,应继续加大农业节水宣传和农业节水科技的研究提高西北地区农业用水有效利用系数;另一方面,应提高污水处理率和再利用率,鼓励“中水”回用,并积极推广节水型器具。

跨流域调水指修建跨越两个或两个以上流域的引水(调水)工程,将水资源较丰富流域的水调到水资源紧缺的流域,以达到地区间调剂水量盈亏,是解决缺水地区水资源需求的一种重要措施。据统计,目前世界上的调水工程有160余项。中国古代修建的京杭大运河是世界上最早的跨流域调水工程。近代,还修建了甘肃省的引大入秦跨流域灌溉工程、山东省的引黄济青工程、广东省的东深供水工程和陕西省的引汉济渭调水工程等。南水北调东中线工程是目前最大跨流域综合开发利用的调水工程,它解决了中国北方缺水的问题,增加了水资源承载能力,提高了资源的配置效率,使得中国北方地区逐步成为水资源配置合理、水环境良好的节水、防污型社会,并有利于缓解水资源短缺对北方地区城市化发展的制约,促进当地城市化进程。跨流域调水能有效解决西北旱区水资源空间分布不均的问题。在建的陕西省引汉济渭工程是从汉江流域调水至渭河流域的关中地区,解决陕西省关中地区水资源短缺,促进陕西省内水资源优化配置,改善渭河流域生态环境,是促进关中地区经济发展的大型跨流域调水工程。

然而,西北旱区水资源短缺,在旱区内修建跨流域调水工程的同时,也要进行水资源合理配置研究,以提高西北旱区水资源利用效率,使西北旱区成为环境良好的节水、防污型区域。水资源合理配置是指在流域或特定的区域范围内,遵循有效性、公平性和可持续性的原则,利用各种工程与非工程措施,按照市场经济的规律和资源配置准则,通过合理抑制需求、保障有效供给、维护和改善生态环境质量等手段和措施,对多种可利用水源在区域间和各用水部门间进行的配置。水资源合理配置起源于20世纪40年代Masse提出的水库优化调度问题<sup>[56]</sup>。20世纪50年代之后,随着系统分析与优化技术的引进和

60年代计算机技术的发展,水资源系统模型技术得到了迅速发展。随着系统分析理论的发展,优化技术的引入以及计算机技术的发展,水资源系统模型和优化模型的建立、求解和运行的研究与应用工作得到了不断提高。20世纪90年代以来,由于水污染、水危机的加剧,以水量和经济效益最大为目标的传统水资源配置已经不能适应新形式的发展。国外开始在水资源优化配置中考虑水质约束、环境效益和水资源可持续利用<sup>[57]</sup>。国内水资源配置方面的研究起步较晚,但发展迅猛。20世纪60年代就开始了以水库优化调度为先导的水资源分配研究,最早是以发电为主的优化调度。70年代以来,以水资源规划和管理为目标,从单一的经济目标转到还要同时考虑社会、环境要求的多目标上来。到了80年代,区域水资源的优化配置问题在我国开始引起重视。90年代以后,计算机技术快速发展,使长系列月尺度的模拟计算得到普遍应用,水资源配置至此进入快速发展阶段<sup>[58]</sup>。西北旱区水资源合理配置的研究重点一方面应注重雨水、中水回用问题;另一方面应注重点源污染和面源污染对配置水质的影响。

西北旱区水资源年内分配集中度高,降雨主要集中在7月—9月,汛期径流量占全年径流量的80%。为缓解西北旱区水资源供需矛盾,减少洪水灾害,开展旱区雨洪利用具有十分重要的意义<sup>[59]</sup>。雨洪利用是指在保证防洪和生态安全的前提下,综合利用工程措施、技术和管理手段,对雨水和洪水实施拦蓄、滞留和调节,将雨水和洪水适时适度地转化为可供利用的水资源,用于流域经济、社会、生态和环境的用水需求<sup>[60]</sup>。目前,洪水资源化的方式主要是坚持点(水库、闸坝)、线(河渠、堤防)、面(蓄滞洪区、田间、地表)兼顾,工程措施、非工程措施、管理措施并重,蓄、泄、滞、引、补有机结合,通过科学调度,在保证防洪安全的前提下,充分利用洪水资源,达到防洪减灾、增加水资源和改善生态环境的目的<sup>[61]</sup>。工程措施是指通过水利工程和水保工程,实施延缓洪水在陆地停留时间的手段。洪水资源利用涉及绝大多数的水利工程,如水库工程、河道整治工程、拦河闸坝工程、蓄滞洪区建设工程、农田水利工程、水土保持工程等。非工程措施是指在现有工程基础上,通过科学规划和合理调度,科学合理地拦蓄洪水资源,延长其在陆地的时间,及时满足社会经济及生态环境的需水要求,补充回灌地下水<sup>[62]</sup>。雨洪水资源利用的非工程措施包含了水利工程调度与管理的

大多数措施,如水库分期洪水调度技术、洪水预测预报技术、水库预泄与水系河网联调技术、蓄滞洪区主动运用等,还有诸如土地利用规划和工农业城市用水规划,通过天然地形地貌和水土保持规划充分利用雨水资源,实施洪水保险系统和灾害救援系统等<sup>[63]</sup>。西北旱区水资源短缺,各地对于雨洪利用有较高的积极性,近年来已经取得了不少成效,既增加了旱区可用水量,又在一定程度上改善了河道生态环境。

西北旱区修建了大量的水利工程,基本进入后坝工时代。水利工程在一定程度上缓解了工程性缺水问题,但水库的调节也改变了河流的天然径流模式,扰乱了河流的水量时空分布,使水库下游河道的流量减少,甚至断流,对河流的生态多样性产生了负面影响<sup>[64]</sup>。开展水利工程调度与调控,是水资源科学管理的重要措施之一。早在 20 世纪 40 年代 Ward 等<sup>[65]</sup>就强调了将河川径流作为生态因子的重要性。随着人类对河流生态重要性认识的不断加深,国内外对生态调度开展了大量的研究。国外主要从两个方面研究水库的生态调度:一是,开展水库优化调度研究;二是,在水库优化调度中考虑河流生态环境,开展水库的生态优化调度研究。国内学者针对特定水库构建了生态调度模型,这些生态调度模型可以为两种形式:一种是将生态目标作为水库调度多目标问题的目标之一;一种是将河流的生态需水作为模型的约束条件<sup>[66]</sup>。生态调度研究包括基于生态的水量调度、泥沙调度、水质调度和其它生态因子调度。随着生态调度研究工作的不断完善和生态调度实践工作的不断发展,找准水库调度中社会经济目标和生态目标的结合点,实践水库的综合调度,将成为水库调度领域一个全新的模式。

西北干旱地区缺水严重,河流生态系统退化和地下水超采问题极为突出<sup>[67]</sup>。地区水问题并存,叠加和积累影响越来越严重,实行最严格水资源管理制度迫在眉睫<sup>[68]</sup>。西北内陆河流域在水资源管理方面存在诸多问题,如水资源管理体制不顺,分配职责不清;各级水务部门考核制度缺失;水资源管理责任体系不健全,考核责任难落实;公众参与管理责任和考核制度的制定和实施程度不高等问题。解决西北干旱区水资源管理存在的问题,需要建立完善的法律体系和明确的法律规定。完善的法律体系是促进制度有效实行的根本保障,明确的法律规定可以保证相关制度得以切实执行。因此,在西北内陆河流域实行最严格水资源管理制度的根本在于健全完

善相关的法律制度,以法律制度的推行促进最严格水资源管理制度的具体化和可操作化。最严格水资源管理制度是解决西北内陆河流域人口、水资源与发展的矛盾战略举措和重大法律制度,“三条红线”和“四项制度”、“河长制”是核心,而“四项制度”中水资源管理的责任和考核制度既是最严格水资源管理制度的主要制度之一,又是其它制度落实的关键保障。同时,西北地区气候特殊,水系复杂,随着经济社会的发展,河湖管理保护新老问题交织,如河湖水域面积萎缩、岸线乱占滥用、水体质量恶化和生态环境退化等问题。针对河湖管理出现的以上问题,各地积极探索河长制,推进河长制的建立。河长制主要任务包括:水资源保护、水域岸线管理保护、水污染防治、水环境治理、水生态修复和执法监督<sup>[69]</sup>。西北地区实行河长制应坚持问题导向,因地制宜,立足不同地区不同河湖实际,统筹上下游、左右岸,实行一河一策、一湖一策,提升针对性和可操作性。实行一河一策、一湖一策要做到针对河湖存在的突出问题;与已有的规划以及最严格水资源管理、河湖管理、水污染防治等计划相协调;河流上下游、左右岸目标措施要协调;便于组织实施、检查监督和考核问责。同时,应健全涉河法规体系;严禁涉河违法活动;法规体系强化日常巡查监管;落实经费保障以建立河湖管理保护长效机制。

总的来说,西北旱区水资源科技研究已取得长足进展,修建了众多的水利工程和跨流域调水工程,初步进入后坝工时代,已开展了节水,水资源评价、配置、调控和调度与科学管理等研究。但是,还有许多水利工程没有开展这方面的研究,研究的面、深度有待加大,尤其是按照最严格的水资源管理,实行“三条红线”控制、落实河长制等还有许多新问题没有得到解决,水资源科技的深度、广度、推广应用也有待提高。

### 3 发展趋势

西北旱区水文水资源科技研究应注重基础和应用研究,识别变化环境下旱区水文变异规律和河川径流演变规律,模拟、预测其水文生态过程,构建洪旱防灾体系及技术,提出雨洪利用和节水技术,开展跨流域调水、生态流域建设,高效利用和科学管理水资源等将成为旱区水文水资源科技研究的一个重要发展趋势。

西北旱区水文水资源变化十分复杂,除了采用理论方法研究外,应结合野外观测、实验手段才能理

清水文水资源演变规律,为进一步开发利用水资源提出支撑。西北旱区水资源短缺问题一直制约着社会经济和生态文明建设,旱区水文水资源科技研究应突出解决生产实际问题,将科研转化为旱区生产力将是重要的发展趋势。

针对西北旱区水资源短缺、生态环境脆弱、自然灾害危害严重、农业用水矛盾突出、水资源开发利用高等问题,急需研究并构建5大体系:

(1) 供水安全保障体系,以水资源合理配置和高效利用为重点,满足经济社会发展、产业结构调整 and 重大战略布局对水的需求。

(2) 生态环境安全保障体系,坚持人与自然和谐、生态修复与综合治理相结合的原则,统筹协调生态环境和经济社会两大系统的耗用水量,明确生态水权,保障生态用水安全,确保河道生态径流要求,维护河流健康,治理水土流失,保护和改善生态环境。

(3) 防洪抗旱安全保障体系,工程措施和非工程措施相结合,提高防洪抗旱减灾能力。

(4) 农业灌排保障体系,发展有效灌溉面积,提高农牧业综合生产能力和抗灾减灾能力,保障粮食安全,促进农牧业增产、农牧民增收和农牧区经济发展。

(5) 水环境安全保障体系,坚持保护与治理并重的原则,以水资源和水环境保护为重点,通过严格的水功能区划管理,实行排污总量控制和水质监测,加强对重要水源地和地下水的保护,保护和改善水体功能,结合水污染治理,加大中水回用力度,提高水环境承载能力。

## 4 结 论

综上所述,西北旱区水文水资源科技研究得到了长足的发展,并取得了丰硕的研究成果。在水文基础理论方面,基本阐明了水文过程演变规律,构建了具有旱区特色的水文模型,提出了模拟、预测、预报水文序列的理论与方法等;在水资源应用技术方面,提出了农业灌溉节水技术、雨洪利用技术、水资源合理配置和水库优化调度技术等。

然而,变化环境下,水文情势发生了变化,水文科技应加大研究应对冰川融化引起的水循环和水资源量变化;极端天气引起的洪水和干旱发生频率增加,应大力开展干旱预测和洪水预报研究,为抗洪减灾提供技术支撑。水资源短缺一直制约着西北旱区经济社会发展,建设节水型社会,开展水利工程调

控、跨流域调水、雨洪利用等能有效的缓解旱区水资源短缺。与此同时,开展水资源合理调配研究,制定科学合理的配置、调度方案能够充分发挥水资源的作用,提高水资源的利用率,从而促进西北旱区的社会经济生态文明建设。

可以预测在不久的将来,通过水文水资源科技工作者和全社会的不懈努力,西北旱区水文水资源科技将会迎来大发展,在构建供水安全保障、生态环境安全保障、防洪抗旱安全保障、农业灌排保障、水环境安全保障5大体系的基础上,西北旱区将实现山青、水净、河畅、湖美、岸绿的生态友好型社会,支撑社会经济可持续发展。

## 参考文献:

- [1] 陈曦,等.中国干旱区自然地理[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] 邓铭江.中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J].地理学报,2018,73(7):1189-1203.
- [3] 陈亚宁,杨青,罗毅,等.西北干旱区水资源问题研究思考[J].干旱区地理,2012,35(1):1-9.
- [4] Aðalgeirsdóttir G, Gudmundsson G H, Björnsson H. Volume sensitivity of vatnajökull ice cap, iceland, to perturbations in equilibrium line altitude [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2005, 110(F4).
- [5] 陈亚宁,方功焕,王怀军,等.西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1295-1340.
- [6] 张建国,王国庆.气候变化对水文水资源影响研究[M].北京:科学出版社,2007.
- [7] 王玉洁,秦大河.气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J].气候变化研究进展,2017,13(5):483-493.
- [8] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]: Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 3.
- [9] Ji F, Wu Z H, Huang J P, et al. Evolution of land surface air temperature trend[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(6):462-466.
- [10] Murray T, Clarke G K C. Black-box modeling of the subglacial water system[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B6): 10231-10248.
- [11] Coren S, Murray T, Openshaw S, et al. Using computational intelligence techniques to model subglacial water systems [J]. Journal of Geographical Systems, 1999, 1(1): 37-60.
- [12] Arnold N S, Richards K, Willis I C, et al. Initial results from a distributed, physically based model of glacier hydro-

- ogy[J]. *Hydrological Processes*, 1998,12(2):191-219.
- [13] Luo Y, Arnold J, Allen P, et al. Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012,16(4):1259-1267.
- [14] Luo Y, Arnold J, Liu S. Inclusion of glacier processes for distributed hydrological modeling at basin scale with application to a watershed in Tianshan Mountains, northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013,477:72-85.
- [15] 张强,姚玉璧,李耀辉,等.中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J].*地球科学进展*,2015,30(2):196-213.
- [16] Mo K C, Lyon B. Global meteorological drought prediction using the North American multi-model ensemble[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015,16(3):1409-1424.
- [17] Madadgar S, AghaKouchak A, Shukla S, et al. A hybrid statistical-dynamical framework for meteorological drought prediction: Application to the southwestern United States[J]. *Water Resources Research*, 2016,52(7):5095-5110.
- [18] 杨肖丽,郑巍巍,林长清,等.基于统计降尺度和 SPI 的黄河流域干旱预测[J].*河海大学学报(自然科学版)*,2017,45(5):377-383.
- [19] 宋雅萍.东北洪水预报模型的理论研制与实践[J].*大坝与安全*,2000,14(3):28-33.
- [20] 葛守西.现代洪水预报技术[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [21] 芮孝方.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [22] 梁钟元,贾仰文,李开杰,等.分布式水文模型在洪水预报中的应用研究综述[J].*人民黄河*,2007,29(2):29-32.
- [23] 董小涛,李致家.HEC 模型在洪水预报中的运用[J].*东北水利水电*,2004,22(11):43-44.
- [24] 贾仰文,王浩.分布式流域水文模型的原理与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [25] 洪小康.渭河下游洪水预报的人工神经网络模型研究[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2001,29(4):93-96.
- [26] IHP (UNESCO-IHP). Workshop on Ecohydrology[Z]. Poland: Lodz, 1998.
- [27] 黄奕龙,傅伯杰,陈利顶.生态水文过程研究进展[J].*生态学报*,2002,23(3):580-587.
- [28] 张志强,孙成权,王学定.甘肃省生态建设与大农业可持续发展研究[M].北京:中国环境科学出版社,2001.
- [29] 康尔泗.我国寒区和干旱区水文研究的回顾和展望[J].*冰川冻土*,2000,22(2):178-188.
- [30] 张国盛.干旱、半干旱地区乔灌木树种耐旱性及林地水分动态研究进展[J].*中国沙漠*,2000,20(4):19-24.
- [31] 赵文智,程国栋.干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J].*科学通报*,2001,46(22):1851-1857.
- [32] 汤奇成,李丽娟.西北地区主要国际河流水资源特征与可持续发展[J].*地理学报*,1999(S1):21-28.
- [33] 常远,夏朋,王建平.水-能源-粮食纽带关系概述及对我国的启示[J].*水利发展研究*,2016,16(5):67-70.
- [34] 李桂君,黄道涵,李玉龙.水-能源-粮食关联关系:区域可持续发展研究的新视角[J].*中央财经大学学报*,2016(12):76-90.
- [35] Howells M, Hermann S, Welsch M, et al. Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies[J]. *Nature Climate Change*, 2013,3(7):621-626.
- [36] Hertel T, Steinbuks J, Baldos U. Competition for land in the global bioeconomy[J]. *Agricultural Economics*, 2012,44(S1):129-138.
- [37] Ringler C, Willenbocke D, Perez N, et al. Global linkages among energy, food and water:an economic assessment[J]. *Journal of Environmental Studies & Sciences*, 2016,6(1):161-171.
- [38] Jeswani H K, Burkinshaw R, Azapagic A. Environmental sustainability issues in the food-energy-water nexus: breakfast cereals and snacks[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2015,2:17-28.
- [39] Dennis W. The water-energy-food nexus: is the increasing attention warranted, from either a research or policy perspective[J]. *Environmental Science & Policy*, 2017,69:113-123.
- [40] Hoff H. Understanding the nexus. Background paper for the Bonn 2011 Conference: the water, energy and food security nexus[C]//Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [41] Allan T, Keulertz M, Woertz E. The water-food-energy nexus: an introduction to nexus concepts and some conceptual and operational problems[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2015,31(3):301-311.
- [42] Bazilian M, Rogner H, Howells M, et al. Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach[J]. *Energy Policy*, 2011,39(12):7896-7906.
- [43] Irwin E, Campbell J, Wilson R, et al. Human adaptations in food, energy, and water systems[J]. *Journal of Environmental Studies & Sciences*, 2016,6(1):127-139.
- [44] Hoekstra A Y, Wiedmann T O. Humanity's unsustainable environmental footprint[J]. *Science*, 2014,344(6188):1114-1117.
- [45] Zhang X D, Vesselinov V V. Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food security

- nexus[J]. *Advances in Water Resources*, 2017,101:1-10.
- [46] Chang G Y, Wang L, Meng L Y, et al. Farmers' attitudes toward mandatory water-saving policies: a case study in two basins in northwest China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016,181(1):455-464.
- [47] 操信春,邵光成,王小军,等. 中国农业广义水资源利用系数及时空格局分析[J]. *水科学进展*, 2017,28(1):14-21.
- [48] Hoogeveen J, Faure's J M, Peiser L, et al. GlobWat-a global water balance model to assess water use in irrigated agriculture[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2015,19(9):3829-3844.
- [49] Zahedi M, Mondani F, Eshghizadeh H. Analyzing the energy balances of double-cropped cereals in an arid region[J]. *Energy Reports*, 2015(1):43-49.
- [50] 周婷,郑航. 科罗拉多河水权分配历程及其启示[J]. *水科学进展*, 2015,26(6):893-901.
- [51] Zhuo L, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The effect of inter-annual variability of consumption, production, trade and climate on crop-related green and blue water footprints and inter-regional virtual water trade: a study for China (1978-2008)[J]. *Water Research*, 2016,94:73-85.
- [52] Mekonnen M M, Gerbens-leenes P W, Hoekstra A Y. Future electricity: the challenge of reducing both carbon and water footprint[J]. *Science of the Total Environment*, 2016(569/570):1282-1288.
- [53] Vanham D. Does the water footprint concept provide relevant information to address the water-food-energy-ecosystem nexus? [J]. *Ecosystem Services*, 2016(17):298-307.
- [54] 彭少明,郑小康,王煜,等. 黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化[J]. *水科学进展*, 2017,28(5):681-690.
- [55] 宋建军. 解决西北地区水资源问题的出路[J]. *科技导报*, 2003,21(0301):55-57.
- [56] Joeres, E F, Liebman J C, Revelle C S. Operating rules for joint operation of raw water sources[J]. *Water Resources Research*, 1971,7(2):225-235.
- [57] 华士乾. 水资源系统分析指南[M]. 北京:北京水利电力出版社,1988.
- [58] 石静涛. 考虑本地水源的陕西省引汉济渭工程水资源合理配置研究[D]. 西安:西安理工大学,2014.
- [59] 王礼先,张志强. 雨洪利用技术概述[J]. *新疆环境保护*, 1997(2):10-12.
- [60] 王银堂,胡庆芳,张书函,等. 流域雨洪资源利用评价及利用模式研究[J]. *中国水利*, 2009(15):13-16.
- [61] 胡四一,程晓陶,户作亮. 海河流域洪水资源安全利用关键技术研究[R]. 南京:南京水利科学研究院,2005.
- [62] 曹永强. 洪水资源利用与管理研究[J]. *资源·产业*, 2004,6(2):21-23.
- [63] 毛慧慧,李木山. 海河流域的雨洪资源利用[J]. *海河水利*, 2009(6):7-9.
- [64] 黄强,赵梦龙,李瑛. 水库生态调度研究新进展[J]. *水力发电学报*, 2017,36(3):3-13.
- [65] Ward J V, Stanford J A. *The Ecology of Regulated Streams* [M]. New York: Plenum Press, 1979.
- [66] 邓铭江,黄强,张岩,等. 额尔齐斯河水库群多尺度耦合的生态调度研究[J]. *水利学报*, 2017,48(12):1387-1398.
- [67] 王浩. 面向生态的西北地区水资源合理配置问题研究[J]. *水利水电技术*, 2006(1):9-14.
- [68] 左其亭,李可任. 最严格水资源管理制度理论体系探讨[J]. *南水北调与水利科技*, 2013,11(1):34-38.
- [69] 刘志仁. 最严格水资源管理制度在西北内陆河流域的践行研究—水资源管理责任和考核制度的视角[J]. *西安交通大学学报(社会科学版)*, 2013,33(5):50-55.

## 特邀作者简介

黄强,1958年出生,籍贯四川绵阳,中共党员,水文学及水资源学科二级教授,博士生导师。曾任西安理工大学水利水电学院党委书记、院长、校工会常务副主席等。兼任国务院水利工程学科第六、七届评议组委员、陕西省学科评议组委员、西北旱区生态水利工程国家重点实验室副主任、教育部西北水资源与环境生态重点实验室主任等,是水利工程国家一级重点学科带头人、陕西省突出贡献专家、国家教学团队带头人、陕西省“特支计划”特聘专家、陕西省教学名师等。兼任《水利学报》、《人民黄河》等编委等。研究方向为水资源演变与调控,主要从事水文过程演变、水文模拟与预报、水资源系统分析、水库调度等研究。主持国家自然科学基金重大、重点、面上项目7项,973专题、科技部重大研发计划课题等纵横向科研150余项。获国家、省部级科技进步奖10余项,其中一等奖4项;出版专著教材16部;发表论文500余篇,其中SCI、EI收录论文260余篇。培养研究生近300人,其中已毕业的博士90余人,3人获陕西省优秀博士论文。获国家教学成果二等奖1项、陕西省教学成果3项、陕西省普通高校优秀教材一等奖1项。