

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.004

新疆水资源时空变化特征及适应性利用战略研究

左其亭^{1,2,3}, 李佳伟¹, 马军霞^{1,3}, 吴青松¹, 郭佳航¹, 李倩文¹

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学水科学研究中心, 河南 郑州 450001;
3. 郑州市水资源与水环境重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:在深入剖析新疆水资源时空演变特征的基础上,对不同气候模式下的新疆水资源演变趋势进行分析,并结合对水资源适应性利用机理的理解,提出变化环境下新疆水资源适应性利用对策及战略框架。研究认为,未来一段时期内新疆降水呈增加趋势,不同气候模式下多年平均降水量分别较基准期增加 15.6%、20.8% 和 22.2%,一定程度导致水资源量变化;在此条件下进行水资源适应性利用战略研究,提出了工程支撑、政策支撑及科技支撑三大支撑体系,旨在为实现新疆水资源合理开发利用、经济社会可持续发展、生态环境保护及人水和谐目标提供借鉴。

关键词:水资源;时空演变;适应性利用;气候模式;降水;新疆

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)02-0021-07

Study on spatio-temporal variation characteristics and adaptive utilization strategy of water resources in Xinjiang
// ZUO Qiting^{1,2,3}, LI Jiawei¹, MA Junxia^{1,3}, WU Qingsong¹, GUO Jiahang¹, LI Qianwen¹ (1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Center for Water Science Research, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Zhengzhou Key Laboratory of Water Resource and Environment, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: On the basis of analyzing the spatio-temporal evolution characteristics of water resources in Xinjiang, the evolution trends of water resources in Xinjiang under different climate patterns are analyzed. Based on the understanding of the mechanism of adaptive utilization of water resources, the countermeasures and strategic framework of adaptive utilization of water resources in Xinjiang under changing environment are put forward. The results show that the precipitation in Xinjiang will increase in the coming period, and the annual average precipitation under different climate patterns will increase by 15.6%, 20.8% and 22.2% respectively, which will lead to the change of water resources. Under this condition, the adaptive utilization strategy of water resources is studied, and three support systems of engineering support, policy support and science and technology support are put forward, the aim is to provide reference for realizing the goals of rational development and utilization of water resources, sustainable development of economy and society, protection of ecological environment and harmony between human and water.

Key words: water resources; spatio-temporal evolution; adaptive utilization; climate model; precipitation; Xinjiang

水作为自然界的基础资源,与经济社会发展和生态环境保护关系密切,甚至起到了决定性作用。因此水资源的开发利用需要适应自然变化及人类活动带来的叠加影响,进而通过主动的人为措施来协调人水关系。由于新疆气候极端干旱,植被覆盖度较低,生态环境十分脆弱,温度变化剧烈、人水关系极不协调,故亟须了解新疆水资源时空变化特征,并在此基础上进行水资源适应性利用研究。目前,部

分学者开展了气候变化和人类活动影响下的水资源时空演变及适应性利用研究,如,张慧等^[1]基于遥感影像、水文气象资料,对气候变化背景下奎屯河流域近 50 a 冰川变化及其对水资源的影响进行了研究;Ngom 等^[2]分析了人类活动对塞内加尔水资源快速演变的影响;王国庆等^[3]采用水文模拟定量评估了气候要素变化和人类活动对山西省岚河流域河川径流的影响;赵娜娜等^[4]研究 2020—2050 年不同

基金项目:国家自然科学基金(U1803241,51779230)

作者简介:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

气候变化情景下若尔盖湿地流域径流变化趋势以及气候变化对湿地径流的影响。还有学者开展水资源利用对策和空间均衡的研究,如,克里木等^[5]在总结新疆水资源禀赋及利用现状的基础上,进行了长期战略对策研究。此外,笔者在文献[6]中提出了水资源适应性利用模式及其理论体系,并在文献[7]中完善了水资源适应性利用理论的应用规则、关键问题和解决途径,在文献[8]中提出了水资源空间均衡理论方法及应用研究框架。但总体来看,水资源演变下的水资源适应性利用问题仍有待进一步研究。本文拟进行新疆水资源时空变化特征分析和变化环境下的水资源适应性利用战略研究。

1 新疆水资源时空变化特征分析

1.1 新疆概况

新疆位于我国西北部,面积约 166 万 km²,是我国陆地面积最大的省级行政单元。新疆整体水资源量较丰富,域内河流交错、湖泊广袤,人均水资源量位于全国前列,约为全国人均水资源量的 2 倍,但水资源总量小,约占全国水资源总量的 3%。新疆不可利用的冰川储量大,且有较多降雨稀少、蒸发强烈的沙漠地区,水资源较为紧缺,属于干旱内陆^[9]。由于缺水、日照强烈、蒸散发强等原因,新疆的生态环境十分脆弱。此外,新疆水资源的时空分布不均对区域经济发展形成了较强约束。

1.2 新疆水资源时间变化特征及开发利用阶段分析

新疆降水量和水资源量的时间变化趋势见图 1 (数据来源于 1988—2018 年的《新疆统计年鉴》)。由图 1 可知,新疆 1988—2018 年降水量随时间波动上升,多年平均降水量约 168.5 mm。其中,1988—2000 年间降水量波动剧烈,并于 1996 年达到 1988—2018 年最大值,而后在 1997 年陡降,降为 1988—2018 年间最小值;2000 年以后,新疆降水量年际变化减缓,但由于气候变化的影响,依然保持波

动上升趋势,并且在超强厄尔尼诺现象的影响下,2016 年降水量达到 220 mm。1988—1999 年间新疆水资源量较为稳定,在 880 亿 m³ 左右波动。2000 年以后,新疆水资源量呈现先上升后下降的周期变化趋势,其中,2011 年水资源量为 1988—2018 年间极大值,达 1 113 亿 m³,与附近年份降水量增加密切相关。总体来看,新疆水资源量及降水量都呈现增长趋势。

随着水利事业的发展,新疆水资源开发利用目的、理念及方式发生了翻天覆地的变化。纵观新疆水资源开发利用,可以分为 4 个阶段:①1949 年中华人民共和国成立前,新疆人口稀少,生产水平很低,水资源利用主要依靠坎儿井和引水渠道,全疆仅有 3 处不完整的水库。此阶段,新疆水资源开发利用水平极低,水利设施极不完善,不具备应对环境变化的水资源开发利用能力。②1978 年我国改革开放前,为保障农业发展,新疆逐步兴建了大批基础水利工程,并且开始注重防洪。1952 年修建了喀群引水枢纽,是叶尔羌河第一级引水枢纽,后来依次修建了大泉沟水库、猛进水库、八一水库。此阶段,新疆水资源开发利用水平开始上升,防洪调蓄体系雏形初显。③1978 年我国改革开放以后,新疆水利设施建设不断完善,水资源开发利用逐渐合理。1988 年颁布《中华人民共和国水法》后,新疆颁布了地方性法规,水资源管理水平逐步提高。在原有水资源开发利用基础上,开展了农村饮用水安全工程建设、水土保持治理工程建设、河流堤防工程加固。此阶段,新疆水资源开发利用水平稳步提高,防洪调蓄体系逐步完善。④“十二五”规划以来,新疆水利建设投入不断增加,水利事业蓬勃发展。自 2011 年开始实施最严格水资源管理制度,新疆制定了大量管理规定和考核方法,水资源管理逐渐完善,水权水市场建立、生态文明建设、水土保持综合治理和防洪调蓄建设齐头并进。此阶段,新疆水资源开发利用水平达到全新高度,防洪调蓄体系基本完善。

1.3 新疆水资源空间变化特征及空间均衡调控

新疆水资源空间分布不均,整体上呈现北多南少、西多东少,山区多、平原少的空间分布特征。以 2018 年为例,北疆年均降水量较大,达 238.1 mm,是全疆年均降水量(168.5 mm)的 1.4 倍;南疆降水次之,为 95.8 mm;东疆地区降水极其稀少,仅为 37.0 mm,为北疆降水量的 16%。除降水量差距大外,各地区水资源量的空间分布也极不均衡。北疆面积占全疆 23%,但水资源量达 416.08 亿 m³,占全疆的 48%;东疆面积占全疆 12%,但水资源量仅

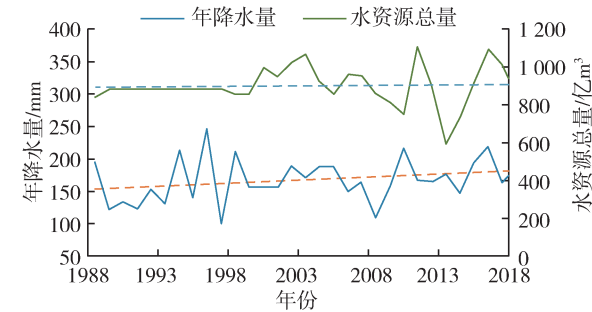


图 1 新疆水资源量及年降水量变化趋势
Fig.1 Change trend of water resources and annual precipitation in Xinjiang

22.31 亿 m³, 仅占全疆的 3%, 与南北疆差距悬殊。具体到各地州, 不同地州差距极为悬殊, 水资源呈现极不均衡的空间分布特征。

新疆的经济发展呈现明显的空间集聚状态。总体来看, 北疆经济发展水平较高, 南疆经济发展水平较低, 其中和田、喀什最为落后。以 2018 年为例, 克拉玛依市人均 GDP 最高, 达 15 万元, 是和田地区的 13 倍、喀什地区的 8 倍。此外, 位于天山北坡经济带的乌鲁木齐市、石河子市及克拉玛依市是新疆经济最发达、产业最集中、人口最密集的区域, 经济发展水平普遍较高。但是这些地区的水资源量却并不丰富, 属于严重的资源型缺水地区。以克拉玛依市和石河子市为例, 2018 年两市的人均 GDP 居全疆前列, 但其水资源量分别仅为 0.46 亿 m³ 和 0.15 亿 m³, 远低于其他地区。相对而言, 位于南疆的和田、喀什地区经济水平较低, 但水资源丰度较高, 地下水资源丰富^[10]。

新疆经济发展布局与水资源的空间分布存在明显不匹配现象, 如图 2 所示。部分地区经济发展超过当地水资源承载能力, 严重制约了区域经济社会可持续发展并导致生态环境恶化。为改善水资源空间不均衡的现状, 可通过跨区域或流域调水工程调整水资源分配格局, 加大引调水力度, 满足各地不同的用水需求。新疆水资源西多东少、北多南少的客观自然条件决定了其水资源开发利用中西水东引、北水南调的宏观战略布局。近年来, 新疆在伊犁河、额尔齐斯河、塔里木河流域规划建设了一系列水利工程。其中, “引额调水”工程位于新疆北部, 包括

“引额济克”“引额济乌”“西水东引”三大部分(图 2 中显示为调水路线①②③)。“引额济克”和“引额济乌”通过从额尔齐斯河引水到克拉玛依和乌鲁木齐经济区及沿线地区, 有效解决了该地区资源型缺水问题; “西水东引”将额尔齐斯河下游支流布尔津河的余水调往额尔齐斯河中游, 主要供应当地农牧业用水。此外, 2000 年以来, 从开都河及博斯腾湖向塔里木河下游紧急输水(图 2 中显示为调水路线④), 有效解决了塔里木河下游部分河道近 30 年的断流问题^[11]。2001 年启动了塔里木河流域近期综合治理工程, 2016 年实施塔里木河全流域调水(图 2 中显示为调水路线⑤), 向 3 个重点胡杨林保护片区和孔雀河中下游紧急补水, 实现塔里木河流域上、中、下游的全覆盖。这些调水工程一定程度上解决了水资源时空分布不均、经济结构布局不合理的问题。此外, 伊犁河全流域处于迎风面, 降水丰富, 是全疆径流量最丰富的河流, 目前水资源可开发利用潜力很大^[12-13], 未来可考虑将伊犁河水调往北疆及塔里木河流域(图 2 中显示为调水路线⑥、⑦)。从长远来看, 新疆面积广阔、地形地貌复杂且河流众多, 水资源调配难度较大, 未来应着眼于大生态、大格局、大战略的全新思路, 积极探索科学可行的水资源调配路线, 制定空间均衡管控下的水资源适应性利用对策, 以使水资源开发利用与水资源天然分布及经济社会发展布局相适应。

2 不同气候模式下新疆水资源演变分析

实现水资源的合理开发利用需考虑未来气候变

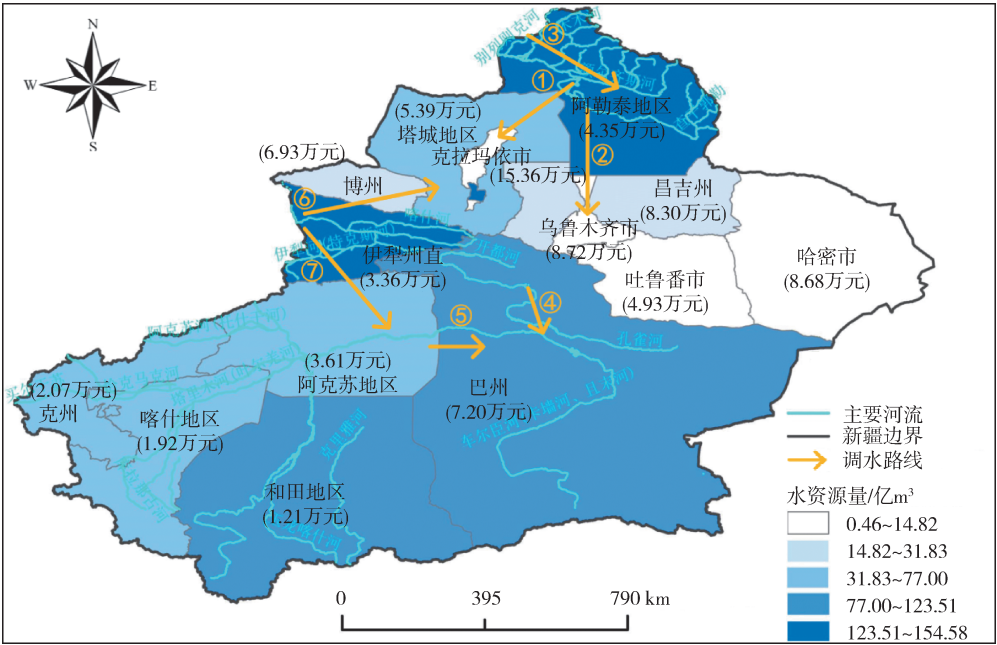


图 2 2018 年新疆水资源量和人均 GDP 空间分布及水资源调配线路

Fig. 2 Spatial distribution of water resources, per capita GDP and water resources allocation route in Xinjiang in 2018

化和人类活动的影响。科学评估新疆未来气候变化下的水资源情势,是制定该地区水资源适应性利用对策及战略的基础工作。选取3个在新疆具有较好模拟能力的CMIP5全球气候模式^[14-15],即CanESM2、CNRM-CM5和MPI-ESM-LR,考虑RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5这3种温室气体排放情景,模式输出均采用r1i1p1集合成员,运用算术平均法处理栅格数据得到面平均值,基准期确定为1988—2018年,以此分析新疆未来降水变化趋势和幅度,结果见图3。由图3可知,相较于基准期平均降水量,不同气候模式预估2026—2055年降水量均偏多,仅有部分年份处于偏低水平,在此趋势中,不同排放情景也表现出明显的差异,RCP2.6情景下出现降水偏低年份最多,RCP4.5和RCP8.5基本相当,出现上述现象的主要原因为所选气候模式为升温模式,气候变暖会加速新疆地区水循环,进而导致降水偏多。此外,相较气温等变量,不同气候模式对降水的预估结果存在较大的不确定性,为更好描述未来新疆降水变化趋势,对预估结果进行线性拟合得趋势线见图3。具体来说,CanESM2和CNRM-CM5两种模式在不同排放情景下均表现为增加趋势,线性升率分别介于每10 a 3.69~7.29 mm和2.76~9.07 mm;相对而言,MPI-ESM-LR模式在RCP2.6和RCP4.5排放情景下表现为下降趋势,而RCP8.5下则呈现缓慢增加趋势。分析多模式平均结果,3种不同排放情景下新疆未来多年平均降水量较基准期将分别增加15.6%、20.8%和22.2%。

进一步结合已有研究发现,由于气候变化的影响,新疆未来整体将持续保持变暖增湿趋势,但变化趋势在空间维度上存在较为显著的差异。针对降水量相对较多的夏季,新疆地区2026—2055年降水量整体表现为南增北减。具体空间分布为,北疆大部分地区和东疆部分地区略微减少,而伊犁河谷和南疆大部分地区则显著增多,且其年际变率呈现逐渐增大趋势^[15]。综上分析,未来新疆地区降水增加将在一定程度上导致水资源量的增多,然而气温升高会加大水资源的蒸散发量,同时降水的年内、年际及空间差异性变化将进一步改变现有的水资源时空分配格局,加剧水资源开发利用的复杂性,现有的水资源利用方式亟须做出相应的调整。与此同时,人类活动的更高强度作用将加大对地区水资源承载能力的需求程度,加深对生态环境的破坏力度^[12]。因此,为合理开发利用水资源以支撑新疆地区持续高质量发展,需考虑现状水平和未来变化,提出对应的水资源适应性利用对策及战略框架。

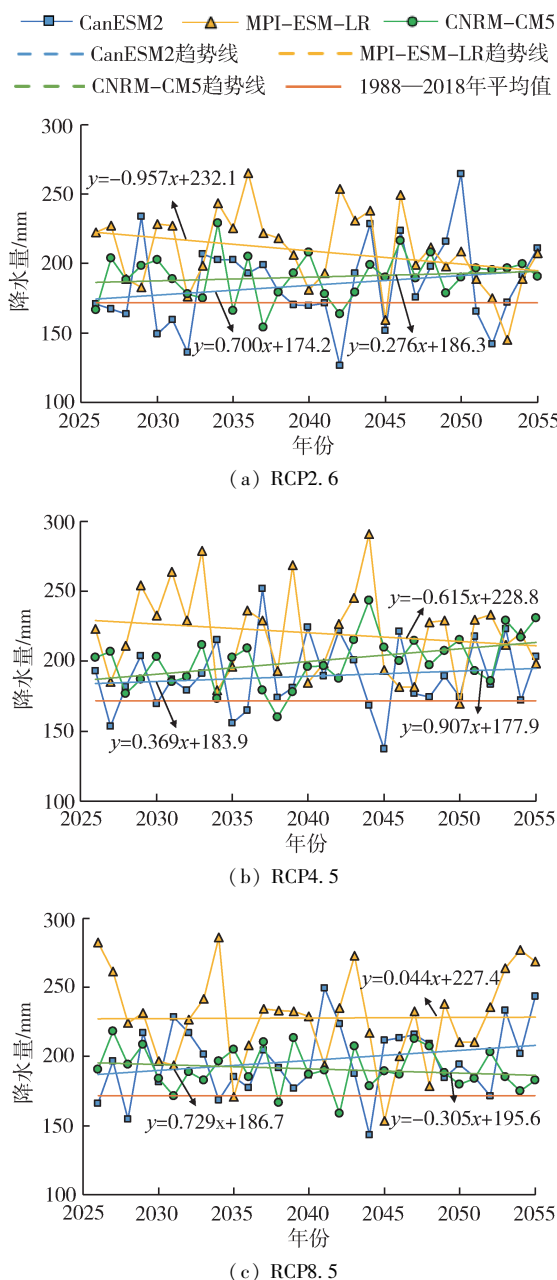


图3 3种不同气候模式下新疆2026—2055年空间平均降水演变趋势

Fig. 3 Evolution trend of spatial average precipitation in Xinjiang from 2026 to 2055 under three different climate models

3 变化环境下新疆水资源适应性利用对策及战略框架

3.1 水资源适应性利用理论及应用

合理应对环境变化对人水系统发展带来的挑战,引导水资源合理开发利用以保障水系统良性循环,需要以水资源适应性利用理论作为支撑^[16]。笔者在文献[7]具体给出了水资源适应性利用理论的框架体系,简单来说,水资源适应性利用以人文系统与水系统联系而成的人水系统为研究对象,在考虑

人类活动、水文气象等驱动因子动态变化的基础上,遵循自然规律和社会发展规律,科学调整水资源利用方式以实现水资源在时空维度的可持续开发利用,进而实现人水和谐目标。

应用水资源适应性利用理论解决具体问题的过程中,不能主观随意地制定水资源适应性利用方案,需遵循相应的规律和原则,也不能刻板地套用固定模式,而应结合地区现状、未来规划等具体问题进行分析。此外,制定水资源适应性利用方案不是一蹴而就,它符合唯物辩证法的否定之否定规律,是一个螺旋上升、循环往复的过程,因此,只有系统地考虑上述多个方面,才能在实践中正确、有效应用水资源适应性利用理论,在动态优化的过程中体现其所具备的主体功能,完成其所肩负的重要任务。如,笔者在文献[6]进行了南水北调中线水源区水资源适应性利用研究,根据南水北调中线、引汉济江和引汉济渭三大调水工程的实施划分了3个阶段,分别确定了3个阶段的水资源适应性利用方案。此外,我国提出的诸多治水思想和战略都蕴含着对水资源适应性利用的思考^[5]。

3.2 应对环境变化的新疆水资源适应性利用对策选择途径

面对新疆水资源的时空演变特征,以及不确定气候环境造成的水系统改变,本文提出了变化环境下的新疆水资源适应性利用对策及战略框架,见图4。针对新疆人水系统,首先剖析新疆水资源的时空变化特征,在此基础上制定初步的水资源利用方案;其次,水资源利用方案需要适应环境变化的影响,通

过制定一套完整的评估方法对该水资源利用方式进行评估,当水资源利用方式无法通过评估时,重新调整水资源利用方案,直至得到该环境下的和谐平衡^[17];最后,确定最终的水资源利用方案并应用于实际问题的解决。水资源适应性利用方案的确定是一个循环往复的过程,当环境、气候等发生变化时,会造成水资源时空变化,进而影响水资源利用方案的制定。更重要的是,环境变化会打破原有人水和谐关系,使得原有水资源利用方式无法通过评估,需要再次调整水资源利用方案,直至得到新变化环境下的和谐平衡。

根据新疆水资源适应性利用对策,结合上述分析结果,未来一段时期内,新疆降水呈现增加态势,降水这一环境变化会对新疆水资源造成影响,原有的人水和谐关系会有所改变。因此,需要通过科学的方法重新调整水资源利用方案,如进行水资源均衡调控、强化水资源管理、调整经济发展模式等,以达到新环境下的和谐平衡,实现人水和谐目标。针对不同地区,由于气候变化或引水工程带来的改变,各地区也应制定相应的水资源适应性利用方案,通过加强管理、调整经济规模、强化节水等方法实现新条件下的和谐平衡。

3.3 新疆水资源适应性利用战略

面对新疆水资源特征及未来演变趋势,实现新疆水资源适应性利用,需要构建三大支撑体系,即工程支撑、政策支撑及科技支撑,对应水资源均衡调配、节水优先、严格水资源管理、智慧水利四大战略。

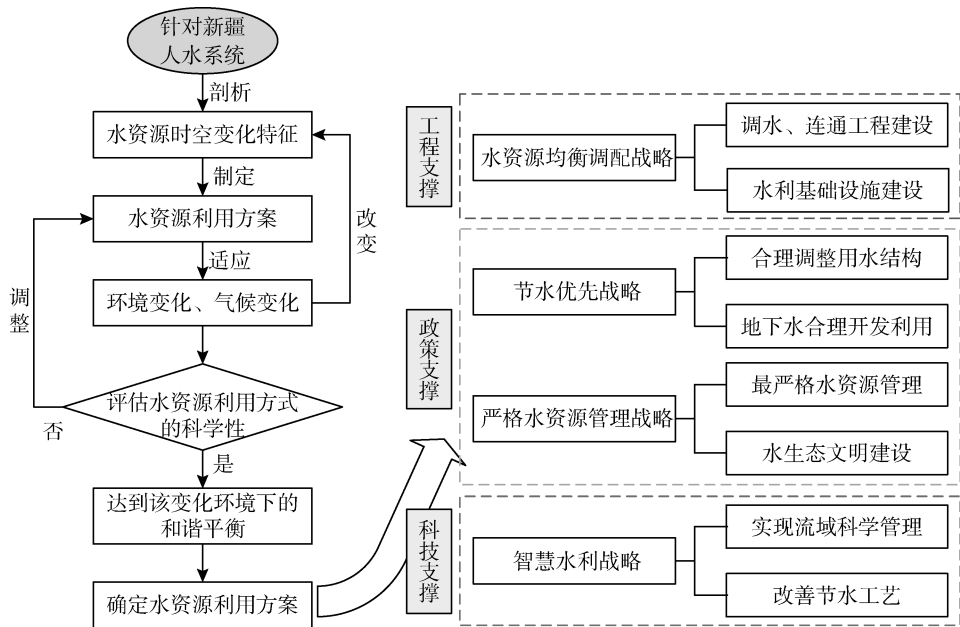


图4 新疆水资源适应性利用对策及战略框架

Fig.4 Countermeasures and strategic framework for adaptive utilization of water resources in Xinjiang

a. 水资源均衡调配战略。新疆地域辽阔,资源富集,各地区水资源条件和经济社会发展水平差异较大。为解决人水发展不匹配及潜在的环境变化问题,新疆应着眼于构建多层次、多功能、多形式的调水渠道网络,从区域、流域、城市层面布局水系连通网络,实现跨区域调水的同时,增强年内、年际调解,提高新疆变化环境下的水资源调配能力。

b. 节水优先战略。面对水资源紧缺的现实情形,新疆需要开展节水优先战略。一方面,积极发展高效节水农业,并合理调整产业结构。由于新疆水资源利用结构不甚合理,农业用水量长期占用水总量的90%以上,因此新疆节水的主要潜力在农业。另一方面,合理开采地下水资源,利用地下水输水距离近、调度方便的特点^[10],将地下水开发与高效节水相结合。

c. 严格水资源管理战略。在统一规划的前提下,加强监测,强化管理,有助于提高新疆水资源适应性能力。在水资源管理中应注重最严格水资源管理和生态文明建设,强化水资源税收、水权交易、生态补偿等制度。

d. 智慧水利战略。为保障变化环境下的新疆水资源适应性利用能力,需要实现流域科学管理。水资源开发利用应实现信息化、管理智能化,充分利用物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术,实现新疆传统水利向智慧水利转变,构建科学合理的水资源利用管理平台。除此之外,应提高自身科技水平,大力发展节水科技、中水回用技术以应对变化环境下的水资源利用问题。

4 结 语

本文基于新疆水资源变化特征及不同气候模式下的演变分析,依据对水资源适应性利用的理解,提出了水资源均衡调配、节水优先、严格水资源管理、智慧水利四大战略。在今后研究中,可进一步深入水资源适应性利用机理研究,定量识别主要驱动因子,加强变化环境下水系统模拟研究,量化水资源适应性利用对策。

参考文献:

[1] 张慧,李忠勤,牟建新,等.近50年新疆天山奎屯河流域冰川变化及其对水资源的影响[J].地理科学,2017,37(11):1771-1777. (ZHANG Hui, LI Zhongqin, MOU Jianxin, et al. Impact of the glacier change on water resources in the Kuytun River Basin, Tianshan Mountains during recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica,

2017,37(11):1771-1777. (in Chinese))

- [2] NGOM F D, TWEED S, BADER J C, et al. Rapid evolution of water resources in the Senegal delta[J]. Global and Planetary Change, 2016, 144: 34-47.
- [3] 王国庆, 张建云, 鲍振鑫, 等. 人类活动和气候变化对岚河流域河川径流的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 113-118. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, BAO Zhenxin, et al. Change in runoff within the Lan River basin due to climate change and human activities[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(6): 113-118. (in Chinese))
- [4] 赵娜娜, 王贺年, 张贝贝, 等. 若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 40-47. (ZHAO Nana, WANG Henian, ZHANG Beibei, et al. Runoff variation in Zoige Wetland Basin and its response to climate change[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 40-47. (in Chinese))
- [5] 克里木, 姜付仁. 新疆水资源禀赋、开发利用现状及其长期战略对策[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 57-64. (KE Limu, JIANG Furen. Present situation of water resources endowment, development and utilization and long-term strategic countermeasures in Xinjiang[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(12): 57-64. (in Chinese))
- [6] 左其亭. 水资源适应性利用理论的应用规则与关键问题[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 925-932. (ZUO Qiting. Application rules and key issues in theory of adaptive utilization of water resources[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 925-932. (in Chinese))
- [7] 左其亭. 水资源适应性利用理论及其在治水实践中的应用前景[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 18-24. (ZUO Qiting. Theory of adaptive utilization of water resources and its application prospect in water management practices[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 18-24. (in Chinese))
- [8] 左其亭, 韩春辉, 马军霞, 等. 水资源空间均衡理论方法及应用研究框架[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 113-118. (ZUO Qiting, HAN Chunhui, MA Junxia, et al. Theoretical method and applied research framework of water resources spatial equilibrium[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 113-118. (in Chinese))
- [9] 张羽威, 张昊哲. 新疆经济发展与水资源利用空间关联性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2018, 20(2): 129-134. (ZHANG Yuwei, ZHANG Haozhe. Spatial correlation analysis of economic development and water resources utilization in Xinjiang[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2018, 20(2): 129-134. (in Chinese))

- [10] 邓铭江. 新疆水资源战略问题探析[J]. 中国水利, 2009 (17): 23-27. (DENG Mingjiang. Studies on water resources strategy in Xinjiang [J]. China Water Resources, 2009(17): 23-27. (in Chinese))
- [11] 邓铭江. 塔里木河下游生态输水及植被恢复遥感监测评价[J]. 冰川冻土, 2007 (3): 380-386. (DENG Mingjiang. An appraisal of remote-sensing monitoring on vegetation restoration and ecological water-conveying in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007(3): 380-386. (in Chinese))
- [12] 张志君, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 53-58. (ZHANG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 53-58. (in Chinese))
- [13] 何流. 伊犁河流域水资源开发利用现状分析及对策[J]. 陕西水利, 2019(7): 49-51. (HE Liu. Analysis and Countermeasures on the present situation of water resources development and utilization in Yili River Basin [J]. Shaanxi Water Resources, 2019 (7): 49-51. (in Chinese))
- [14] 腊孟珂, 周洋, 朱汉辰, 等. 动力降尺度 CMIP5 的 2006—2035 新疆夏季降水变化[J]. 气象科学, 2019, 39 (3): 413-420. (LA Mengke, ZHOU Yang, ZHU Hanchen, et al. On the precipitation changes over Xinjiang in summers from 2006 to 2035 through the dynamical downscaling of CMIP5 model results [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39 (3): 413-420. (in Chinese))
- [15] 于晓晶, 李淑娟, 赵勇, 等. CMIP5 模式对未来 30 a 新疆夏季降水的预估[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(5): 53-62. (YU Xiaojing, LI Shujuan, ZHAO Yong, et al. Projected summer precipitation over Xinjiang by multi-CMIP5 models in the next 30 years[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(5): 53-62. (in Chinese))
- [16] 黄德春, 孙敏敏. 新疆水贫困与城市化的协调关系研究[J]. 水资源保护, 2017, 33 (1): 30-34. (HUANG Dechun, SUN Minmin. Study of coordination between water poverty and urbanization in Xinjiang[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 30-34. (in Chinese))
- [17] 左其亭, 赵衡, 马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 785-792. (ZUO Qiting, ZHAO Heng, MA Junxia. Study on harmony equilibrium between water resources and economic society development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 785-792. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-06-27 编辑: 彭桃英)

(上接第 14 页)

- [22] ZHENG F, WESTRA S, Sisson S A. Quantifying the dependence between extreme rainfall and storm surge in the coastal zone[J]. Journal of Hydrology, 2013, 505: 172-187.
- [23] 刘曾美, 吴俊校, 陈子荣. 感潮地区暴雨和潮水位遭遇组合的涝灾风险[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(2): 166-169. (LIU Zengmei, WU Junxiao, CHEN Zisheng. Waterlogging risk based on encounter of rainstorm and tidewater level in tide-influenced area [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(2): 166-169. (in Chinese))
- [24] LIAN J J, XU K, MA C. Joint impact of rainfall and tidal level on flood risk in a coastal city with a complex river network: a case study of Fuzhou City, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(2): 679-689.
- [25] SVENSSON C, JONES D A. Dependence between extreme sea surge, river flow and precipitation in eastern Britain [J]. International Journal of Climatology, 2002, 22 (10): 1149-1168.
- [26] 武传号, 黄国如, 吴思远. 基于 Copula 函数的广州市短历时暴雨与潮位组合风险分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 33-40. (WU Chuanhao, HUANG Guoru, WU

- Siyuan. Risk analysis of combinations of short duration rainstorm and tidal level in Guangzhou based on Copula function[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 33-40. (in Chinese))
- [27] QIAN K, XIN T, JEREMY B, et al. Urban pluvial flooding prediction by machine learning study of Shenzhen City, China [J]. Advances in Water Resources, 2020, 145: 103719.

(收稿日期: 2020-11-22 编辑: 王 芳)

