

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.017

# 中长期径流预报研究进展与展望

孙周亮<sup>1,2</sup>, 刘艳丽<sup>2,3,4</sup>, 张建云<sup>1,2</sup>, 陈 华<sup>1</sup>, 舒章康<sup>2</sup>, 陈 鑫<sup>2</sup>,  
金君良<sup>2,3,4</sup>, 刘翠善<sup>2,3,4</sup>, 鲍振鑫<sup>2,3,4</sup>, 王国庆<sup>2,3,4</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029)

**摘要:**概述了中长期径流变化的主要影响因素,从发展历程和研究方法两个角度总结了中长期径流预报方法。从研究技术、径流成因、数据驱动模型、预报不确定性4个方面综述了中长期径流预报的研究进展,分析了在径流关键驱动因子及其驱动机制、数据驱动方法的物理可解释性、预报结果的不确定性认识等方面研究的不足,指出未来应注重对中长期径流物理成因、预报方法适用性和可靠性、中长期径流演变相关研究成果的应用等方面的研究。

**关键词:**中长期径流;预报方法;数据驱动模型;径流成因;不确定性

**中图分类号:**TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0136-09

**Research progress and prospect of mid-long term runoff prediction** // SUN Zhouliang<sup>1,2</sup>, LIU Yanli<sup>2,3,4</sup>, ZHANG Jianyun<sup>1,2</sup>, CHEN Hua<sup>1</sup>, SHU Zhangkang<sup>2</sup>, CHEN Xin<sup>2</sup>, JIN Junliang<sup>2,3,4</sup>, LIU Cuishan<sup>2,3,4</sup>, BAO Zhenxin<sup>2,3,4</sup>, WANG Guoqing<sup>2,3,4</sup> (1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 4. Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** A summary was made on the the driving factors of mid-long term runoff evolution as well as the classification of mid-long term runoff prediction methods and models from angles of development processes and research methods. The research progress of mid-long term runoff prediction was reviewed from four aspects, including research techniques, physical causes, data-driven models, and prediction uncertainty, and the deficiencies in the research of the key driving factors of runoff and their driving mechanisms, the physical interpretability of data-driven methods, and the uncertainty of prediction were analyzed. It is pointed out that future research should focus on physical causes of mid-long term runoff evolution, the applicability and reliability of prediction methods, and application of relevant research results of mid-long term runoff evolution.

**Key words:** mid-long term runoff; prediction method; data-driven model; physical causes of runoff; uncertainty

中长期径流预报是水资源开发、调度与管理、水利工程运行与维护、水旱灾害防御等实践工作中的重要手段。中长期径流预报包括中期径流预报和长期径流预报,通常中期径流预报的预见期为3~15 d,长期径流预报的预见期为15 d至1 a,预见期为1 a以上称为超长期预报<sup>[1]</sup>。短期径流(预见期

为3 d以内)一般用气象预报信息驱动水文模型进行预报,径流主要受降水、气温等气象要素的影响<sup>[2-3]</sup>。中长期径流预报因缺乏可靠的气象预报信息、预见期较长、影响因素复杂,在预报方法、原理等方面与短期径流预报差异较大,最显著的差异是中长期径流预报方法或模型中普遍缺乏对中长期径流

**基金项目:**国家重点研发计划(2018YFC1508104);国家自然科学基金(52079079, 91847301, 92047203);江苏省自然科学基金(BK20191129)

**作者简介:**孙周亮(1993—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: zlsun19@whu.edu.cn

**通信作者:**张建云(1957—),男,中国工程院院士,教授级高级工程师,博士,主要从事气候变化与水文水资源研究。E-mail: jy Zhang@

nhri.cn

机理的研究。

近年来,中长期径流预报得到了快速发展,尤其是基于人工智能的数据驱动方法<sup>[4]</sup>。这类方法通常在物理成因上考虑因子与径流的相关性<sup>[5]</sup>,但本质上遵循从“数据”到“数据”(或称“遥相关”)的模式。目前中长期水文预报还处于发展阶段,主要体现在中长期水文过程成因不明、预报结果不确定性较大等方面,直接导致预报精度滞后于生产实际的需求<sup>[6]</sup>。

本文介绍中长期径流变化的主要影响因素与常用的预报方法及模型,综述中长期径流预报的主要动态与研究进展,并指出当前研究中存在的问题与不足,对未来重点研究方向进行展望,为进一步认识中长期径流形成机理、提高预报的可信度提供参考依据。

1 中长期径流变化的影响因素

中长期径流变化的影响因素主要包括:天文因素、大气环流、海洋热状况、下垫面情况、流域水情等<sup>[7]</sup>,各类影响因素及其基本信息<sup>[8-22]</sup>见表1。预报因子的选择对预报效果具有关键性的影响<sup>[21,23]</sup>,多数预报因子是通过统计分析确定的,难以明确径流关键驱动因子及其对径流的驱动机制。

2 中长期径流预报方法

中长期水文预报方法按发展历程可分为传统

方法和现代方法<sup>[1,24]</sup>(表2)。现代方法,也称为数据驱动方法或模型,依靠大量样本数据挖掘隐含的映射关系进行预测,是当前研究热点。表3列出了主要现代预报方法的理论基础及其适用条件<sup>[25-31]</sup>。

组合方法根据研究需求将不同方法组合应用。如李继清等<sup>[28]</sup>利用极点对称模态分解的分解-重构能力和 Elman 神经网络的非线性映射能力建立组合模型,提高了年、月径流预报精度;周育琳等<sup>[23]</sup>构建了小波- BP 神经网络组合方法用于径流预测。以上组合方法属于“串联”组合,即不同方法的先后应用。集合预报为“并联”组合方法,即对多种方法并列应用。Najafi 等<sup>[32]</sup>采用自助抽样法(bootstrap)对比了简单、中等、复杂3类方法及组合方法,表明组合方法优于各单一方法。从当前研究进展来看,构建组合预报方法已是大趋势。

从研究方法上可以将预报方法分为两大类(表2)。第一类是序列演变法,其核心是从预报变量本身寻求时间序列演变规律;第二类是因子关系法,其核心在于挖掘和构建因子和预报变量之间的数量关系,其本质上是“数据”到“数据”的模式。上述分类突出了预报方法的功能属性,其中因子关系法更利于融合径流成因信息,适用于对径流成因、因子驱动机制的挖掘与理论研究。

表 1 中长期径流变化的主要影响因素及特征

Table 1 Main factors and characteristics of mid-long term runoff evolution

| 影响因素类别 | 主要影响因素                                     | 应用依据及特征                        | 重点研究结论                                                                                                                          | 研究难点或不足                      |
|--------|--------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 天文因素   | 太阳黑子相对数、太阳 F10.7 cm 射电流量                   | 地球各圈层的能量来源,影响水/能量循环的长周期性特征     | 太阳黑子存在平均 11 a 的基本周期;太阳活动影响气候变化 <sup>[8]</sup> 、区域旱涝 <sup>[9]</sup>                                                              | 对太阳活动及其影响机制认识不足              |
| 大气环流   | ENSO、PDO、NAO、EASMI、海表温度、副高指数、环流型、经向/纬向环流指数 | 影响长期天气状态、水循环和水文过程,尤其对极端旱涝有指示作用 | 大气环流可能造成区域旱涝 <sup>[10]</sup> ,其变化特征有助于干湿的长周期预测 <sup>[11]</sup> ;ENSO 对径流丰枯变化有重要影响 <sup>[12]</sup>                               | 大气环流指标和过程;大气环流与水量、能量平衡的关系    |
| 海洋热状况  | ENSO、IOD、海表温度、关键点/区、关键月海温                  | 调节地球能量循环,影响大气环流、水/能量循环         | 海温对中长期径流有指示作用 <sup>[13]</sup> ;径流常受关键区域海温变化的影响 <sup>[14]</sup>                                                                  | 海温对大气环流的影响;影响水文过程的海温关键区和关键时段 |
| 下垫面情况  | 青藏高原感热、地温、冰盖、积雪、植被指数、土地利用                  | 影响地表水热交换,决定水文循环过程              | 青藏高原水热影响大气环流 <sup>[15]</sup> 、区域旱涝 <sup>[16]</sup> 、季风降水 <sup>[17]</sup> ;下垫面影响径流过程 <sup>[18]</sup> ;冰雪影响寒区径流水源 <sup>[19]</sup> | 青藏高原水热、下垫面变化的气候水文影响          |
| 流域水情   | 前期降水、径流、土壤湿度、蓄水量                           | 反映流域蓄水状态,决定未来水文情势              | 流域湿度信息 <sup>[20]</sup> 、前期径流 <sup>[21]</sup> 和土壤湿度 <sup>[22]</sup> 是重要预报指示因子                                                    | 土壤湿度估计;关键水情因子识别              |

注:ENSO(El Niño-southern oscillation):厄尔尼诺与南方涛动;PDO(Pacific decadal oscillation):太平洋十年涛动;NAO(North Atlantic oscillation):北大西洋涛动;EASMI(East Asian summer monsoon index):东亚夏季风指数;SOI(southern oscillation index):南方涛动指数;IOD(Indian Ocean dipole):印度洋偶极子。

表 2 中长期径流预报方法分类

Table 2 Classification of mid-long term runoff prediction methods

| 分类依据  | 方法类别  | 主要特征                                    | 代表性方法                                                |
|-------|-------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 按发展历程 | 传统方法  | 受限于资料积累和认识水平,主要考虑较简单的演变规律和相关关系          | 成因分析、水文统计、时间序列分析、相关-回归等方法                            |
|       | 现代方法  | 基于大量数据和非线性方法挖掘径流序列特征或因子与径流的数量关系         | 模糊数学、随机森林、人工神经网络、灰色系统、小波分析、支持向量机、多层递阶、经验正交分解、混沌理论等方法 |
| 按研究方法 | 序列演变法 | 主要考虑径流时间序列的演变特征,对序列进行成分提取、分解、重构         | 时间序列分析、平稳时间序列、小波分析、混沌理论、灰色预测、多层递阶、经验正交分解等方法          |
|       | 因子关系法 | 构建预报因子与径流的数量关系,包括相关关系、灰色关系、模糊关系及非线性映射关系 | 因子回归、灰色关联、模糊相关、人工智能、气象水文等方法                          |

表 3 现代预报方法的理论基础及适用性

Table 3 Theoretical basis and applicability of modern prediction methods

| 方法类别     | 理论基础                                                       | 适用条件及特征                                 | 代表性方法                  | 参考文献      |
|----------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------|-----------|
| 模糊数学方法   | 模糊集和隶属函数。现实世界中大量概念存在模糊性,无法用“属于”“不属于”进行区分                   | 适用兼具不确定性和模糊性的属性变量,如丰和枯、高和低等,存在一定主观经验性   | 模糊推理模式,可变模糊集           | [25-26]   |
| 随机森林方法   | 集成决策树。通过随机集成大量决策树的分类结果,实现最优分类                              | 处理高维样本,考虑不同分类特征的重要性,适用性广泛               | 随机森林模型                 | [5,27]    |
| 人工神经网络方法 | 神经网络模型。网络包含输入层、输出层及多个中间层,每层包含多个神经元或节点,通过层和节点之间的连接实现非线性映射关系 | 能逼近任意非线性函数,实现多输入-输出的处理,具有强自适应、自组织、自学习能力 | 前馈网络、长短期记忆网络、卷积网络、深度网络 | [4,23,28] |
| 灰色系统理论方法 | 灰色系统理论。通过时间累加/累减过程对灰色变量白化,构建灰色系统因素之间的数学关系                  | 处理具有不确定性且信息缺乏的问题,理论基础有待发展完善             | 灰色模型、灰色关联              | [26,29]   |
| 小波理论方法   | 小波变换。从时域和频域的角度将信号分解为具有不同特征的成分                              | 具有周期性演变特征的变量,常结合时间序列预测方法                | 小波周期、小波分解              | [30]      |
| 支持向量机方法  | 统计学习理论中 VC 维 (Vapnik-Chervonenkis dimension) 理论和结构风险最小原理   | 处理高维非线性分类和预测问题,具有广泛适用性                  | 支持向量机模型                | [26-27]   |
| 混沌理论方法   | 混沌运动。事物运动兼具确定性和随机性,因此可以从无序中寻求有序信息用于预报                      | 兼具确定性和随机性的变量,如径流量、气温                    | 相空间重构                  | [31]      |

### 3 中长期径流预报主要研究进展和存在的问题

#### 3.1 主要研究进展

##### 3.1.1 研究技术的发展

为了提高中长期径流预报的精度,国内外学者发展了一系列的研究技术手段,主要包括前处理、后处理、模型评估与改进 3 个方面。前处理技术包括水文非一致性处理、偏差校正、径流分级等,研究表明气候水文过程的非一致性是当前重点关注的问题<sup>[33-34]</sup>,按径流量级和动力过程分类预报的方法反映了径流组成的差异特征<sup>[35-36]</sup>,研究还证实了降水校正与径流分级对提高预报精度的必要性<sup>[37-38]</sup>。后处理技术重点聚焦预报精度的提升和不确定性评估<sup>[35,39]</sup>,体现对预报径流校正、集合预报的效果<sup>[40-41]</sup>,预报结果的概率性表达方法在中长期径流预报中具有较好的应用价值<sup>[42-43]</sup>。模型评估与改进技术研究反映了不同预报模型的适用性和不同类型径流成因差异,如气候遥相关因子更适用于大流域、前期水文条件因子更适用于小流域<sup>[44]</sup>,辨析了

不同预报方法在不同级别流量预报应用中的优势<sup>[45-46]</sup>,水量平衡及水文模型的应用提高了预报方法的物理可解释性<sup>[47-48]</sup>。不同方法的预报效果存在明显差异<sup>[27,29]</sup>,适用性评估有助于对不同方法的合理应用和改进,是提高预报效果的有效途径。就技术的应用前景而言,前处理技术和后处理技术几乎可与表 2 和表 3 中的所有方法配合应用,而模型评估与改进技术则在预报方法的流域适用性评估、过程驱动模型的应用、数据驱动模型的参数优化方法和预报方法的季节适用性评估等方面具有较好的启示性。

##### 3.1.2 对径流成因的认识

水文预报方法可分为过程驱动模型和数据驱动模型<sup>[49]</sup>,中长期水文预报的过程驱动模型研究相对滞后。对中长期径流成因方面的认识主要包括预见期、时间尺度、径流控制因子等方面,预见期与时间尺度是决定预报效果的重要因素。在序列演变法中,预见期和时间尺度反映了径流时间演变的稳定性与波动频率;在因子关系法中,预见期反映了预报因子的影响持久性,时间尺度反映了径流变化的节

律性。对于不同水文事件的预报,预见期与时间尺度选择<sup>[50]</sup>及其对预报效果的影响都与径流演变特征及成因相关。

认识径流成因是提高预测效果的可靠保证。采用准确的前期水文条件对季节径流预测的改进作用得到诸多研究的证实,气候因子与前期水文条件对季节径流的影响具有时空差异。Shukla 等<sup>[51]</sup>发现前期水文条件对月总径流和土壤湿度影响很大,当预见期超过 1 月时,径流主要受气候预测影响。Yossef 等<sup>[52]</sup>认为初始水文条件和气象驱动作用存在区域差异,冰雪数据有助于提高寒区流域高流量预测,季风区径流受季风变化影响较大,在大流域中则需关注初始地表、地下水状态。Pechlivanidis 等<sup>[53]</sup>研究了季节径流预报的关键决定因子,发现不同地区关键决定因子存在预见期相依性(尤其在冬季),季节径流可预测性与流域水文特性、气候、降水预测偏差等因素密切相关,融雪、基流主导的退水性流域可预测性较高,指出有必要基于水文气候条件进行分区研究。这些研究表明,预报因子在中长期径流预报中的作用有显著差异。虽然因子筛选过程能剔除相关性较小(即预报作用较小)的因子,但在应用中又常将所选因子进行等权应用,这种做法可能忽略了不同因子预报作用的差异,放大了次要因子的干扰作用、掩盖了主要因子的指示作用。

降水量是径流的主要控制性因子,因此了解径流的“水源”——水汽来源是中长期径流预报的重要内容<sup>[53]</sup>。了解水汽来源主要应关注大气环流形势、水汽通道、海洋状态、地形等条件,由于地形的影响已体现在水文循环过程中,且地形一般无明显变化,因而重点关注前三者。大气环流形势、海洋状态与中长期径流变化的相关性显著<sup>[1]</sup>,相关特征指标常作为径流(见表 1)或降水<sup>[54]</sup>预报因子,甚至仅用海温指标就可达到较好的预报效果<sup>[55]</sup>。由于针对海温变化和大气环流形势对水文循环影响的认识尚浅,这两类指标在径流预报中的应用具有一定的经验性。水汽通道及水汽输送情况是判别降水异常的关键因素,水汽输送条件对汛期水雨情具有较好的预报作用<sup>[56]</sup>。我国降水主要受太平洋西部、印度洋北部、北大西洋与北冰洋等水汽输送的影响,常用季风指数或水汽通量表示<sup>[57]</sup>。李夫星等<sup>[58]</sup>发现东亚夏季风强度与长江流域以北和松花江流域以南的广大地区以及华南部分地区的径流深呈显著相关性,南亚夏季风与华南地区及长江流域上游部分地区的径流深呈显著相关性。研究表明,长江源区夏季径流与高原季风和南亚夏季风存在显著相关性<sup>[59]</sup>,黄河中游径流的趋势性和周期性变化与夏季风强度相

关<sup>[60]</sup>。目前关于水汽输送对降水变化影响的研究较多<sup>[56]</sup>,而对于水汽输送与径流变化的关系研究较少且主要为定性研究<sup>[61]</sup>。水汽输送条件是中长期径流预报重点考虑因素或预报因子<sup>[62]</sup>,季风指数预报因子在中长期径流预报中发挥着重要的作用<sup>[63]</sup>。

目前对中长期径流成因的研究主要有两种途径<sup>[2]</sup>,一是以数理统计和遥相关的方式研究径流演变的气候与环境成因,如采用季节气候指数年际变率、雪水当量、前期径流、降水、气温、风速、相对湿度、日照时数、ENSO 指数、海温、太阳辐射强度等<sup>[64]</sup>。这是当前研究中应用最多的方式,然而其隐含着数量相关性 with 径流成因之间对应关系的假定<sup>[64]</sup>,该假定有待验证。二是基于气象或气候预测的中长期气象水文预报方法(如全球中长期水文气象预报系统 GloFAS Seasonal, <https://www.globalfloods.eu>)<sup>[65]</sup>,用气象预报或短期气候预测数据驱动水文模型,其物理机制主要体现于水文模型中。其输入可以直接采用天气预报产品<sup>[66]</sup>、气候预测产品<sup>[67]</sup>,或者单独开展次季节气象预报(如 7 ~ 15 d)<sup>[68]</sup>或短期气候预测(如 1 月至 1 a)<sup>[69]</sup>。仅从输入输出看,该方法与短期径流预报相似,因而对水文模型无特殊要求。该方法的预报效果较大程度上取决于气象预报或气候预测精度,常采用集合预报和偏差校正技术提高精度<sup>[66]</sup>。对欧洲中期天气预报中心(ECMWF)产品的研究表明<sup>[70]</sup>,径流预报效果存在区域性和季节性差异,且当预见期超过 1 月时精度明显下降。总体而言,第一种途径重在挖掘径流长期演变的控制因子,第二种途径则结合了气候系统演变规律和水文产汇流原理。

### 3.1.3 数据驱动模型的发展

数据驱动模型是近年来中长期径流预报研究的主要方法,主要考虑预报因子与径流之间的数量关系,采用各种人工智能方法构建映射关系进行预报。这类方法最大的特点在于适用性强、泛化能力强、精度高<sup>[71]</sup>,适于处理高维因子筛选、复杂映射关系构建<sup>[5]</sup>等问题。基于数据驱动模型(表 3)的组合方法通常能获得更好的效果,如基于 LASSO (least absolute shrinkage and selection operator)回归和支持向量机回归的组合方法具有强化有益因子、削弱干扰因子的作用<sup>[21]</sup>,基于长短期记忆(long short-term memory, LSTM)神经网络构建的小波 LSTM 和卷积 LSTM 可改善较长预见期的预报效果<sup>[31]</sup>。

数据驱动方法也存在一定的局限性。该方法要求一定的样本量用于构建输入-输出关系,而径流及预报因子资料通常存在缺测、观测系列较短、数据偏差等问题,因此数据驱动模型建模效果受数据质量

影响较大<sup>[72]</sup>。另一方面,大数据驱动模型同水文模型一样需要优化参数<sup>[27]</sup>,目前对数据驱动模型参数的认识较少,难以判断参数的合理取值范围及参数含义,预报结果也难以用水文理论知识解释,极大限制了对径流关键驱动因子的识别和对其驱动机制的研究。

### 3.1.4 预报不确定性分析

中长期径流预报的不确定性主要来源于气候或气象预测、初始水情判断、预报模型构建3个必要步骤,以及时空降尺度、偏差校正等前处理和后处理过程。Sinha等<sup>[73]</sup>提出了月-季节径流预报误差分解方法,量化分解了时空降尺度、初始水情、气候强迫、预报偏差等误差来源,并解析了误差随预报尺度的传播机制。Penn等<sup>[74]</sup>研究了气候和地表覆盖变化对季节径流预报精度的影响,发现径流预报偏差(高估或低估)与降水季节迁移变化和气候变化相关,并分析了基于积雪、降水和土地覆盖变化的回归模型对径流变化的解释能力。研究发现,在基于气候预测与水文模型的径流预报中,气候预测的不确定性大于水文模型参数的不确定性<sup>[75]</sup>,降水偏差校正可能会引入新的不确定性<sup>[76]</sup>,且不同季节的径流预报误差的主要来源不同<sup>[77]</sup>。

在不确定性评估与量化方面,Shi等<sup>[78]</sup>根据云理论提出了径流不确定性推理模型,能同时给出高精度预报结果和预报区间。Dechant等<sup>[79]</sup>提出了初始条件描述、未来气候预测、计算模型误差3源不确定性量化解释方法及降低不确定性的框架,在解析多源不确定性的同时,提高了概率预测的可靠性。研究表明,提高土壤湿度精度可提高径流预测精度下限<sup>[80]</sup>,而提高降水分辨率仅在蒸发方差显著大于降水方差的条件下才有积极意义<sup>[81]</sup>。贝叶斯概率方法是处理预报不确定性的重要方法,具有明确的理论基础,常用于量化不同来源预报的不确定性<sup>[82]</sup>。贝叶斯预报系统应用最多且适用性广泛<sup>[83]</sup>,张铭等<sup>[84]</sup>应用贝叶斯统计预报(Bayesian statistic forecasting,BSF)进行中长期径流预报,不仅提高了预报精度,还提高了预报结果的应用价值。贝叶斯预报处理器(Bayesian process of forecasts,BPF)、水文不确定性处理器(hydrologic uncertainty processor,HUP)等贝叶斯方法的发展和预报结果的应用<sup>[85]</sup>,提高了对预报不确定性的认识,进而提高了预报的精度和预报结果的应用价值。

### 3.2 存在的问题

a. 对径流关键驱动因子及其驱动机制认识不清。当前预报因子选择主要依据经验和常识,考虑了因子与径流之间的线性或非线性相关性,但对不

同预报因子的重要性、预报因子集的影响机制缺乏考虑。不同因子对径流的影响存在直接和间接的差异,这种差异在因子优选和预报应用时无法体现出来,从而导致因子的驱动机制模糊。

b. 数据驱动方法的物理解释性不足。数据驱动方法具有强大非线性映射能力,在多个研究领域得到了广泛应用。在自然科学领域的应用中,缺乏物理解释性则是普遍存在的问题。数据驱动方法是当前中长期径流预报的主要方法,其预报精度较高,但掩盖了预报因子及其集合的径流驱动机制,弱化了对中长期水文物理过程的研究。数据驱动模型中缺乏对水资源系统长期演变机理的体现,存在预报能力不稳定、缺乏对环境变化的适应能力、实践应用价值不够的缺陷。

c. 对预报结果的不确定性认识不足。与短期径流预报类似,中长期径流预报的不确定性可分为输入不确定性、模型结构不确定性和模型参数不确定性。中长期径流预报的不确定性问题尚缺乏体系化研究,且影响因素和来源更复杂。中长期径流预报的需求性较强,而当前研究中的预报结果通常缺乏不确定性评估,导致预报结果的可用性降低。

## 4 研究展望

a. 加强中长期径流物理成因研究。中长期径流影响因素复杂,只有在理论和实践上加强物理机制研究,提高对中长期径流的成因认识,才能提高预报的可靠性与预报结果的应用价值。中长期径流预报应从常用的预报因子中识别径流关键驱动因子,并从物理规律的角度挖掘其对径流的驱动机制;对关键驱动因子提出成因联系上的假设,引入已知的水文循环物理机制与基本原理,并通过精细化的实证研究进行验证;利用数据驱动方法寻找规律和机理,进而完善数据驱动方法的物理基础。

b. 加强方法的适用性与可靠性研究。当前已有大量预报方法,多为数据驱动方法,已有的研究反映出这些预报方法的普适性,但不同方法的适用性仍缺乏证据支撑。多数预报方法在率定期和检验期均显示出较高的预报精度,但在实际预报期精度却无法保证,原因是没有恰当地应用预报模型或方法,尤其是缺乏对模型的可靠性分析。在对比不同方法预报精度的同时,应注重预报方法或模型对径流成因揭示能力的比较。

c. 加强中长期径流演变相关研究成果的应用。水文气象与环境要素演变方面的研究成果积累丰富,但在中长期径流预报中应用较少,限制了中长期

径流预报理论与实践的发展。在研究水文气象要素演变规律时,更要关注不同要素之间的协同演变规律;在预报因子筛选和预报方法构建时,应充分利用径流演变及归因方面的研究成果,并在预报模型中融合环境变化对水文过程的耦合驱动机制。

## 参考文献:

- [1] 王富强. 中长期水文预报成因分析方法及其应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2010.
- [2] 杨文发,王乐,张俊. 流域多尺度水文预报应用进展及适用性探讨[J]. 人民长江, 2021, 52(10): 84-94. (YANG Wenfa, WANG Le, ZHANG Jun. Application progress and applicability of multi-scale watershed hydrological forecasting [J]. Yangtze River, 2021, 52(10): 84-94. (in Chinese))
- [3] 霍文博,李致家,张珂,等. 分布式格林-安普特降雨径流模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 47-54. (HUO Wenbo, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Study on the distributed Green-Ampt rainfall-runoff model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 47-54. (in Chinese))
- [4] 李继清,王爽,段志鹏,等. 基于ESMD-BP神经网络组合模型的中长期径流预报[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(4): 817-832. (LI Jiqing, WANG Shuang, DUAN Zhipeng, et al. Medium and long-term runoff forecast based on ESMD-BP neural network combined model [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(4): 817-832. (in Chinese))
- [5] 熊怡,周建中,贾本军,等. 基于随机森林遥相关因子选择的月径流预报[J]. 水力发电学报, 2022, 41(3): 32-45. (XIONG Yi, ZHOU Jianzhong, JIA Benjun, et al. Monthly runoff prediction based on teleconnection factors selection using random forest model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(3): 32-45 (in Chinese))
- [6] 林沛榕,张艳军,冼翠玲,等. 不同时间尺度的中长期水文预报研究[J]. 水文, 2017, 37(6): 1-8. (LIN Peirong, ZHANG Yanjun, XIAN Cuiling, et al. Time-scale features of medium- and long-range hydrological forecasting [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(6): 1-8. (in Chinese))
- [7] 刘勇,王银堂,陈元芳,等. 基于物理成因的中长期水文预报方法与应用研究[M]. 南京:河海大学出版社,2017.
- [8] 丁一汇. 太阳活动对地球气候和天气的影响[J]. 气象, 2019, 45(3): 297-304. (DING Yihui. Effect of solar activity on earth's climate and weather [J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(3): 297-304. (in Chinese))
- [9] 葛全胜,刘路路,郑景云,等. 过去千年太阳活动异常期的中国东部旱涝格局[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 707-

717. (GE Quansheng, LIU Lulu, ZHENG Jingyun, et al. Spatial patterns of drought/flood over eastern China in the periods of anomalous solar activity during the past millennium [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(5): 707-717. (in Chinese))
- [10] 张云帆,翟丽妮,林沛榕,等. 长江中下游典型流域旱涝与旱涝/涝旱急转演变规律及其驱动因子研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(10): 887-897. (ZHANG Yunfan, ZHAI Lini, LIN Peirong, et al. Variation characteristics and driving factors of drought and flood and their abrupt alternations in a typical basin in the middle reaches of Yangtze River [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(10): 887-897. (in Chinese))
- [11] 梁浩. 基于混合模型的渭河流域水文干旱预测研究[D]. 西安:西安理工大学, 2021.
- [12] 陈威,钟敏,冯伟,等. 2005—2017年两次强ENSO事件对中国区域陆地水储量变化影响的卫星重力观测[J]. 地球物理学报, 2020, 63(1): 141-154. (CHEN Wei, ZHONG Ming, FENG Wei, et al. Effects of two strong ENSO events on terrestrial water storage anomalies in China from GRACE during 2005-2017 [J]. Chinese Journal Geophysics, 2020, 63(1): 141-154. (in Chinese))
- [13] 魏显贵,潘红忠,王现勋,等. 基于海洋表面温度的龙羊峡入库径流中长期预报[J]. 人民黄河, 2021, 43(1): 29-34. (WEI Xiangui, PAN Hongzhong, WANG Xianxun, et al. Mid-long term inflow forecast of Longyangxia reservoir in upstream of Yellow River based on sea surface temperature [J]. Yellow River, 2021, 43(1): 29-34. (in Chinese))
- [14] 孙鹏,孙玉燕,张强,等. 淮河流域径流过程变化时空特征及成因[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 497-508. (SUN Peng, SUN Yuyan, ZHANG Qiang, et al. Temporal and spatial variation characteristics of runoff processes and its causes in Huaihe Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2): 497-508. (in Chinese))
- [15] 游庆龙,康世昌,李剑东,等. 青藏高原气候变化若干前沿科学问题[J]. 冰川冻土, 2021, 43(3): 885-901. (YOU Qinglong, KANG Shichang, LI Jiandong, et al. Several research frontiers of climate change over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(3): 885-901. (in Chinese))
- [16] 王天竺,赵勇. 夏季青藏高原和热带印度洋热力异常对塔里木盆地夏季降水的影响[J]. 气候与环境研究, 2021, 26(3): 275-288. (WANG Tianzhu, ZHAO Yong. Influences of summer thermal anomalies over the Tibetan Plateau and the tropical Indian ocean on summer rainfall in the Tarim Basin [J]. Climatic and Environmental Research, 2021, 26(3): 275-288. (in Chinese))
- [17] 李秀珍,唐旭紫,李施华,等. 春季青藏高原感热对中国

- 东部夏季降水的影响和预测作用[J]. 气象学报, 2018, 76(6): 930-943. (LI Xiuzhen, TANG Xuizi, LI Shihua, et al. Impact of the spring sensible heat flux over the Tibetan Plateau on summer rainfall over East China and its role in rainfall prediction[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(6): 930-943. (in Chinese))
- [18] 周祖昊, 刘佳嘉, 严子奇, 等. 黄河流域天然河川径流量演变归因分析[J]. 水科学进展, 2022, 33(1): 27-37. (ZHOU Zuhao, LIU Jiajia, YAN Ziqi, et al. Attribution analysis of the natural runoff evolution in the Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(1): 27-37. (in Chinese))
- [19] HUANG Chengcheng, NEWMAN A J, CLARK M P, et al. Evaluation of snow data assimilation using the ensemble Kalman filter for seasonal streamflow prediction in the western United States[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(1): 635-650.
- [20] ROSENBERG E A, WOOD A W, STEINEMANN A C. Informing hydrometric network design for statistical seasonal streamflow forecasts [J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(5): 1587-1604.
- [21] 谢帅, 黄跃飞, 李铁键, 等. LASSO 回归和支持向量回归耦合的中长期径流预报[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(4): 709-722. (XIE Shuai, HUANG Yuefei, LI Tiejian, et al. Mid-long term runoff prediction based on a Lasso and SVR hybrid method [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(4): 709-722. (in Chinese))
- [22] WYATT B M, OCHSNER T E, KRUEGER E S, et al. In-situ soil moisture data improve seasonal streamflow forecast accuracy in rainfall-dominated watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125404.
- [23] 周育琳, 穆振侠, 彭亮, 等. 基于互信息与神经网络的天山西部山区融雪径流中长期水文预报[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(8): 17-21. (ZHOU Yulin, MU Zhenxia, PENG Liang, et al. Mid-term and long-term hydrological forecasting of snowmelt runoff in western Tianshan Mountains based on mutual information and neural network [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(8): 17-21. (in Chinese))
- [24] 李红波, 夏潮军, 王淑英. 中长期径流预报研究进展及发展趋势[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 36-38. (LI Hongbo, XIA Chaojun, WANG Shuying. Research progress and development trend of medium-long term runoff forecasting[J]. Yellow River, 2012, 34(8): 36-38. (in Chinese))
- [25] 陈守煜, 薛志春, 李敏, 等. 基于可变集的年径流预测方法[J]. 水利学报, 2014, 45(8): 912-920. (CHEN Shouyu, XUE Zhichun, LI Min, et al. Annual runoff prediction method based on the variable sets[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8): 912-920. (in Chinese))
- [26] 朱双, 周建中, 孟长青, 等. 基于灰色关联分析的模糊支持向量机方法在径流预报中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 1-6. (ZHU Shuang, ZHOU Jianzhong, MENG Changqing, et al. Study and application of fuzzy support vector machine based on gray correlation analysis to streamflow forecasting [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(6): 1-6. (in Chinese))
- [27] 胡义明, 陈腾, 罗序义, 等. 基于机器学习模型的淮河流域中长期径流预报研究[J]. 地学前缘, 2022, 29(3): 284-291. (HU Yiming, CHEN Teng, LUO Xuyi, et al. Medium to long term runoff forecast for the Huai River Basin based on machine learning algorithm [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(3): 284-291. (in Chinese))
- [28] 李继清, 王爽, 吴月秋, 等. 径流预报的极点对称模态分解-Elman 网络模型[J]. 水力发电学报, 2021, 40(7): 13-22. (LI Jiqing, WANG Shuang, WU Yueqiu, et al. Runoff forecasts using combined model of extreme-point symmetric mode decomposition and Elman neural network [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(7): 13-22. (in Chinese))
- [29] 石继海, 宋松柏, 李航. 中长期径流预报模型优选研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 147-154. (SHI Jihai, SONG Songbai, LI Hang. Optimization of mid-long term runoff forecasting models [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(7): 147-154. (in Chinese))
- [30] NI Lingling, WANG Dong, SINGH V P, et al. Streamflow and rainfall forecasting by two long short-term memory-based models [J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124296.
- [31] 周建中, 彭甜. 长江上游径流混沌动力特性及其集成预测研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(10): 1-9. (ZHOU Jianzhong, PENG Tian. Chaotic dynamic characteristics and integrated prediction of runoff in the upper reaches of Yangtze River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(10): 1-9. (in Chinese))
- [32] NAJAFI M R, MORADKHANI H. Ensemble combination of seasonal streamflow forecasts [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016, 21(1): 04015043.
- [33] 秦建国, 张涛, 孙磊, 等. 气候转折期前后无锡站年际旱涝周期水文特性的对比分析[J]. 水文, 2017, 37(6): 51-57. (QIN Jianguo, ZHANG Tao, SUN Lei, et al. Hydrological characteristics of interannual drought and flood cycle at Wuxi station before and after climatic transition period [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(6): 51-57. (in Chinese))
- [34] GIBBS M S, MCINERNEY D, HUMPHREY G, et al. State updating and calibration period selection to improve

- dynamic monthly streamflow forecasts for an environmental flow management application [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(1): 871-887.
- [35] HUANG Zeqing, ZHAO Tongtiengang, LIU Yang, et al. Differing roles of base and fast flow in ensemble seasonal streamflow forecasting: an experimental investigation [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125272.
- [36] 唐国磊, 周惠成, 李宁宁, 等. 一种基于决策树技术的中长期径流分级方法 [J]. *水力发电学报*, 2011, 30(3): 45-49. (TANG Guolei, ZHOU Huicheng, LI Ningning, et al. Medium-and-long-term runoff classification method using decision tree technique [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(3): 45-49. (in Chinese))
- [37] YUAN X, WOOD E F. Downscaling precipitation or bias-correcting streamflow? some implications for coupled general circulation model (CGCM)-based ensemble seasonal hydrologic forecast [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(12): W12519.
- [38] SLATER L J, VILLARINI G. Enhancing the predictability of seasonal streamflow with a statistical-dynamical approach [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(13): 6504-6513.
- [39] WOLDEMESKEL F, MCINERNEY D, LERAT J, et al. Evaluating post-processing approaches for monthly and seasonal streamflow forecasts [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(12): 6257-6278.
- [40] 李伶杰, 王银堂, 胡庆芳, 等. 基于时变权重组合与贝叶斯修正的中长期径流预报 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(4): 643-650. (LI Lingjie, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Mid- and long-term runoff prediction based on time-varying weight combination and Bayesian correction [J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(4): 643-650. (in Chinese))
- [41] 赵泽谦, 黄强, 明波, 等. 基于多模型随机组合的水文集合预报方法研究 [J]. *水力发电学报*, 2021, 40(1): 76-87. (ZHAO Zeqian, HUANG Qiang, MING Bo, et al. Hydrological ensemble forecasting method based on stochastic combination of multiple models [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(1): 76-87. (in Chinese))
- [42] AHN K H, PALMER R, STEINSCHNEIDER S. A hierarchical Bayesian model for regionalized seasonal forecasts: application to low flows in the Northeastern United States [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(1): 503-521.
- [43] 桑燕芳, 李鑫鑫, 谢平, 等. 水文时间序列概率预报方法的通用架构 [J]. *湖泊科学*, 2018, 30(3): 611-618. (SANG Yanfang, LI Xinxin, XIE Ping, et al. Universal framework for hydrological time series probabilistic forecasting [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(3): 611-618. (in Chinese))
- [44] SEIBERT M, MERZ B, APEL H. Seasonal forecasting of hydrological drought in the Limpopo Basin: a comparison of statistical methods [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(3): 1611-1629.
- [45] YASEEN Z M, EBTEHAJ I, BONAKDARI H, et al. Novel approach for streamflow forecasting using a hybrid ANFIS-FFA model [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 554: 263-276.
- [46] ZHANG Gengxi, ZHOU Zhenghong, SU Xiaoling, et al. Application of entropy spectral method for streamflow forecasting in Northwest China [J]. *Entropy*, 2019, 21(2): 132.
- [47] 张雅琦. 三峡水库中长期来水水量平衡模型研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2017(2): 90-93. (ZHANG Yaqi. Research on middle-term and long-term hydrological forecast of Three Gorges Reservoir based on water balance model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(2): 90-93. (in Chinese))
- [48] SITTICHOK K, SEIDOU O, DJIBO A G, et al. Estimation of the added value of using rainfall-runoff transformation and statistical models for seasonal streamflow forecasting [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2018, 63(4): 630-645.
- [49] 王文, 马骏. 若干水文预报方法综述 [J]. *水利水电科技进展*, 2005, 25(1): 56-60. (WANG Wen, MA Jun. Review on some methods for hydrological forecasting [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2005, 25(1): 56-60. (in Chinese))
- [50] 洗翠玲, 张艳军, 邹霞, 等. 中长期径流预报的时间尺度 [J]. *武汉大学学报 (工学版)*, 2015, 48(6): 739-743. (XIAN Cuiling, ZHANG Yanjun, ZOU Xia, et al. Analysis of hydrological time-scale of mid-long term runoff forecasting [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2015, 48(6): 739-743. (in Chinese))
- [51] SHUKLA S, LETTENMAIER P. Seasonal hydrologic prediction in the United States: understanding the role of initial hydrologic conditions and seasonal climate forecast skill [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(11): 3529-3538.
- [52] YOSSEF N C, WINSEMIUS H, WEERTS A, et al. Skill of a global seasonal streamflow forecasting system, relative roles of initial conditions and meteorological forcing [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(8): 4687-4699.
- [53] PECHLIVANIDIS I G, CROCHEMORE L, ROSBERG J, et al. What are the key drivers controlling the quality of seasonal streamflow forecasts? [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(6): e2019WR026987.
- [54] 吴旭树, 王兆礼, 陈柯兵, 等. 基于大气环流和海温场的降水组合预报模型 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 81-87. (WU Xushu, WANG Zhaoli, CHEN Keping, et al. A precipitation combined forecasting model based on

- atmospheric circulation and sea surface temperature[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 81-87. (in Chinese))
- [55] 荣艳淑,胡玉恒,冯瑞瑞,等. 广义相加模型在乌江夏季径流预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 121-126. (RONG Yanshu, HU Yuheng, FENG Ruirui, et al. Application of generalized additive model in summer runoff forecasting of Wujiang Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2): 121-126. (in Chinese))
- [56] YAO Tandong, MASSON-DELMOTTE V, GAO Jing, et al. A review of climatic controls on  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation over the Tibetan Plateau: observations and simulations [J]. Reviews of Geophysics, 2013, 51(4): 525-548.
- [57] 黄荣辉,陈际龙. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异[J]. 大气科学, 2010, 34(6): 1035-1045. (HUANG Ronghui, CHEN Jilong. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(6): 1035-1045. (in Chinese))
- [58] 李夫星,陈东,汤秋鸿,等. 东亚和南亚夏季风对中国季风区径流深影响[J]. 水科学进展, 2016, 27(3): 349-356. (LI Fuxing, CHEN Dong, TANG QiuHong, et al. Influence of East and South Asian summer monsoons on runoff in the monsoon region of East China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(3): 349-356. (in Chinese))
- [59] 罗玉,秦宁生,王春学,等. 长江源区夏季径流量变化及其与高原夏季风和南亚夏季风的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(10): 2209-2218. (LUO Yu, QIN Ningsheng, WANG Chunxue, et al. Characteristics of summer runoff in the source regions of the Yangtze River and the relationship with Plateau Summer Monsoon and South Asian Summer Monsoon [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(10): 2209-2218. (in Chinese))
- [60] 颜明,李夫星,贺莉,等. 夏季风等环流因子对黄河中游径流量周期变化的影响[J]. 地理科学, 2016, 36(6): 917-925. (YAN Ming, LI Fuxing, HE Li, et al. Effects of summer monsoon and other atmospheric circulation factors on periodicities of runoff in the middle Huanghe River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(6): 917-925. (in Chinese))
- [61] WU Chuangshou, JI Changchen, SHI Benwei, et al. The impact of climate change and human activities on streamflow and sediment load in the Pearl River Basin [J]. International Journal of Sediment Research, 2019, 34(4): 307-321.
- [62] 李鸿雁,薛丽君,王红瑞,等. 流域中长期径流分类预报方法[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 817-822. (LI Hongyan, XUE Lijun, WANG Hongru, et al. Classification forecast method for mid- to long-term runoff in river basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(5): 817-822. (in Chinese))
- [63] 庞轶舒,张俊,秦宁生,等. 长江上游夏季径流量年际增量预测模型及检验[J]. 应用气象学报, 2022, 33(1): 115-128. (PANG Yishu, ZHANG Jun, QIN Ningsheng, et al. Forecast model of interannual increment for summer runoff and its verification in the upper reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2022, 33(1): 115-128. (in Chinese))
- [64] 国俊宝,余钟波,杨传国,等. 基于物理成因的中长期径流预测模型研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(5): 35-37. (GUO Junbao, YU Zhongbo, YANG Chuanguo, et al. Research on medium and long-term runoff forecasting based on physical process [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(5): 35-37. (in Chinese))
- [65] CHEN Keping, GUO Shenglian, WANG Jun, et al. Evaluation of GloFAS-seasonal forecasts for cascade reservoir impoundment operation in the upper Yangtze River [J]. Water, 2019, 11(12): 2539.
- [66] 金君良,舒章康,陈敏,等. 基于数值天气预报产品的气象水文耦合径流预报[J]. 水科学进展, 2019, 30(3): 316-325. (JIN Junliang, SHU Zhangkang, CHEN Min, et al. Meteo-hydrological coupled runoff forecasting based on numerical weather prediction products [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(3): 316-325. (in Chinese))
- [67] YUAN Xing. An experimental seasonal hydrological forecasting system over the Yellow River Basin, Part 2: the added value from climate forecast models [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(6): 2453-2466.
- [68] LIANG Zhongmin, TANG Tiantian, LI Binqun, et al. Long-term streamflow forecasting using SWAT through the integration of the random forests precipitation generator: case study of Danjiangkou Reservoir [J]. Hydrology Research, 2018, 49(5): 1513-1527.
- [69] BLUM A G, ZAITCHIK B, ALEXANDER S, et al. A grand prediction: communicating and evaluating 2018 summertime upper Blue Nile rainfall and streamflow forecasts in preparation for Ethiopia's New Dam [J]. Frontiers in Water, 2019, 1: 3.
- [70] GREUILL W, FRANSSEN W H P, HUTJES W A. Seasonal streamflow forecasts for Europe, Part 2: sources of skill [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(1): 371-391.
- [71] WU C L, CHAU K W, LI Y S. Predicting monthly streamflow using data-driven models coupled with data-preprocessing techniques [J]. Water Resources Research, 2009, 45(8): W08432.

(下转第 223 页)

- Chinese))
- [18] 张国俊,王珏哈,吴坤津,等. 中国三大城市群经济与环  
境协调度时空特征及影响因素[J]. 地理研究,2020,39  
(2): 272-288. (ZHANG Guojun, WANG Juehan, WU  
Kunjin, et al. Spatial-temporal characteristics and  
influencing factors of coordination between economic and  
environmental development of three major urban  
agglomerations in China [J]. Geographical Research,  
2020,39(2):272-288. (in Chinese))
- [19] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学  
报, 2017, 72 (1): 116-134. (WANG Jinfeng, XU  
Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J].  
Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (1): 116-134. (in  
Chinese))
- [20] 舒天衡,任一田,申立银,等. 大型城市消费活力的空间  
异质性及其驱动因素研究:以成都市为例[J]. 城市发  
展研究, 2020, 27 (1): 16-21. (SHU Tianheng, REN  
Yitian, SHEN Liyin, et al. Study on spatial heterogeneity of  
consumption vibrancy and its driving factors in large city:  
a case of Chengdu City [J]. Urban Development Studies,  
2020,27(1):16-21. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-02-24 编辑:施业)

(上接第 144 页)

- [72] 路剑飞,于吉涛,陈子桑. 中长期水文预报的模型辨识  
及预测研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2012,  
51(2): 107-112. (LU Jianfei, YU Jitao, CHEN Zishen.  
Model identification and prediction research of medium  
and long-term hydrologic forecast [J]. Acta Scientiarum  
Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2012, 51 (2): 107-  
112. (in Chinese))
- [73] SINHA T, SANKARASUBRAMANIAN A, MAZROOEI A.  
Decomposition of sources of errors in monthly to seasonal  
streamflow forecasts in a rainfall-runoff regime[J]. Journal  
of Hydrometeorology, 2014, 15(6): 2470-2483.
- [74] PENN C A, CLOW D W, SEXSTONE G A, et al. Changes  
in climate and land cover affect seasonal streamflow  
forecasts in the Rio Grande headwaters[J]. Journal of the  
American Water Resources Association, 2020, 56 (5):  
882-902.
- [75] KWON H H, DE ASSIS DE SOUZA FILHO F, BLOCK P,  
et al. Uncertainty assessment of hydrologic and climate  
forecast models in northeastern Brazil [J]. Hydrological  
Processes, 2012, 26(25): 3875-3885.
- [76] CROCHEMORE L, RAMOS M H, PAPPENBERGER F.  
Bias correcting precipitation forecasts to improve the skill  
of seasonal streamflow forecasts[J]. Hydrology and Earth  
System Sciences, 2016, 20(9): 3601-3618.
- [77] MAZROOEI A, SINHA T, SANKARASUBRAMANIAN A,  
et al. Decomposition of sources of errors in seasonal  
streamflow forecasting over the U. S. Sunbelt [J]. Journal  
of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120 (23):  
11809-11825.
- [78] SHI Yuzhi, ZHOU Huicheng. Research on monthly flow  
uncertain reasoning model based on cloud theory [J].  
Science China Technological Sciences, 2010, 53 (9):  
2408-2413.
- [79] DECHANT C M, MORADKHANI H. Toward a reliable  
prediction of seasonal forecast uncertainty: addressing  
model and initial condition uncertainty with ensemble data  
assimilation and sequential Bayesian combination [J].  
Journal of Hydrology, 2014, 519: 2967-2977.
- [80] KOSTER R D, WALKER G K, MAHANAMA S P P, et al.  
Soil moisture initialization error and subgrid variability of  
precipitation in seasonal streamflow forecasting [J].  
Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(1): 69-88.
- [81] MAHANAMA S, LIVNEH B, KOSTER R, et al. Soil  
moisture, snow, and seasonal streamflow forecasts in the  
United States [J]. Journal of Hydrometeorology, 2012, 13  
(1): 189-203.
- [82] 刘章君,郭生练,许新发,等. 贝叶斯概率水文预报研究  
进展与展望[J]. 水利学报, 2019, 50 (12): 1467-1478.  
(LIU Zhangjun, GUO Shenglian, XU Xinfu, et al. Bayesian  
probabilistic hydrological forecasting: progress and  
prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50  
(12): 1467-1478. (in Chinese))
- [83] KRZYSZTOFOWICZ R. Bayesian system for probabilistic  
river stage forecasting [J]. Journal of Hydrology, 2002, 268  
(1/2/3/4): 16-40.
- [84] 张铭,李承军,张勇传. 贝叶斯概率水文预报系统在中  
长期径流预报中的应用 [J]. 水科学进展, 2009, 20  
(1): 40-44. (ZHANG Ming, LI Chengjun, ZHANG  
Yongchuan. Application of the Bayesian statistic  
hydrological forecast system to middle- and long-term  
runoff forecast [J]. Advances in Water Science, 2009, 20  
(1): 40-44. (in Chinese))
- [85] 杨涛,徐炜,姜宏广. 基于 Box-Cox 算法的中期径流贝  
叶斯概率预报方法 [J]. 水电能源科学, 2018, 36 (6):  
17-21. (YANG Xun, XU Wei, JIANG Hongguang.  
Medium-term runoff Bayesian probability forecasting  
method based on box-cox model [J]. Water Resources and  
Power, 2018, 36(6): 17-21. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-01-30 编辑:施业)