

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.011

水文相似性研究进展

吴洪石¹, 石朋^{1,2}, 瞿思敏¹, 邱超³, 丁松¹, 王啸¹, 陆美霞¹, 李紫纯¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098;
3. 浙江省水文管理中心, 浙江 杭州 310009)

摘要:针对现有研究对水文事件相似性关注不多,且水文事件相似性缺乏统一概念的问题,从流域和水文事件两个层次阐述了水文相似性的概念,系统回顾了水文相似性在模型参数区域化研究、水文时间序列相似性分析等方面的最新进展,总结了研究中存在的问题并做出展望;指出水文相似研究应从加强内在机理性、提升水文模型参数区域化水平、强化水文事件相似性在实时预报调度中的应用等方面继续深入研究。

关键词:水文相似性;流域相似;水文事件相似;水文模型参数区域化

中图分类号:P341 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0077-10

Research progress on hydrologic similarity//WU Hongshi¹, SHI Peng^{1,2}, QU Simin¹, QIU Chao³, DING Song¹, WANG Xiao¹, LU Meixia¹, LI Zichun¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Nanjing 210098, China; 3. Zhejiang Hydrologic Management Center, Hangzhou 310009, China)

Abstract: In response to the insufficient attention paid to the similarity of hydrological events in existing research and the lack of a unified concept of hydrological event similarity, the concept of hydrological similarity was elaborated from two aspects: catchment and hydrological events. A systematic review was conducted on the latest progress in the application of hydrologic similarity in model parameter regionalization research, similarity analysis of hydrological time series, and the existing problems. The future research directions were prospected, and it was pointed out that hydrologic similarity research should continue to deepen in terms of strengthening internal rationality, improving the regionalization level of hydrological model parameters, and strengthening the application of hydrological event similarity in real-time forecasting and scheduling.

Key words: hydrologic similarity; catchment similarity; hydrological event similarity; regionalization of hydrological model parameters

相似性在自然界中广泛存在,当研究的两个事物具有某些相同的特征属性或现象时则认为两者相似。早在我国古代,大禹结合治水经验与山川地貌特征相似性,将全国划分为九大区域,即古九州^[1]。作为水文领域的特征属性之一,相似性不仅存在于流域之间,在水文事件之间更是广泛存在^[2-3]。20世纪70年代末,Rodríguez-Iturbe等^[4]通过地貌瞬时单位线开展了水文相似定量化研究。随后 Wood等^[5-7]发表一系列成果系统阐述了水文相似性在洪水频率曲线推导、流域水文模型构建等方面的应用。长期以来,有关水文相似性的议题一直都是水文领

域研究的热点,并在水文模型参数区域化研究^[8-9]、水文时间序列相似性分析^[10]等方面展现出蓬勃的生命力。特别是基于流域相似性的水文模型参数区域化方法为无资料地区径流模拟预报提供了重要的方法支撑^[11]。从观测流域借鉴有效信息并传递到无资料地区,对拓展无资料地区水文预报方法,加强水旱灾害防御具有重要的实用价值^[12-13]。目前而言,水文相似性研究多聚焦于流域相似基础上的水文区域化研究,而对水文事件相似性关注不多。与此同时,水文事件相似的概念模糊不清极大限制了其在水文学科理论发展与工程实际中的应用。如何

基金项目:国家自然科学基金项目(52179011,U2243229);浙江省水利科技计划项目(RA2202)

作者简介:吴洪石(1993—),男,博士研究生,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:whs0536@hhu.edu.cn

通信作者:石朋(1976—),男,教授,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:ship@hhu.edu.cn

透过水文相似的外在表象探索流域与水文事件相互联系的内在本质,进而加深对水文外在现象和内在机理的科学认识,对系统化开展水文相似性研究,推动水文学科发展具有重要的理论意义。

本文从流域和水文事件两个层次阐述水文相似性的概念,梳理水文相似性在无资料地区水文预报、水文相似性分析及拓展应用等方面的最新研究进展,总结当前研究中存在的短板与不足,并对未来发展方向进行展望,以期后续开展水文相似性研究提供参考。

1 水文相似性概念

作为比较水文学研究的核心内容之一,水文相似理论发展至今,众多学者已经达成一个共识,即物理属性特征相似或水文响应相似的流域可称之为相似流域^[14],相似流域之间可能存在相似的水文事件。如图 1 所示,流域相似是指具有相似的下垫面结构特征、驱动力条件和水流动力条件等的流域^[15-17],并且能够满足彼此之间模型参数可移植。其本质上是在流域物理特征相似的基础上,流域对降水输入的响应相似性^[18]。如图 2 所示,水文事件相似是指同时满足时序相似、形状相似、变化相似的同一流域或不同流域间的一个或多个水文事件过程。作为当前水文相似性研究的主要内容之一,流域相似的典型应用是无资料地区的径流预报,即通过对流域进行水文相似性分析,将与无资料地区相似的有实测资料地区的水文资料或参数移用后,便可利用现有的水文站点资料解决无站网、无资料流域的径流预报问题^[19-20]。值得注意的是,相似流域间的水文物

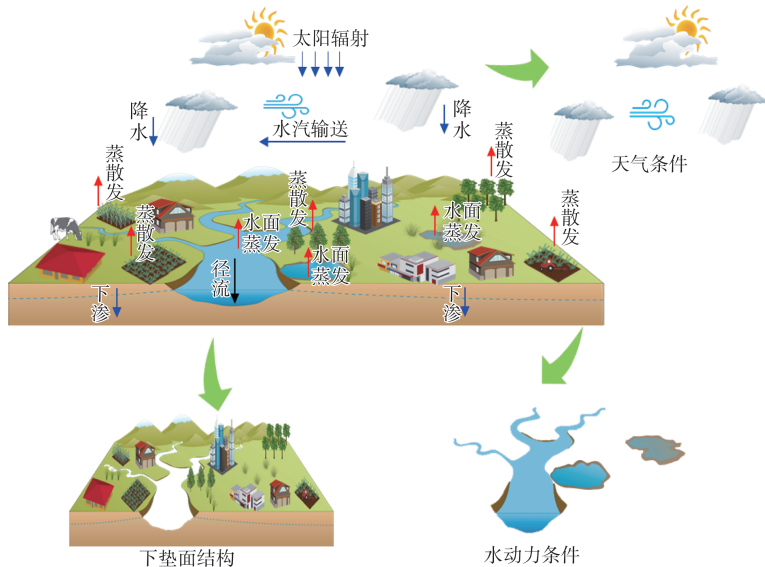


图 1 流域相似示意图
Fig. 1 Sketch of catchment similarity

理规律相似,但是水文事件的发展具有高度的随机性,由流域相似并不能直接判定水文事件相似。同理,由不同流域间的水文事件相似也不能直接判定流域是否相似。流域相似与水文事件相似二者既相互独立,也存在交集。

2 水文模型参数区域化研究进展

水文模型参数区域化也称作参数移植、参数移用,是指在划分相似流域的基础上,将有观测资料地区的模型参数通过一定传递规则移植到无观测资料流域,从而解决无资料地区的径流模拟与预报问题。水文模型参数区域化研究涉及两部分重要内容,一是水文模型参数的区域化方法,二是水文模型参数传递规则,前者回答参数区域化研究中“参数向谁借”的问题,后者则是解决“参数如何传递”的问题。

2.1 水文模型参数区域化方法

基于流域相似性的水文模型参数区域化方法是开展无资料地区水文预报的重要手段之一^[21],主要包括回归法、空间邻近法和物理相似法^[22-30](表 1)。回归法以统计学方式建立有观测资料流域模型参数与流域特征因子之间的回归关系,进而推求相似的无观测资料流域模型参数并将其应用于模拟和预报^[11]。空间邻近法假定水文响应特征具有空间连续性,空间距离越相近的流域其水文响应特征越相似,主要包括简单邻近法与空间插值法^[31]。简单邻近法通常采用欧式距离^[32]来衡量观测流域与无资料流域空间上的远近,而空间插值法则是使用克里金法、反距离加权法等进行流域区域化研究^[31]。物理相似法假定流域物理属性相似的流域,其水文物

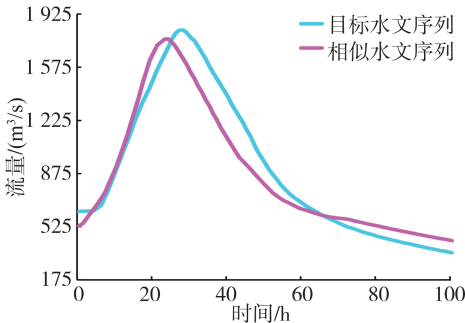


图 2 水文事件相似性示意图
Fig. 2 Sketch of hydrological event similarity

理规律也相似,主要包括流域相似指标法与聚类算法^[31]。Kay 等^[32]基于欧氏距离提出的相似性指标是代表性的流域相似性指标。另外,我国学者也基于地形地貌特征、气候条件(降水)等提出多个流域相似性判别指标^[33-34],丰富了流域相似性分析的指标选择。常用的流域相似性指标计算公式见表 2^[32-37]。

数据挖掘领域的聚类算法也是应用于流域分组的方法之一,其重点在于定义分组与选取流域物理特征^[31]。常用的聚类算法包含以层次分析法^[38]为

代表的层次聚类方法、K-means 算法及其变体^[39-40]、以 DBSCAN (density-based spatial clustering of applications with noise)^[41]为代表的密度聚类方法、以 SOM(self-organizing map)神经网络^[42-43]为代表的模型聚类方法等^[44],各方法优缺点见表 3。早在 1997 年,Lagacherie 等^[39]就验证了模糊 K-means 方法应用于流域分类的可行性。而后以 SOM 神经网络为代表的流域分类方法得到广泛关注。Toth^[42]基于日尺度降水和径流序列,应用 SOM 神经网络将意大利 44 个流域划分为 6 组。Razavi 等^[43]在应用

表 1 水文模型参数区域化方法
Table 1 Regionalization method for hydrological model parameters

方法	原理	应用区域	水文模型	应用效果	文献
回归法	相似流域间流域特征因子和模型参数的回归关系也相似	奥地利 308 个流域	HBV 模型	空间邻近法较回归法和物理相似法表现出更好的 HBV 模型参数区域化性能	Merz 等 ^[22]
		中国 55 个流域	VIC 模型	在湿润地区和干旱地区,基于物理相似法比回归法区划效果更好	Bao 等 ^[23]
		中国 11 个流域	新安江模型	多元回归法、空间邻近法、流域物理相似法和全局平均法 4 种区域化方法在研究区均具有可行性,其中多元回归法的移植效果普遍较好,空间邻近法和流域物理特性相似法次之,全局平均法较差	徐长江等 ^[24]
空间邻近法	水文响应特征具有空间连续性,空间距离越相近的流域其水文响应特征更相似	法国 913 个流域	GR4J 模型及 TOPMODEL 模型	简单邻近法流域区划效果最好,物理相似法其次,回归法效果最差	Oudin 等 ^[25]
		奥地利 209 个流域	TUW 模型、Cema Neige-GR6J 模型	克里金法对 TUW 模型参数区域化效果较好,而对 CemaNeige-GR6J 模型参数区划效果较差	Neri 等 ^[26]
		美国、加拿大 3 444 个流域	GR4J 模型、SIMHYD 模型、新安江模型和 HMETS 模型	对于不同气候区和水文模型而言,以反距离加权为代表的空间邻近法优于其他区域化方法	Qi 等 ^[27]
物理相似法	物理特征相似的流域其水文行为也相似	澳大利亚 210 个流域	新安江模型	模型参数区域化效果,空间邻近法效果最好,物理相似法次之,回归法效果较差	李红霞等 ^[28]
		法国南部 10 个流域	SWAT 模型	物理相似的流域可能表现出相似的水文行为,并且面临相似的模型预测不确定性	Sellami 等 ^[29]
		中国 32 个流域	新安江模型	空间邻近法不适用,物理相似法适用,回归方法只适用于估计参数 C_S 及 L	龚珺夫等 ^[30]

表 2 常用的流域相似性指标计算公式
Table 1 Common calculation formulas for catchment similarity indicators

计算公式	考虑流域物理特征	文献
$\text{sim}(A,B) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{A_i - B_i}{\sigma_i} \right)^2}$	河网密度、基流指数、植被覆盖指数等 15 项	Kay 等 ^[32]
$\text{sim}(A,B) = \sum_{i=1}^m w_i I_{A_i B_i}$	地形指数、河网分形维数、降水、植被等 5 项	戚晓明等 ^[33]
$\text{sim}(A,B) = \frac{1/ A_i - B_i }{\sum_{j=1}^s A_j - B_j } \sum_{i=1}^m w_i$	流域面积、主河道长、河道坡度、6—9 月各月平均降水量等 11 项	朱勇等 ^[34]
$\text{sim}(A,B) = \sum_{i=1}^m \frac{ A_i - B_i }{\Delta_i}$	平均海拔高度、森林覆盖类型、土壤类型等	Burn 等 ^[35] , Yang 等 ^[36]
$\text{sim}(A,B) = \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i \left(\frac{A_i - B_i}{\sigma_i} \right)^2}$	地形指数等下垫面特征及降水等气候指标	He 等 ^[37]

注:表中 $\text{sim}(A,B)$ 为无观测流域 A 与参证流域 B 之间相似性指标; i 为流域物理特征指标编号; m 为流域物理特征指标数量; j 为参证流域编号; s 为参证流域数量; w_i 为第 i 个物理特征指标的权重; σ_i 为第 i 个物理特征指标的标准差; Δ_i 为第 i 个物理特征指标的阈值; $I_{A_i B_i}$ 为流域间的水文相似元。

表3 常用流域聚类算法及其优缺点

Table 3 Common algorithms for catchments clustering and their characteristics

聚类算法	代表性方法	优缺点
基于层次	层次分析法 ^[38] 、主成分分析法 ^[40] 等	算法简单;适用程度高;对样本输入顺序不敏感;算法时间复杂度较大;聚类终止条件具有不确定性
基于划分	K-means ^[39] 、C-means ^[40] 等	算法简单;基于距离;时间复杂度相对较低;对基于质心的聚类,边缘点、离群点处理效果一般
基于模型	SOM 神经网络 ^[42-43] 、高斯混合模型 ^[46] 等	可视化程度高;计算复杂度高;执行效率低
基于密度	DBSCAN ^[41] 、OPTICS (ordering points to identify the clustering structure) ^[47] 等	可以发现任意形状的各类;广泛应用于空间信息处理;对噪音不敏感;较为直观
基于网格	STING (statistical information grid) ^[48] 、WaveCluster ^[49] 等	处理速度快;所有聚类都在网格结构中进行;精确性不高

SOM 神经网络的基础上同时引入了其他两种非线性聚类分析技术,用于识别加拿大安大略省流域类别。Tongal 等^[45]提出一种非线性交叉熵聚类框架,同时基于日径流序列特征值对澳大利亚 217 个流域进行分类,并通过交叉比较验证了该聚类框架较 K-means 的优越性。尽管数据挖掘领域一些新型聚类算法为划分流域类别提供了更多的方法选择,但同一种方法基于不同的流域物理特征指标,其流域分类结果存在差异;不同聚类方法基于同一特征指标,其分类结果也有所偏差。因此,流域特征指标及聚类方法的选择还需确定更为科学、客观的评估标准。

识别相似流域、合理划分流域类别是开展参数区域化研究的前提,也是提高水文区域化研究成果可信度的重要条件,但参数区域化方法均具有一定的适用范围和局限性。回归法对参证流域样本数量有一定要求,如果样本数量太少,则无法得到流域特征因子和模型参数之间合理的回归关系。此外,流域特征因子的选择也关乎参数区域化研究结果的精确性,流域特征因子选择不当不能真实地反映流域特征和模型参数之间的关系。空间邻近法使用的基础是水文响应特征具有空间上的连续性,因此在水文站网密度较高、气候和下垫面变化不大的流域能取得较为理想的应用效果,而在水文站点稀疏、环境变化强烈的流域则应用受限。此外,现阶段空间邻近法的应用多集中于湿润地区,在干旱地区的应用效果还需进一步验证。物理相似法虽然能较好地适用各种气候类型区和不同水文模型,但是如何选择合适的流域特征信息与分区方法是关键,而当前流域特征信息与分区方法的选取较为主观,缺乏统一标准,导致模型参数区域化结果不尽理想。尽管以上 3 种方法在不同地区结合不同模型表现出了不同的区域化效果,仍可总结出了一些规律性认识:就气候区而言,回归法在暖温带气候区优于另外两种方法,而空间邻近法及物理相似法从寒温带到暖温带

气候区均能够得到满意的结果;就水文模型类型而言,3 种方法均适用于集总式水文模型,而空间邻近法与物理近似法则更适用于半分布式及分布式水文模型。

2.2 水文模型参数传递准则

水文模型参数区域化研究是在对流域进行相似性度量的基础上,将率定后的参证流域(即观测流域)模型参数通过某种传递准则移用至无观测资料地区。如果参证流域仅为一个,那么可以将率定好的模型参数直接移用至无资料流域^[50]。如果参证流域有多个,那么可以采用参数平均、模拟结果平均或者区域模型参数方法等以降低模型参数移植的不确定性^[11]。参数平均法是将多个参证流域的多组参数取均值后移用至无资料流域^[51]。模型结果平均则是通过将多个参证流域的参数分别应用至无资料流域,从而分别得到相应的模拟序列并对其取平均^[52-53]。区域模型参数方法是利用流域聚类分析所划分的类别,同一类别的流域共享一组模型参数,同时属于该类别的无资料流域可以直接使用该模型的参数组进行流域径流预报^[54-55]。区域模型参数方法使用的前提是通过选合适的参数率定方法、设定目标函数,使得同类别下所有流域的径流模拟效果达到整体最优。常用的参数传递方法见表 4。

由于水文模型参数本身具有不确定性,在传递到无资料地区的过程中会进一步放大这种不确定性,从而导致无资料地区模拟效果不佳。因此,提升无资料地区模拟精度,降低参数移植过程的不确定性,是目前国内外学者聚焦的热点。Bárdossy^[56]针对水文模型参数“异参同效”特征及不确定性,提出将参数以向量的形式进行移植并应用于德国莱茵河 16 个流域,从而验证了该方法的可行性。Estacio 等^[57]采用差分进化自适应 Metropolis 算法对半干旱地区的无观测流域开展参数移植不确定性分析,重点评估了参数移植过程中的不确定性对无资料地区径流模拟的影响。当前,基于概率分布函数的参数

表 4 常用的参数传递方法

Table 4 Common parameter transfer methods

方法	原理	应用区域	水文模型	应用效果	文献
直接移植法	参数流域仅为一个,将模型参数直接移植到无资料流域	奥地利 320 个流域	半分布式 HBV 模型	依据流域属性筛选出与无资料流域最相似观测流域,通过率定参数并移植到无资料流域,模拟效果较好	Parajka 等 ^[19]
		加拿大 268 个流域	HSAMI 模型	参证流域的个数并非越多越好,随着同类别组内参证流域数量的增多,无资料流域的模拟效果可能逊于将最相似参证流域的模型参数直接移植	Arsenault 等 ^[50]
参数平均法	无资料流域的模型参数是所用参证流域的参数平均值	法国 913 个流域	GR4J 模型及 TOPMODEL 模型	模拟结果平均法和参数平均法在无资料流域均能取得不错的径流模拟结果	Oudin 等 ^[25]
		中国 7 个流域	HBV 模型	多流域同步率定的平均参数移植较单个流域率定的参数移植效果的更为可靠	盛奕华等 ^[51]
输出结果平均法	先在无资料流域分别使用参证流域的参数组得到相应的模拟序列,最后将这些模拟序列进行平均	英国 127 个流域	PDM 模型	在无资料流域使用了与其最相似的 10 个流域的参数组得到模拟序列并平均,证实了输出结果平均法在无资料流域径流模拟,特别是低流量事件模拟的可行性	Mcintyre 等 ^[52]
		澳大利亚 184 个流域	SimHyd 模型	基于物理相似的优化模型输出结果平均法较 McIntyre 等人取得了更为明显的改进效果	Reichl 等 ^[53]
区域模型参数法	利用流域聚类分析所划分的类别,同一类别的流域共享一组模型参数,同时属于该类别的无资料流域可以直接使用该模型的参数组进行流域径流预报	新西兰 21 个流域	TopNet 模型	使用区域模型参数实现同组内无资料流域的径流模拟是可行的	Singh 等 ^[54]
		中国 12 个流域	新安江模型	在规定的许可误差范围内,采用基于模糊聚类的区域模型参数移植能较好地反映无观测流域的径流变化过程	吴国群等 ^[55]

移植法^[58]逐渐兴起,该方法将所有参数行为全部移植至无资料地区,可有效克服参数移植过程中均化或内插产生的误差及“异参同效”带来的问题并降低不确定性。此外,在关注模型参数不确定性的同时,模型结构与输入的不确定性同样不容忽视,通过引入 BABATEA 及 IBUNE 等综合不确定性分析框架^[21]用于区域化研究中,能为解决模型参数区域化研究中的综合不确定性难题提供了一种新思路。

3 变化环境下流域水文要素的响应研究进展

流域相似性的另一个重要应用是评估水文要素特别是径流对气候与土地利用变化的响应。由于流域相似意味着水文响应相似,在满足空间邻近的前提下,通常认为相似流域间未来具有相似的气候和土地利用变化。基于流域相似性评估水文要素对气候变化与人类活动的响应,总体遵循以下思路:首先选取流域物理特性指标进行流域分类;其次建立现状条件下径流和气候要素(土地利用)的回归方程,在此基础上结合土地利用预测模型或气候变化预测模型预估未来土地利用及气候变化;最后结合建立的回归方程评估目标流域变化环境下的水文响

应^[59-60]。基于该思路,部分学者做了一些尝试性工作。Croke 等^[61]基于 IHACRES (identification of unit hydrographs and component flows from rainfall, evaporation and streamflow data)模型和土地利用数据,来预测无资料地区径流对土地利用和覆被变化条件下的水文响应。Leibowitz 等^[62]基于气候、地形、土壤等水文景观条件对美国俄勒冈州流域进行分类,并结合欧洲 ECHAM (entrepreneur, capital, industry, resource, management)模型以及并行气候模型(parallel climate model, PCM)评估河流对气候变化的脆弱性,整体思路对在无资料地区开展气候变化下的水资源脆弱性评估具有借鉴意义。Bassiouni 等^[63]基于面板回归模型很好地评估了无资料地区降水变化下低流量响应。

当前研究多集中于未来气候或者土地利用其中一方面未来变化下的水文响应,鲜有研究将二者统筹考虑。后续研究中,应同时考虑未来气候和土地利用双重变化,更能全面评估流域水文要素特别是无资料地区径流对气候变化与人类活动的响应,这不仅有助于揭示无资料地区水文变化机理,对指导管理部门在无资料地区做出科学决策同样具有现实意义。

4 水文时间序列相似性分析研究进展

水文时间序列相似性分析是水文时间序列数据挖掘研究的重要内容之一,即通过定义距离(欧氏距离、曼哈顿距离等)衡量两个水文时间序列之间的相似程度(即相似性度量),可应用于工程水文测报算、环境演变分析、水文过程规律分析等方面^[64]。该研究成果可直接回答预报作业过程中“当前洪水过程相当于历史上哪一时期的同类过程”等问题,对防洪减灾等意义重大。当前有关水文时间序列相似性的研究集中于两方面:一方面,通过定义新的或改进已有的相似性度量方法,提高水文序列相似性度量的准确性;另一方面则是基于水文时间序列相似性的拓展应用,特别是在预报调度作业中的应用。水文时间序列相似性研究情况见表5。

水文事件相似性揭示了两个重要事实:一方面同一流域不同时段的水文序列可能相似;另一方面不同流域的水文序列也可能相似。前者体现了水文事件相似的时间异质性,后者体现了水文事件相似的空间异质性。目前在水文时间序列相似性分析方面的工作多集中于前者,对跨流域的水文时间序列相似性研究较少。如何统筹全国9个流域片区,实现对全国水文序列特别是洪水序列基于相似性的聚

类分析,对提高洪水预报精度,探究流域时空异质性与洪水特征的互馈关系意义重大。此外,诸多学者基于洪水序列全过程,对洪水各特征指标进行评定并应用相似性分析方法做了很多有益探索,但这本质上属于静态相似性,难以满足实时洪水预报、调度过程的动态需求。在对洪水进行相似性度量过程中,有关洪水特征指标的选取多依靠经验或人为主观选择,不能全面地描述洪水发展的全过程。如何确定洪水发展过程中的关键特征指标是后续研究的前提,也是提高相似性搜索效率的关键。基于以上陈述,结合数据降维方法^[73]确定洪水关键特征指标,并根据实时、逐步增加的雨洪过程信息,发展基于实时洪水关键特征指标的动态相似性识别方法,这对实时预报、调度作业意义重大。

5 研究展望

a. 加强水文相似内在机理研究。水文相似现象与大气、土壤、地形、水动力过程密切相关,这些物理过程具有高度的非线性和随机性,且随着气候变化和人类活动的增强更加剧了这种复杂性。流域相似和水文事件相似的概念是建立在外在物理条件和水文响应、水文过程线形状变化的基础上定义的,并未对其形成的内因深入探讨。李长兴^[74]曾指出尺

表5 水文时间序列相似性研究情况
Table 5 Research progress of hydrograph similarity

研究项目	研究内容	应用效果	文献
相似性 度量方法	提出一种新的基于 Borda 数的多元水文时间序列相似性度量计算方法	通过实例分析,基于 Borda 计数法的多元水文时间序列相似性度量计算方法可以满足防汛指挥中相似水文过程查找的需要	李士进等 ^[65]
	提出一种全新的相似性度量方式-序列距离,以量化水文事件尺度上水文过程线振幅、时间以及整体走势的相似性	序列距离以一种与视觉评估密切相关的方式,能客观音量化水文事件的相似性	Ehret 等 ^[66]
	提出一种基于交叉递归图及递归定量分析的事件尺度的水文相似量化方法	与传统方法相比,该方法提供了一种更全面的水文事件相似度量方法	Wendi 等 ^[67]
	针对水文时间序列数据周期性起伏变化频繁导致的“病态匹配”问题,研究了基于最长公共子串的 DTW(dynamic time warping) 算法优化	优化后的 DTW 算法虽然提高了水文时间序列数据相似性挖掘的精度,但优化同时也增加算法的复杂性	陈春华等 ^[68]
拓展应用	利用误差的相似性扩大实时修正信息量,结合神经网络异联想记忆技术,提出了综合实时修正方法	采用综合修正方法既能获得比 AR 模型更好的精度,又不损失洪水预报的预见期	瞿思敏等 ^[69]
	基于相似流域预报误差相似这一特征,优选误差修正因子,基于二次正交回归设计,构建了预报误差模拟模型	提出的基于水文相似洪水预报修正方法结构简单、修正效果明显,适用于相似流域不同预报站洪水过程无明显差异的情形	王东升等 ^[70]
	提出基于降雨、径流相似性的径流预报方法,采用大数据挖掘在历史降雨产流过程中搜索相似过程,预测后期径流最可能的过程线	基于多因子最近邻抽样回归模型开展径流相似性预报,预报效果整体较好	谭乔凤等 ^[71]
	建立基于多因素相似性的融雪径流预报模型,并提出滚动预报方案,实现了7日预见期内逐日径流滚动预报	该方法可定量挖掘一线业务人员“参考过去预测未来”的经验,提供可解释的径流预报结果	闻昕等 ^[72]

度问题是水文相似研究的重点,尺度变化带来环境变化,进而影响时间序列的平稳性和非一致性,但现阶段有关尺度变化对水文相似性影响的研究较少。Oudin 等^[18]基于模型参数的可移植性定义流域水文相似,并且证实了流域之间明显的物理相似并不完全意味着水文相似。此外,由流域相似和水文事件相似的关系可以发现,二者之间并不完全吻合。因此,加强尺度变化对水文相似影响的探讨,明确流域水文相似的判别条件,厘清流域相似和水文事件相似的内在关联是下阶段水文相似研究的重点之一。

b. 提升水文模型参数区域化水平。基于流域相似性的水文模型参数区域化研究中,不可避免地存在流域特征指标及区域化方法的选取不合适、参证流域数量不足等问题,从而导致参数移植效果无法达到预期。此外,参数移植效果不佳的另一个原因是模型参数的不确定性,尽管当下研究假定移植过程中模型输入条件、模型结构等忽略不计并对模型参数有所侧重,但这与实际情况明显不符,参数移植过程中确定的最优参数值有可能是模型输入、结构、参数等不确定性来源共同作用的结果^[8]。然而,当前在模型参数区域化研究过程中,鲜有研究将模型结果及综合不确定性对径流预测的影响予以讨论。因此,提升水文模型参数区域化水平应从“参数向谁借”和“参数如何传递”两方面着手。首先,需要明确各种区域化方法的适用范围,评价不同流域特征因子和分区方法的选择对参数区域化结果的影响。其次,尝试将水文模型参数以概率分布函数的形式进行移植,可有效减少参数平均或内插等方法带来的不确定性。除此之外,开展参数区域化过程中综合不确定性研究,发展不确定性评估新技术并实现其区域化运用。

c. 强化水文事件相似在实时预报调度中的应用。基于流域相似的水文模型参数区域化研究为开展水文相似在实时预报调度中的应用研究提供了启示:相似流域间可以传递有价值的信息。借鉴这一思想,结合数据挖掘算法,如何充分挖掘蕴藏在相似水文事件中的参数、误差等潜在信息,探讨这些历史信息指导未来预测的可行性,是未来水文事件相似研究的重要方向。此外,洪水是涉及起涨流量、暴雨中心位置等的多元、高维水文序列,洪水指标的筛选关乎洪水子序列搜索的准确性和识别效率,这就要求必须首先确定洪水序列的关键特征指标,同时所需要的动态识别算法不仅要具备快速、准确的子序列搜索能力,还要拥有强大的高维数据处理能力。因此,强化水文事件相似性在实时预报调度中的应

用,筛选表征洪水过程的关键特征指标是前提,研发功能强大的数据挖掘算法是关键。

6 结 语

水文相似性是水文的重要特征属性之一,相关研究的开展有助于加强对水文外在现象和内在机理的科学认识,对促进不同学科之间交叉、渗透,完善水文学科发展,拓宽工程实际应用具有重要的理论与实际意义。针对目前水文相似性研究多聚焦于流域相似基础上模型参数区域化研究,而对水文事件相似关注不多。本文梳理了水文相似理论的进展与应用,从流域和水文事件两个层次阐述了水文相似性的概念,总结了基于流域相似的水文区域化研究与基于水文事件相似的相似性分析及拓展应用研究存在的问题,展望了未来研究方向,指出今后的水文相似性研究应聚焦于以下几个方面:从水循环过程导致水文相似的相互作用机制出发,强化水文相似的内在机理研究;制定客观统一的区域化方法选取标准,发展参数移植过程中综合不确定性识别与评估技术,提升水文模型参数区域化水平;研发具备高维数据处理与快速搜索能力的水文时间序列动态识别算法,强化水文事件相似性在实时预报调度中的应用。

参考文献:

- [1] 杨儒宾. 大禹与九州原理[J]. 杭州师范大学学报(社会科学版), 2020, 42(4): 1-19. (YANG Rubin. Da Yu and Principle of China [J]. Journal of Hangzhou Normal University (Humanities and Social Sciences), 2020, 42(4): 1-19. (in Chinese))
- [2] MCMILLAN H K. A review of hydrologic signatures and their applications [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews-Water, 2020, 8(1): e1499.
- [3] 欧阳如琳, 任立良, 周成虎. 水文时间序列的相似性搜索研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 241-245. (OUYANG Rulin, REN Liliang, ZHOU Chenghu. Similarity search in hydrological time series [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(3): 241-245. (in Chinese))
- [4] RODRÍGUEZ-ITURBE I, DEVETO G, VALDÉS J B. Discharge response analysis and hydrologic similarity: the interrelation between the geomorphologic IUH and the storm characteristics [J]. Water Resources Research, 1979, 15(6): 1435-1444.
- [5] WOOD E F, HEBSON C S. On Hydrologic similarity: 1. derivation of the dimensionless flood frequency curve [J]. Water Resources Research, 1986, 22(11): 1549-1554.

- [6] SIVAPALAN M, BEVEN K, WOOD E F. On hydrologic similarity:2. a scaled model of storm runoff production [J]. Water Resources Research, 1987, 23 (12): 2266-2278.
- [7] SIVAPALAN M, WOOD E F. On hydrologic similarity:3. a dimensionless flood frequency model using a generalized geomorphologic unit hydrograph and partial area runoff generation[J]. Water Resources Research, 1990, 26 (1): 43-58.
- [8] 苟娇娇, 缪驰远, 段青云. 水文模型参数敏感性分析-优化-区域化方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2022, 41 (7): 1338-1348. (GOU Jiaojiao, MIAO Chiyuan, DUAN Qingyun. Progress in parameter sensitivity analysis-optimization-regionalization methods for hydrological models[J]. Progress in Geography, 2022, 41 (7): 1338-1348. (in Chinese))
- [9] 严登华, 王坤, 李相南, 等. 全球陆地地表水资源演变特征[J]. 水科学进展, 2020, 31 (5): 703-712. (YAN Denghua, WANG Kun, LI Xiangnan, et al. Evolution characteristics of global land surface water resources[J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (5): 703-712. (in Chinese))
- [10] 赵圆元, 张行南, 黄钰凯, 等. 基于动态权重的水文时间序列相似性分析方法[J]. 水电能源科学, 2021, 39 (2): 9-12. (ZHAO Yuanyuan, ZHANG Xingnan, HUANG Yukai, et al. Similarity analysis method of hydrological time series based on dynamic weight[J]. Water Resources and Power, 2021, 39 (2): 9-12. (in Chinese))
- [11] 杨雪, 袁丹, 罗军刚, 等. 无资料流域径流模拟预测研究进展综述[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37 (3): 354-360. (YANG Xue, YUAN Dan, LUO Jungang, et al. A review of runoff prediction in ungauged basins[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2021, 37 (3): 354-360. (in Chinese))
- [12] 刘志雨, 刘玉环, 孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49 (1): 1-6. (LIU Zhiyu, LIU Yuhuan, KONG Xiangyi. Problems, strategies and key technology research of flood forecasting and early warning for small and medium-sized rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (1): 1-6. (in Chinese))
- [13] 李巧玲, 马亚楠, 李致家, 等. 无资料小水库影响下的中型水库入库洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49 (3): 213-219. (LI Qiaoling, MA Yanan, LI Zhijia, et al. Inflow flood simulation of medium reservoirs under impact of ungauged small reservoirs[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (3): 213-219. (in Chinese))
- [14] 刘昌明. 关于比较水文学的研究[J]. 地理学报, 1987 (2): 182-188. (LIU Changming. On research of comparative hydrology[J]. Acta Geographica Sinica, 1987 (2): 182-188. (in Chinese))
- [15] 刘金涛, 宋慧卿, 王爱花. 水文相似概念与理论发展探析[J]. 水科学进展, 2014, 25 (2): 288-296. (LIU Jintao, SONG Huiqing, WANG Aihua. Advances in the theories of hydrologic similarity: a discussion[J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (2): 288-296. (in Chinese))
- [16] HRACHOWITZ M, SAVENIJE H H G, BLÖSCHL G, et al. A decade of predictions in ungauged basins (PUB): a review [J]. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 2013, 58 (6): 1198-1255.
- [17] MERZ R, BLÖSCHL G. Regionalisation of catchment model parameters [J]. Journal of Hydrology, 2004, 271 (1): 95-123.
- [18] OUDIN L, KAY A, ANDREASSIAN V, et al. Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? [J]. Water Resources Research, 2010, 46: W11558.
- [19] PARAJKA J, MERZ R, BLÖSCHL G. A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters [J]. Hydrology and Earth Systems Sciences, 2005, 9 (3): 157-171.
- [20] YANG X, MAGNUSSON J, XU C Y. Transfer ability of regionalization methods under changing climate [J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 67-81.
- [21] 于瑞宏, 张宇瑾, 张笑欣, 等. 无测站流域径流预测区域化方法研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47 (12): 1528-1539. (YU Ruihong, ZHANG Yujin, ZHANG Xiaoxin, et al. Review of regionalization methods on streamflow prediction in ungauged basins [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (12): 1528-1539. (in Chinese))
- [22] MERZ R, BLÖSCHL G. Regionalisation of catchment model parameters[J]. Journal of Hydrology, 2004, 287 (1/2/3/4), 95-123.
- [23] BAO Z, ZHANG J, LIU J, et al. Comparison of regionalization approaches based on regression and similarity for predictions in ungauged catchments under multiple hydro-climatic conditions [J]. Journal of Hydrology, 2012, 466: 37-46.
- [24] 徐长江, 杨无双, 汪青静, 等. 无资料地区水文模型参数估算方法比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2018 (5): 109-113. (XU Changjiang, YANG Wushuang, WANG Qingjing, et al. The comparison of hydrological model parameter estimation methods in ungauged basins [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018 (5): 109-113. (in Chinese))
- [25] OUDIN L, ANDREASSIAN V, PERRIN C, et al. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged

- catchments: a comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(3), W03413.
- [26] NERI M, PARAJK A J, TOTH E. Importance of the informative content in the study area when regionalising rainfall-runoff model parameters: the role of nested catchments and gauging station density[J]. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 2020, 24(11): 5149-5171.
- [27] QI W, CHEN J, LI L, et al. Impact of the number of donor catchments and the efficiency threshold on regionalization performance of hydrological models [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 601: 126680.
- [28] 李红霞, 张永强, 敖天其, 等. 无资料地区径流预报方法比较与改进[J]. *长江科学院院报*, 2010, 27(2): 11-15. (LI Hongxia, ZHANG Yongqiang, AO Tianqi, et al. Comparison of regionalization approaches for runoff prediction in free of observational data catchments[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, 27(2): 11-15. (in Chinese))
- [29] SELLAMI H, LA JEUNESSE I, BENABDALLAH S. Uncertainty analysis in model parameters regionalization: a case study involving the SWAT model in mediterranean catchments (Southern France) [J]. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 2014, 18(6): 2393-2413.
- [30] 龚珺夫, 陈红兵, 朱芳, 等. 新安江模型在资料匮乏的长江中下游山区中小流域洪水预报应用[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(2): 581-594. (GONG Junfu, CHEN Hongbing, ZHU Fang, et al. Application of Xin'anjiang model in the flow prediction of ungauged small and medium sized catchments in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(2): 581-594. (in Chinese))
- [31] GUO Y, ZHANG Y, ZHANG L, et al. Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: a comprehensive review[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Water*, 2020, 8(1): e1487.
- [32] KAY A L, JONES D A, CROOK S S M, et al. An investigation of site-similarity approaches to generalisation of a rainfall-runoff model[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(1): 500-515.
- [33] 戚晓明, 陆桂华, 吴志勇, 等. 水文相似度及其应用[J]. *水利学报*, 2007, 38(3): 355-360. (QI Xiaoming, LU Guihua, WU Zhiyong, et al. Hydrology similarity degree and its application [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(3): 355-360. (in Chinese))
- [34] 朱勇, 宋萌勃, 雷红富, 等. 相似流域选择的随机分析方法[J]. *中国农村水利水电*, 2007(3): 4-6. (ZHU Yong, SONG Mengbo, LEI Hongfu, et al. The stochastic assessment method for choosing hydrological similar basin [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2007(3): 4-6. (in Chinese))
- [35] BURN D H, BOORMAN D B. Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 143(3/4): 429-454.
- [36] YANG X, MAGNUSSON J, HUANG S C, et al. Dependence of regionalization methods on the complexity of hydrological models in multiple climatic regions [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124357.
- [37] HE Y, BÁRDOSSY A, ZEHE E. Catchment classification based on characterisation of streamflow and precipitation time series [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(11): 3539-3553.
- [38] SAHOO S, SIL I, DHAR A, et al. Future scenarios of land-use suitability modeling for agricultural sustainability in a river basin[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 205: 313-328.
- [39] LAGACHERIE P, CAZEMIER D R, VANGAANS PF M, et al. Fuzzy k-means clustering of fields in an elementary catchment and extrapolation to a larger area [J]. *Geoderma*, 1997, 77(2/4): 197-216.
- [40] JAFFRE J B D, CUFF B, CUFF C, et al. Hydrological characteristics of Australia: national catchment classification and regional relationships [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 127969.
- [41] LI J, ZHANG Y, QIN Q M, et al. Investigating the impact of human activity on land use/cover change in China's Lijiang River Basin from the perspective of flow and type of population[J]. *Sustainability*, 2017, 9(3): 383.
- [42] TOTH E. Catchment classification based on characterisation of streamflow and precipitation time series [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(3): 1149-1159.
- [43] RAZAVI T, COULIBALY P. Classification of Ontario watersheds based on physical attributes and streamflow series[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 493: 81-94.
- [44] 贺玲, 吴玲达, 蔡益朝. 数据挖掘中的聚类算法综述[J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(1): 10-13. (HE Ling, WU Lingda, CAI Yichao. Survey of clustering algorithms in data mining [J]. *Application Research of Computers*, 2007, 24(1): 10-13. (in Chinese))
- [45] TONGAL H, SIVAKUMAR B. Cross-entropy clustering framework for catchment classification [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 433-446.
- [46] WAINWRIGHT H M, UHLEMANN S, FRANKLIN M, et al. Watershed zonation through hillslope clustering for tractably quantifying above-and below-ground watershed heterogeneity and functions [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(2): 429-444.
- [47] 段明秀, 唐超琳. 一种基于密度的聚类算法实现[J].

- 吉首大学学报(自然科学版),2013,34(1):26-27. (DUAN Mingxiu,TANG Chaolin. Realization of clustering algorithm based on density[J]. Journal of Jishou University(Natural Sciences Edition),2013,34(1):26-27. (in Chinese))
- [48] 赵卓真. 一种基于密度与网格的聚类方法[D]. 广州: 中山大学,2012.
- [49] 毕玲. 小波聚类算法的研究及应用[D]. 大连: 大连理工大学,2006.
- [50] ARSENAULT R,BRISSETTE F P. Continuous streamflow prediction in ungauged basins: the effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches[J]. Water Resources Research,2014,51(7):6135-6153.
- [51] 盛奕华,衣学军,黄迎春,等. 基于多流域同步率定的 HBV 模型参数移植方法研究[J]. 中国农村水利水电,2021(2):66-70. (SHENG Yihua, YI Xuejun, HUANG Yingchun, et al. Parameter transfer based on simultaneous calibration of the HBV model[J]. China Rural Water and Hydropower,2021(2):66-70. (in Chinese))
- [52] MCINTYRE N,LEE H,WHEATER H, et al. Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments[J]. Water Resources Research,2005,41:W12434.
- [53] REICHL J P C, WESTERN A, MCINTYRE N R, et al. Optimization of a similarity measure for estimating ungauged streamflow [J]. Water Resources Research, 2009, 45(10): W10423.
- [54] SINGH S K, MCMILLAN H, BÁRDOSSY A, et al. Nonparametric catchment clustering using the data depth function [J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61(15):2649-2667.
- [55] 吴国群,甘升伟,刘金涛. 基于模糊聚类法的无资料流域水文过程模拟[J]. 水电能源科学,2018,36(10):13-16. (WU Guoqun, GAN Shengwei, LIU Jintao. Hydrological process simulation in ungauged areas based on fuzzy clustering method [J]. Water Resources and Power,2018,36(10):13-16. (in Chinese))
- [56] BÁRDOSSY A. Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2007,11(2):703-710.
- [57] ESTACIO A B S, COSTA A C, SOUZA F A, et al. Uncertainty analysis in parameter regionalization for streamflow prediction in ungauged semi-arid catchments [J]. Hydrological Sciences Journal, 2021, 66(7): 1132-1150.
- [58] ATHIRA P,SUDHEER K P,CIBIN R, et al. Predictions in ungauged basins: an approach for regionalization of hydrological models considering the probability distribution of model parameters [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2016,30(4):1131-1149.
- [59] SIVAPALAN M, YAEGER M A, HARMAN C J, et al. Functional model of water balance variability at the catchment scale: 1. evidence of hydrologic similarity and space-time symmetry [J]. Water Resources Research, 2011,47:W02522.
- [60] SAWICZ K A, KELLEHER C, WAGENER T, et al. Characterizing hydrologic change through catchment classification[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014,18:273-285.
- [61] CROKE B F W, MERRITT W S, JAKEMAN A J. A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments [J]. Journal of Hydrology,2004,291(1/2):115-131.
- [62] LEIBOWITZ S G, COMELECIO R L, WIGINGTON P J, et al. Hydrologic landscape classification evaluates streamflow vulnerability to climate change in Oregon, USA [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2014,18(9): 3367-3392.
- [63] BASSIOUNI M, VOGEL R M, ARCHFIELDS A, et al. Panel regressions to estimate low-flow response to rainfall variability in ungauged basins [J]. Water Resources Research,2016,52(12):9470-9494.
- [64] 李薇,孙洪林. 水文时间序列相似性查询的分析与研究:以漯河站、何口站汛期降雨量相似性查询为例 [J]. 水文,2009,29(6):76-80. (LI Wei, ZHANG Honglin. Analysis and study on hydrological time series similarity search[J]. Journal of China Hydrology,2009,29(6):76-80. (in Chinese))
- [65] 李士进,朱跃龙,张晓花,等. 基于 Borda 计数法的多元水文时间序列相似性分析[J]. 水利学报,2009,40(3):378-384. (LI Shijin, ZHU Yuelong, ZHANG Xiaohua, et al. Borda counting method based similarity analysis of multivariate hydrological time series [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(3):378-384. (in Chinese))
- [66] EHRET U,ZEHE E. Series distance:an intuitive metric to quantify hydrograph similarity in terms of occurrence, amplitude and timing of hydrological events[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(3):877-896.
- [67] WENDI D,MERZ B,MARWAN N. Assessing hydrograph similarity and rare runoff dynamics by cross recurrence plots [J]. Water Resources Research, 2019, 55(6): 4704-4726.
- [68] 陈春华,李薇,陈雅莉. 基于优化 DTW 算法的水文要素时间序列数据相似性分析[J]. 水文,2021,41(3):44-48. (CHEN Chunhua, LI Wei, CHEN Yali. Similarity analysis of hydrological time series based on optimized DTW algorithm[J]. Journal of China Hydrology,2021,41(3):44-48. (in Chinese))

(下转第 94 页)

- system: a case study of Jing-Jin-Ji region, China [J]. Ecological Indicators, 2019, 96: 383-391.
- [25] 焦士兴, 王安周, 李青云, 等. 河南省城镇化与水资源耦合协调发展状况[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 21-26. (JIAO Shixing, WANG Anzhou, LI Qingyun, et al. Study on coupling and coordinated development of urbanization and water resources in Henan Province [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 21-26. (in Chinese))
- [26] 万欣, 卞文婕, 魏然, 等. 海绵城市水系统耦合协调发展及动态响应研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 135-142. (WAN Xin, BIAN Wenjie, WEI Ran, et al. Research on coupling coordination development and dynamic response of water system of sponge cities [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 135-142. (in Chinese))
- [27] 刘佳琪, 董怡, 许明军, 等. 武汉市废水排放 EKC 曲线及驱动效应研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(02): 89-94. (LIU Jiaqi, DONG Yi, XU Mingjun, et al. Study on EKC curve and driving effect of wastewater discharge in Wuhan [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43(2): 89-94. (in Chinese))
- [28] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1228. (CHENG Qiyue. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(7): 1225-1228. (in Chinese))
- [29] 姚尧. 湖南省土地利用转型的时空演变特征及其与社会经济发展耦合协调机制研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [30] 向敬伟, 万沙, 胡守庚. 城市生态经济耦合协调发展的因子贡献度分析: 以武汉市为[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2015, 15(6): 30-36. (XIANG Jingwei, WAN Sha, HU Shougeng. Research on factor contribution degree of coordinated development in Wuhan's eco-economic system [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Science Edition), 2015, 15(6): 30-36. (in Chinese))
- [31] 姜晓艳, 吴相利. 林业资源型城市生态-经济-社会协调发展的定量测度: 以黑龙江省伊春市为例[J]. 生态学报, 2021(21): 1-12. (JIANG Xiaoyan, WU Xiangli. Quantitative investigation of the coordinated development of ecology-economy-society in forest resource-based city: a case study of Yichun, Heilongjiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021(21): 1-12. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-12-17 编辑: 王芳)

(上接第 86 页)

- [69] 瞿思敏, 包为民. 实时洪水预报综合修正方法初探[J]. 水科学进展, 2003, 14(2): 167-171. (QU Simin, BAO Weimin. Comprehensive correction of real-time flood forecasting[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(2): 167-171. (in Chinese))
- [70] 王东升, 胡关东, 袁树堂. 基于水文相似性的预报误差修正[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 140-145. (WANG Dongsheng, HU Guandong, YUAN Shutang. Hydrological forecasting error corrections based on hydrological similarity[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 140-145. (in Chinese))
- [71] 谭乔凤, 陈然, 朱阳, 等. 基于多因子最近邻抽样回归模型的径流相似性预报[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 521-527. (TAN Qiaofeng, CHEN Ran, ZHU Yang, et al. Runoff similarity forecast based on multi-factor nearest neighbor bootstrapping regressive model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 521-527. (in Chinese))
- [72] 闻昕, 陈然, 谭乔凤, 等. 基于多因素相似性的融雪径流预报方法研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(3): 46-59. (WEN Xin, CHEN Ran, TAN Qiaofeng, et al. Study on forecasting method of snowmelt runoff based on multi-factor similarity[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(3): 46-59. (in Chinese))
- [73] 张珂, 牛杰帆, 李曦, 等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 28-35. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 28-35. (in Chinese))
- [74] 李长兴. 论流域水文尺度化和相似性[J]. 水利学报, 1995(1): 40-46. (LI Changxing. On catchment hydrological scale and similarity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(1): 40-46. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-11-13 编辑: 王芳)