

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220221

# 水文模型参数区域化方法研究进展

孙周亮<sup>1,2</sup>, 刘艳丽<sup>1,3,4</sup>, 陈鑫<sup>1</sup>, 舒章康<sup>1</sup>,  
吴厚发<sup>1</sup>, 王婕<sup>1</sup>, 鲍振鑫<sup>1,3,4</sup>, 王国庆<sup>1,3,4</sup>

1. 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 210029;
2. 水资源工程与调度全国重点实验室(武汉大学), 湖北 武汉 430072;
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:**参数区域化方法是解决资料缺乏地区水文模拟和预报的有效手段,主要包括回归法、空间邻近法和属性相似法三类方法,可将有资料流域的水文模型参数移用到资料缺乏流域。首先回顾了区域化方法的基本原理和应用方法,并分析了三类主要区域化方法的适用性。从流域特征因子、水文模型及参数、不确定性探讨三个方面综述了区域化方法的研究进展。分析发现,当前区域化方法缺乏完善的理论基础,流域特征因子选择存在主观性,水文模型及参数的适用性方面研究不足。最后展望了未来的研究重点:(1)多维度适用性比较;(2)水文过程和参数的空间分布规律;(3)参数的尺度问题;(4)参数区域化的不确定性问题。

**关键词:**无资料流域;水文预测;参数区域化;水文相似理论;流域特征因子

**中图分类号:**P338;TV124

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2023)04-0001-07

## 0 引言

水文模型是开展水文预报、水资源管理的主要工具,准确的参数是水文模拟获得满意效果的重要保证<sup>[1]</sup>。资料缺乏是全球普遍存在的问题<sup>[2]</sup>,据《2018年全国水文统计年报》,我国水文站网密度达中等发达国家水平,但西部地区站网密度明显低于中部和东部地区<sup>[3]</sup>,因此水文观测资料缺乏问题是我国国民经济发展中面临的重要挑战。参数区域化方法(或简称“区域化方法”)是近年来的研究热点,指借用有资料的区域(流域)获取资料缺乏地区的水文模型参数。刘苏峡等<sup>[4]</sup>、杨雪等<sup>[5]</sup>均以“借米”为例总结了资料缺乏流域水文预测或模拟的研究方法,其本质都是区域化方法,或者说区域化方法是无资料流域水文预测(PUB)的主要方法<sup>[6]</sup>。国外学者GOTTSCHALK<sup>[7]</sup>以瑞

典为例较早地研究了水文特征的地理变异性,我国学者胡凤彬等<sup>[8]</sup>也探讨了四水源新安江模型中产汇流等参数在我国不同地区的地理规律,并提出了参数的地理综合方法,验证了水文模型参数地理综合方法的可行性。因此,研究水文模型参数区域化对于提高无资料流域水文研究、推进水文科学理论发展具有重要意义。本文阐述了常用的三类区域化方法概念及其基本假定,分析了各类方法的适用性与局限性,总结了区域化方法的研究进展并指出了未来研究重点,对资料缺乏地区水文模拟及预报研究具有重要参考意义。

## 1 参数区域化方法回顾

### 1.1 主要区域化方法

不同的学者对区域化方法的分类虽然不尽相同<sup>[5,9-10]</sup>,但不外乎空间邻近法、属性相似法、回归法、算

收稿日期:2022-06-15

网络首发日期:2022-10-17

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1814.P.20221014.1817.002.html>

基金项目:国家自然科学基金项目(52079079,91847301,92047203);江苏省自然科学基金(BK20191129)

作者简介:孙周亮(1993—),男,湖北咸宁人,博士研究生。主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:zlsun19@whu.edu.cn

通信作者:刘艳丽(1981—),女,河南泌阳人,博士,正高级工程师。主要从事气候变化对水文水资源的影响研究。E-mail:yliu@nhri.cn

术平均法<sup>[11]</sup>、就地外延法<sup>[14]</sup>、相似流域分区法<sup>[15]</sup>、流量历时曲线法<sup>[12]</sup>等,其中前三种区域化方法应用最广泛。

空间邻近法(或称空间近似法、空间距离法等)通常根据有资料流域和无资料流域之间的距离(形心或测站)选择参证流域进行参数移植或参数计算。该方法假定水文响应特征具有空间连续性<sup>[5]</sup>、邻近流域具有相似的水文响应特征<sup>[9]</sup>,具体又可分为空间距离平均法、反距离权重插值法和克里金插值法。空间距离平均法选择邻近流域(通常气候类型相似)作为参证流域,对参证流域的参数进行平均,或移用参证流域的参数后对预测结果进行平均<sup>[13]</sup>,其中直接移用邻近流域参数法为空间距离平均法的特例<sup>[14]</sup>。反距离权重插值法和克里金插值法通常用于参证流域个数较多的情形<sup>[4]</sup>,即将多个流域率定好的参数插值到目标流域。无论是空间距离平均法、反距离权重插值法还是克里金插值法,三种距离的处理方式本身就包含了对参数空间分布规律的假定,然而参数空间连续性假定、各种参数空间分布特征假定尚缺乏科学依据,还需要在不同气候与下垫面条件下进一步检验。

属性相似法(或称物理相似法)同空间邻近法类似,不同之处在于属性相似法中参证流域的选择依据是流域特征属性相似。该方法假定流域形状、下垫面、气候等物理特征相似的流域具有相似的水文响应<sup>[9]</sup>,常用的流域特征属性有水文、气候、地形、地貌、植被、土壤等类别。在确定参证流域后,参数的计算方法主要包含平均法和物理权重法,其中平均法同空间距离平均法(参数平均和结果平均),物理权重法依据参证流域和目标流域的流域特征因子之间的相似性(如相关性)计算权重,具体计算方法可见BAO等<sup>[15]</sup>。在选择参证流域时,还可以采用水文分区的方法进行辅助,即先将资料缺乏流域和备选参证流域一起作为样本,利用聚类等方法进行分组<sup>[16]</sup>,然后从资料缺乏流域的同组流域中选择有资料流域作为参证流域。属性相似法基于水文相似理论,因而该方法的可靠性依赖于水文相似理论<sup>[17]</sup>,如水文相似的定义及水文相似评价等。

回归法是指先在有资料的流域中构建流域特征因子和参数之间的统计回归关系,然后代入无资料流域的流域特征因子求得参数<sup>[18]</sup>。该方法假定模型参数与流域特征之间存在回归关系且回归关系在空间上可移植<sup>[19]</sup>。在回归法中,参证流域的选择方法除了参考空间邻近法和属性相似法以外,还有诸如随机选

择、嵌套选择等方法<sup>[20]</sup>;所采用的流域特征因子与属性相似法中采用的因子类别基本一致<sup>[5,9]</sup>;回归关系中多以线性回归为主<sup>[12]</sup>,非线性回归的研究较少<sup>[21]</sup>。随着数据驱动模型的发展,回归关系已不限于传统回归关系,未来还可包括更复杂的非线性映射关系,如各类机器学习等智能方法构建的复杂映射关系<sup>[22]</sup>。

## 1.2 区域化方法的适用性

正如三种区域化方法基于不同的假定一样,它们的适用性与局限性也各不相同。从表1不难看出,每种方法的适用性特点与参证流域或流域特征因子的选择方法及参数的计算方法密切相关。在研究中应全面考虑目标流域与备选参证流域的实际情况,结合各种方法的特点灵活应用,如程艳等<sup>[23]</sup>、李红霞等<sup>[24]</sup>基于距离相近法和属性相似法提出综合相似法,徐文馨等<sup>[25]</sup>将验证期的径流模拟Nash效率系数不低于0.65设为筛选备选参证流域的条件之一,这些方法均取得了较好的参数区域化应用效果。考虑到各种区域化方法所依托的假定不同,已有的研究通常将选定的区域化方法应用于全部水文模型参数<sup>[11-12]</sup>,这可能忽略了区域化方法对每个参数的适用性差异。在参数移植中,各水文模型参数的地理分布规律不尽相同,不同的参数计算方法(平均或回归)对各参数的适用性尚缺乏依据。参数的可移植性可能也会因不同水文模型而存在差异,应用时需充分考虑水文模型的物理机制及参数的物理意义,从而了解参数的地理分布规律及适用的区域化方法。

表1 三种主要区域化方法的适用性与局限性<sup>[10]</sup>

Table1 Applicability and limitations of three main regionalization methods

区域化方法	适用性	局限性
空间邻近法	适用于地形地貌和气候条件变化较小的区域。反距离权重法和克里金法适用于参证流域均匀分布地区。	当流域特征变化较大时效果较差。参数平均法需参证流域间相关性较小。反距离权重法对流域间的空间方位缺乏考虑。
属性相似法	适用于流域物理特征类似的区域。	流域特征因子的选择主观性较强。不需回归法的线性假设。
回归法	适用于多参证流域且流域物理特征相似的地区。	须满足流域特征与模型参数的相关性假设和流域特征因子的水文相关假设。易出现“异参同效”现象。流域特征因子的选择主观性较强。不适用于参证流域小样本情形。

环境变化和尺度问题是当前区域化方法适用性面临的主要挑战。环境变化(如气候变化和人类活动

影响等)导致水文系统的非一致性,即原有的水文模型参数不再反映当前的水文响应特征。YANG等<sup>[26]</sup>对比了距离相近法、属性相似法和回归法三类区域化方法在不同气候区的适用性,结果表明在非平稳气候条件下所有方法的区域化效果均有下降,且参数越多的模型下降越快,不同气候区(海洋性、大陆性、极地性等)的区域化效果存在明显差异,大陆性、极地性气候区的不确定性更大。YANG等<sup>[27]</sup>评估了气候变化下区域化方法的可移用性(从当前时期移用到气候变化时期的性能变化)与不确定性,结果表明物理相似法比距离相近法和回归法对气候变化的敏感性更低,且气候模式和区域化方法的不确定性贡献与流域有关。

尺度问题一直是水文模拟中的前沿难点,诸多水文模型参数都受到尺度变化的影响<sup>[28]</sup>。KUMAR等<sup>[29]</sup>通过将多尺度参数区域化技术MPR应用到不同气候区和不同尺度流域,研究发现尺度变化对区域化性能影响很小(3%),而气候和地表变化对结果的影响较大(10%~20%)<sup>[30]</sup>,MPR方法比基于水文响应单元HRUs的方法及其他不考虑空间变化的标准类方法具有更高的有效性和可靠性<sup>[31]</sup>,对环境和尺度变化的适应性更强。综上可知,环境变化与尺度变化对区域化效果的影响尚不清晰,未来应加强相关研究。

## 2 参数区域化方法研究进展

如前文所述,在三种主要区域化方法中,空间邻近法和属性相似法重点考虑参证流域的选择,而回归法重点考虑水文模型参数的计算。但无论是哪种参数区域化方法,均涉及到流域特征因子选择及水文模型选用,不确定性也是无资料流域水文模拟中的重点课题。因此,以下主要针对这三个方面的进展进行综述。

### 2.1 流域特征因子

流域特征因子是回归法、属性相似法中参证流域选择的主要参考因素,也是回归法中计算参数的自变量,因此流域特征因子的选择会直接影响参数区域化效果。杨雪等<sup>[5]</sup>总结了属性相似法中常用的流域特征因子,这些因子主要涉及地形、地貌、土壤、植被、土地利用、气候、水文等多方面的流域物理属性。于瑞宏等<sup>[10]</sup>总结了区域化研究中常用的流域特征因子,包括地文特性、气象因子、水文因子、土地利用及土壤等。

目前研究中采用的流域特征因子主要有两类,一类是如前文所述的流域物理属性因子,这也是研究中

应用最早和最广泛的<sup>[19]</sup>。另一类是流域水文响应特征指标,如径流量、洪峰流量、流量历时曲线(FDC)、径流系数等流量特征指标<sup>[32-33]</sup>等。FDC通常被认为是流域水文响应特征的重要指标,如MOHAMOUD<sup>[34]</sup>构建了基于地貌、土壤、基岩、气候、水文等因子的FDC重建方法,展现了该方法在PUB应用的良好前景;PANTHI等<sup>[35]</sup>构建FDC上17个百分位流量与流域面积、年平均降水量、年平均温度、平均坡度、森林覆盖率和土壤深度六个流域特征因子的幂律关系,从而构建了资料缺乏流域的FDC,并分析了参证流域的距离与流域特征对结果的影响。这两类指标在应用中通常并不严格区分,而是按需组合应用。

无论采用哪种因子,其目的都是为了刻画流域的物理特征,尤其是决定水文响应关系的流域属性特征。面对众多已知以及未知(可能存在而未提出和应用过)的流域特征因子,因子的选择依据和方法至关重要<sup>[36]</sup>。流域特征因子的选用方法一般可分为三类,第一类是经验性方法,主要依据研究者的个人经验,如YADAV等<sup>[37]</sup>组合高流量指标、低流量指标、径流系数、FDC等多个流域水文响应指标进行参数区域化研究,显示出了更好的适用性。第二类方法考虑因子的物理意义,即因子与水文模型参数的物理关联,如张友静等<sup>[38]</sup>基于地形指数和径流曲线数构建了水文响应指数HRI,构建了HRI和水文响应单元HRU与模型参数的统计关系用于参数推求,反映了水文响应特征对于参数区域化的重要性。第三类方法是采用优化方法逐步获取更合适的因子集,如ZHANG等<sup>[39]</sup>构建了考虑更大范围和数量的流域特征的多目标框架,在区域化中采用智能优化算法优选流域特征因子,该研究将PUB区域化问题转化为流域水文响应特征指标的优选识别和多目标搜索问题,在降低不确定性的同时也拓展了区域化的研究思路。不同流域特征因子对水文响应的影响一直是水文研究中的热点和难点,未来还需要加强流域特征因子选择对区域化应用效果的影响研究,发展更丰富的流域特征因子优选方法。

### 2.2 水文模型及其参数

水文模型选择及参数计算是参数区域化中的固有环节,于瑞宏等<sup>[10]</sup>总结了区域化研究中常用的水文模型及其参数,包括集总式模型(TATE、GR4J、PDM、IHACRE、SIMHYD)、半分布式模型(TOPMODEL、HSPF、HBV、PREVAH、SWAT、新安江模型)和分布式模型(VIC),并指出集总式模型因参数较少而应用较

多,分布式及半分布式模型因参数较多而存在计算困难。基于数据驱动模型的区域化研究还较少,主要是由于数据驱动模型对水循环物理成因考虑不足,其参数与流域属性特征因子缺乏成因关联<sup>[40]</sup>。

在水文模型应用方面,不同类型模型对区域化效果影响的对比研究及相关结论总体较少。GOSWAMI等<sup>[41]</sup>对区域化方法和水文模型进行组合对比,表明不同的组合方案对模拟效果具有明显差异。集总式、概念性模型通常因参数较少而易于应用,存在忽略了流域空间差异以及模型结构所带来的影响等重要问题<sup>[42]</sup>。(半)分布式模型因物理基础而受到青睐,但面临庞大参数集的可移植性<sup>[43]</sup>、参数对水文响应特征的指示能力(物理意义是否明确)<sup>[44]</sup>等问题,如YANG等<sup>[26]</sup>对比GR4J、WASMOD、HBV和XAJ四个模型发现参数平均方案与结果平均方案的差异与参数个数正相关,参数最多的XAJ模型结果最好。由于参数个数与模型直接关联,基于不同水文模型结果的比较很难将差异归因于参数个数<sup>[43]</sup>,因此参数个数对区域化研究的影响还缺乏直接的证据。

在水文模型参数计算方面,当前研究主要关注参数与流域属性的相关性、参数推求方法及区域化方法对不同参数的适用性。KOKKONEN等<sup>[45]</sup>认为仅仅利用参数与流域属性之间的定量关系无法保证参数区域化效果,参数整体移植与单个参数分别处理之间还存在一定的争议,如参数分别处理可能打破了水文模型参数的整体性,未来需要更多关注参数之间的整体协同关系及其与流域特性之间的关系。CARRILLO等<sup>[46]</sup>在构建气候和流域特征与水文响应的关系研究时发现,仅有少数几个参数与流域特征相关。龚珺夫等<sup>[47]</sup>采用不同方法对新安江模型参数进行区域化时发现,回归法仅适用于参数CS(河网水流消退系数)和L(河网汇流滞时),物理属性相似法适用于参数CS和KI(壤中流出流系数),充分反映了不同参数空间分布规律的差异性和区域化方法对参数的适用性差异。以上研究表明,采用参数区域化方法推求参数时,既要根据参数的物理意义考虑参数与流域特征因子的相关性,还要注意所选区域化方法对不同参数的适用性差异。

### 2.3 不确定性探讨

在参数区域化的不确定性分析方面,当前研究主要聚焦于其来源和成因辨识、度量方法及降低方法。在不确定性来源和成因辨识方面,GÖTZINGER和

BÁRDOSSY<sup>[48]</sup>构建了流域特征与参数的传递函数,并通过改变条件形成四种区域化方法,发现均不适用于重度改造或调节的流域,表明非一致性问题对参数区域化效果有影响。SELLAMI等<sup>[49]</sup>提出了一种参数区域化的不确定性传播分析方法,发现基于相同气候地理区域的流域之间具有相似的水文特征,预测的不确定性与流域属性差异成正比,且参证流域的不确定性会随参数转移到目标流域。GAO等<sup>[50]</sup>研究发现参证流域不同目标函数对参数率定的影响会传递到目标流域。在不确定性度量方面,SAMANIEGO等<sup>[51]</sup>构建了KNN参数区域化方法的不确定性度量方法,提出基于Copula的距离识别方法大大减小了径流预测的不确定性。LANE等<sup>[52]</sup>利用蒙特卡洛方法对多个区域化方法的参数进行采样,从而量化多尺度参数区域化方法(MPR)的不确定性,提高了区域化效果。BASTOLA等<sup>[53]</sup>针对直接率定无法解释建模不确定性的问题,提出了一种将参数的后验概率分布区域化的方法,考虑了参数之间的相互依赖性,并量化了预测的确定性。不确定性降低方法方面,SEIBERT和MCDONNELL<sup>[54]</sup>论证了软数据(非直接用于率定的观测数据)的应用、软硬数据的结合对改善径流模拟的价值,未来也可探索参数区域化和软数据应用的结合。PARAJKA等<sup>[55]</sup>提出一种同时率定多个流域的迭代率定方法(iterative regional calibration, IRC),考虑了参数之间的空间相关性,降低了参数不确定性、提高了径流模拟效果。从上述研究可知,已有的不确定性相关研究尚未覆盖参数区域化的全过程、综合性研究偏少<sup>[56]</sup>,未来应加强全过程不确定性来源辨识与量化的综合研究,从而降低参数区域化的不确定性。

参数区域化的核心难题是水文过程(参数)的空间分布规律不清。BECK等<sup>[57]</sup>利用4229个流域构建了参数和气候-地表特征之间的传递函数关系,王怀军等<sup>[58]</sup>研究发现流域分类、模型效率、产汇流参数分别受到不同气候和下垫面因素的影响,郭良等<sup>[59]</sup>研究了全国小流域单位线特征值综合公式,反映了洪水过程特性的地理分布规律,较好地呈现了参数的空间变化模式。有研究<sup>[60]</sup>表明即使是在同一水文分区(干旱区或湿润区)中也存在差异,目前对这种同水文分区内出现差异的规律和原因尚不明确。YE等<sup>[61]</sup>通过分析50个流域的退水曲线特征,构建流域属性与退水曲线参数的回归关系,导出了蓄水量和暴雨地下出流量的参数化方案。TERRIBILE等<sup>[62]</sup>研究发现土壤参数信息

和水文过程之间存在密切的交互影响,表明合理度量土壤特征的空间变化有利于水文过程描述。上述研究表明,在参数区域化过程中,厘清水文模型参数的地理分布规律有助于降低参数区域化的不确定性。

### 3 展望

我国河流水文观测覆盖率整体低于世界水平,尤其是西部地区站网密度较低。由于水文观测站点总是有限的,而社会经济发展对水文资料和水文预报的需求呈持续增长和多样化的趋势,因而水文资料缺乏的问题将会一直存在。鉴于水文物理机制的复杂性、水文观测资料的有限性与水文模型的局限性,尚无法通过数学物理公式直接计算全部水文模型参数,因此参数区域化方法是当前解决资料缺乏问题的主要手段。加强参数区域化方法的理论基础研究是提高无资料流域参数计算合理性和水文预报精度的重要前提。基于当前参数区域化的研究现状,未来研究趋势和重点如下:

(1)多维度适用性比较。参数区域化研究包含参证流域选择方法、流域特征因子选择、水文模型选择、参数计算方法等多方面,且均已出现多种可选方法。当前研究中已有大量的组合方案,但各方法的适用性不明确。应加强不同方法及其组合方案的适用性,提高区域化方法应用的合理性和水文模拟精度。当前研究多限于结果的比较,未来应加强方法适用性的比较研究。

(2)水文过程和参数的空间分布规律。参数的地理分布特性是区域化的核心依据,也是参证流域选择和参数计算方法的依据。当前研究中的距离相似法、属性相似法及回归法等,在合理性方面尚缺乏充分依据。无论是水文相似理论,还是参数区域化方法,其核心都是水文响应特征(或水文过程、水文模型参数)的空间分布规律。因此,加强水文参数的空间差异研究可推动参数区域化方法的理论发展及应用效果。

(3)参数的尺度问题。尺度问题是指水文模型参数所代表的水文过程的时空尺度。非线性是流域的基本属性,这决定了水文过程和参数无法用简单的方法进行时空外延或简单移植。在不同流域空间尺度或时间尺度下,同一参数的空间分布及其时空转换关系或有差异。当前的参数区域化研究多以日尺度及洪水过程尺度为多,未来应加强不同时间步长、不同流域尺度下的比较研究。

(4)参数区域化的不确定性问题。不确定性是水文模拟中的共性问题,尤其在资料缺乏地区更突出。因此,基于参数区域化的水文模拟需要考虑区域化方法的不确定性,这给不确定性研究增加了一个甚至多个维度。为了提高无资料流域预报的可靠性,应将源自区域化方法的不确定性区分开来,在水文模拟中的输入不确定性、模型结构不确定性及模型参数不确定性之外单独进行量化分析。参数区域化方法的不确定性还可分离为参证流域选择、流域特征因子集、参数计算方法等多个来源的不确定性。

#### 参考文献:

- [1] 苟娇娇, 缪驰远, 徐宗学, 等. 大尺度水文模型参数不确定性分析的挑战与综合研究框架[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 327-335.
- [2] HRACHOWITZ M, SAVENIJE H H G, BLÖSCHL G, et al. A decade of predictions in ungauged basins (PUB)—a review[J]. Hydrological Sciences Journal, 2013, 58(6): 1198-1255.
- [3] 黄艳艳. 融合遥感信息的水文站网优化布局方法研究: 以雨量站和墒情站为例[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2020.
- [4] 刘苏峡, 刘昌明, 赵卫民. 无测站流域水文预测(PUB)的研究方法[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1333-1339.
- [5] 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.
- [6] 姜璐璐, 吴欢, Lorenzo A, 等. 基于遥感与区域化方法的无资料流域水文模型参数优化方法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(6): 1152-1164.
- [7] GOTTSCHALK L. Hydrological regionalization of Sweden[J]. Hydrological Sciences Journal, 1985, 30(1): 65-83.
- [8] 胡凤彬, 夏佩玉, 沈言贤. 四水源新安江流域模型及参数地理规律的探讨[J]. 水文, 1986(1): 16-24.
- [9] 李红霞, 张新华, 张永强, 等. 缺资料流域水文模型参数区域化研究进展[J]. 水文, 2011, 31(3): 13-17.
- [10] 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.
- [11] JIN X, XU C Y, QI Z, et al. Regionalization study of a conceptual hydrological model in Dongjiang basin, south China[J]. Quaternary International, 2009, 208(1-2): 129-137.
- [12] KIM U, KALUARACHCHI J J. Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia[J]. Journal of Hydrology, 2008, 362(1-2): 39-56.
- [13] OUDIN L, ANDRÉASSIAN 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).
- [14] CROKE B, 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.
- [15] BAO Z X, ZHANG J Y, LIU J F, 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, 466-467: 37-46.
- [16] LAAHA G, BLÖSCHL G. A comparison of low flow regionalisation methods—catchment grouping[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 323(1-4): 193-214.
- [17] 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.
- [18] PARAJKA J, VIGLIONE A, ROGGER M, et al. Comparative assessment of predictions in ungauged basins—part 1: runoff-hydrograph studies [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(5): 1783-1795.
- [19] SEIBERT J. Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model [J]. *Agr. Forest Meteorol.*, 1999, 98-99: 279-293.
- [20] MERZ R, BLÖSCHL G. Regionalisation of catchment model parameters[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 287(1-4): 95-123.
- [21] 麦合木提·图达吉, 胡智丹, 胡宏昌, 等. 无资料中小流域水文模型的参数移植与数据同化[J]. *水文*, 2021, 41(5): 32-37.
- [22] 刘昌军, 周剑, 文磊, 等. 中小流域时空变源混合产流模型及参数区域化方法研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2021, 19(1): 99-114.
- [23] 程艳, 敖天其, 黎小东, 等. 基于参数移植法的SWAT模型模拟嘉陵江无资料地区径流[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(13): 81-86.
- [24] 李红霞, 张永强, 敖天其, 等. 无资料地区径流预报方法的比较与研究[J]. *长江科学院院报*, 2010, 27(2): 11-15.
- [25] 徐文馨, 陈杰, 顾磊, 等. 长江流域径流对全球升温 1.5°C 与 2.0°C 的响应[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(6): 690-705.
- [26] YANG X, MAGNUSSON J, HUANG S, et al. Dependence of regionalization methods on the complexity of hydrological models in multiple climatic regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 582: 124357.
- [27] YANG X, MAGNUSSON J, XU C Y. Transferability of regionalization methods under changing climate[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 67-81.
- [28] ZHANG M F, LIU N, HARPER R, et al. A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 44-59.
- [29] KUMAR R, LIVNEH B, SAMANIEGO L. Toward computationally efficient large-scale hydrologic predictions with a multiscale regionalization scheme[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(9): 5700-5714.
- [30] SAMANIEGO L, KUMAR R, THOBER S, et al. Toward seamless hydrologic predictions across scales[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(9): 4323-4346.
- [31] KUMAR R, SAMANIEGO L, ATTINGER S. Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(1): 360-379.
- [32] KAYAN G, RIAZI A, ERTEN E, et al. Peak unit discharge estimation based on ungauged watershed parameters[J]. *Environmental Earth Sciences* 2021, 80(1): 42.
- [33] KULT J M, FRY L M, GRONEWOLD A D, et al. Regionalization of hydrologic response in the Great Lakes basin: considerations of temporal scales of analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519 (Part B): 2224-2237.
- [34] MOHAMOUD M Y. Prediction of daily flow duration curves and streamflow for ungauged catchments using regional flow duration curves[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2008, 53(4): 706-724.
- [35] PANTHI J S, ROCKY T, GANESH R G, et al. Hydrologic regionalization under data scarcity: implications for streamflow prediction[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2021, 26(9).
- [36] RAZAVI T, COULIBALY P. Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods[J]. *Journal of Hydrology Engineering*, 2013, 18(8): 958-975.
- [37] YADAV M, WAGENER T, GUPTA H. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(8): 1756-1774.
- [38] 张友静, 陈波, 何川, 等. 水文响应指数及其在TOPMODEL参数区域化中的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(5): 539-544.
- [39] ZHANG Z, WAGENER T, REED P, et al. Reducing uncertainty in predictions in ungauged basins by combining hydrologic indices regionalization and multiobjective optimization[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(12).
- [40] 刘攀, 郑雅莲, 谢康, 等. 水文水资源领域深度学习研究进展综述[J]. *人民长江*, 2021, 52(10): 76-83.
- [41] GOSWAMI M, O'CONNOR K M, BHATTARAI K P. Development of regionalisation procedures using a multi-model approach for flow simulation in an ungauged catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2-4): 517-531.
- [42] KLING H, GUPTA H. On the development of regionalization relationships for lumped watershed models: The impact of ignoring sub-basin scale variability[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373(3-4): 337-351.
- [43] HUANG S, EISNER S, MAGNUSSON J O, et al. Improvements of the spatially distributed hydrological modelling using the HBV model at 1 km resolution for Norway[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 123585.
- [44] GARAMBOIS P A, ROUX H, LARNIER K, et al. Parameter regionalization for a process-oriented distributed model dedicated to flash floods[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 383-399.
- [45] KOKKONEN T S, JAKEMAN A J, YOUNG P C, et al. Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(11): 2219-2238.
- [46] CARRILLO G, TROCH P A, SIVAPALAN M, et al. Catchment clas-

- sification: hydrological analysis of catchment behavior through process-based modeling along a climate gradient[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(3): 3411–3430.
- [47] 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, 650.
- [48] GÖTZINGER J, BÁRDOSSY A. Comparison of four regionalisation methods for a distributed hydrological model[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2–4): 374–384.
- [49] SELLAMI H, JEUNESSE I L, BENABDALLAH S, et al. Uncertainty analysis in model parameters regionalization: a case study involving the SWAT model in Mediterranean catchments (Southern France) [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(6): 2393–2413.
- [50] GAO W, GUO H C, LIU Y, et al. Impact of Calibration Objective on Hydrological Model Performance in Ungauged Watersheds[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 20(8).
- [51] SAMANIEGO L, BÁRDOSSY A, KUMAR R. Streamflow prediction in ungauged catchments using copula-based dissimilarity measures [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(2).
- [52] LANE R A, FREER J E, COXON G, et al. Incorporating uncertainty into multiscale parameter regionalization to evaluate the performance of nationally consistent parameter fields for a hydrological model[J] *Water Resources Research*, 2021, 57(10).
- [53] BASTOLA S, ISHIDAIRA H, TAKEUCHI K. Regionalisation of hydrological model parameters under parameter uncertainty: A case study involving TOPMODEL and basins across the globe[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 357(3–4): 188–206.
- [54] SEIBERT J, MCDONNELL J J. Gauging the ungauged basin: relative value of soft and hard data[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 20(1).
- [55] Parajka J, Merz R, Blöschl G. A comparison of regionalization methods for catchment model parameters[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005, 9(3): 157–171.
- [56] WAGENER T, WHEATER H S. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 320(1–2): 132–154.
- [57] BECK H E, PAN M, LIN P, et al. Global fully distributed parameter regionalization based on observed streamflow from 4, 229 headwater catchments[J]. *Journal of Geophysical Research- Atmospheres*, 2020, 125(17).
- [58] 王怀军,张建云,王国庆,等.中国中小河流气候和下垫面与产汇流过程关系研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(1): 109–120.
- [59] 郭良,翟晓燕,刘荣华,等.全国小流域分布式单位线综合分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2019, 17(4): 252–261.
- [60] 林炳青,陈莹,陈兴伟. SWAT模型水文过程参数区域差异研究[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(11): 12.
- [61] YE S, LI H Y, HUANG M, et al. Regionalization of subsurface stormflow parameters of hydrologic models: Derivation from regional analysis of streamflow recession curves[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519 (Part A): 670–682.
- [62] TERRIBILE F, COPPOLA A, LANGELLA G, et al. Potential and limitations of using soil mapping information to understand landscape hydrology[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(12): 3895–3933.

## Review of Hydrological Model Parameter Regionalization Method

SUN Zhouliang<sup>1,2</sup>, LIU Yanli<sup>1,3,4</sup>, CHEN Xin<sup>1</sup>, SHU Zhangkang<sup>1</sup>,

WU Houfa<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>, BAO Zhenxin<sup>1,3,4</sup>, WANG Guoqing<sup>1,3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, 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:** Parameter regionalization methods are an effective tool to solve hydrological modeling and forecasting in ungauged basins. They mainly include three types of methods: regression method, spatial nearest neighbor method, and attribute similarity method, which can transfer the hydrological model parameters of the gauged basin to ungauged basin. Firstly, the fundamental principles and application method of these regionalization methods were reviewed, and the applicability of these regionalization methods was analyzed. The research progress of regionalization methods is reviewed from three aspects: basin characteristics factors, hydrological models and parameters, and uncertainty. The analysis reveals that the current regionalization method lacks a sound theoretical basis, the selection of basin characteristics factors is subjective, and the applicability of hydrological models and parameters is not sufficiently studied. Finally, the future research emphases were prospected: (1) multi-dimensional applicability comparison; (2) spatial distribution pattern of hydrological processes and parameters; (3) scale issue of parameters; and (4) uncertainty of regionalization.

**Keywords:** ungauged basins; hydrological forecasting; parameter regionalization; theory of hydrological similarity; basin characteristics factors