

# 区划方法在无资料地区水文预报中的应用研究

伊璇<sup>1</sup>,周丰<sup>2</sup>,周璟<sup>1</sup>,王心宇<sup>1</sup>,郭怀成<sup>1</sup>

(1.北京大学环境科学与工程学院,水沙科学教育部重点实验室,北京 100871;  
2.北京大学城市与环境学院,地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871)

**摘要:**区划方法是国际上解决无资料地区水文预报问题的常用方法,是近20年水文学界热点问题之一。本文通过介绍当前国际应用区划方法解决无资料地区水文预报问题的研究进展、存在问题和应用前景,为国内无资料地区水文模拟研究提供借鉴和参考。文章将区划方法分为3类:临近流域替代法、水文相似流域替代法和回归法。通过文献梳理及案例分析,本文指出各类方法的问题、适用范围及不同资料条件下方法选择。最后,通过对国际上无资料地区水文预报的总结分析,提出我国无资料地区研究亟待解决的5个问题。

**关键词:**无资料水文预报;区划;区划分析;水文相似;水文模型

**中图分类号:**P338 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2014)04-0021-07

## 1 前言

径流监测数据是进行水资源管理、污染控制、水灾害评价等工作的前提条件,然而我们所掌握的数据往往无法满足需求,许多地区数据匮乏甚至没有数据。据WMO的数据显示,全球每个水文站点的控制面积约从15km<sup>2</sup>至10 000km<sup>2</sup>,数据显示近20年世界上的水文站点数量正在迅速减少,前苏联和一些发展中国家减少了约25%~40%<sup>[1]</sup>。加之人类活动严重影响流域水文过程,使得历史数据无法适用现实情况。为此,国内外的水文学家试图开展无资料地区的水文模拟研究,以弥补水文资料缺失的不足。

中国拥有3 400多个国家级水文站点,相对于960万km<sup>2</sup>的国土面积而言数量严重不足,且站点布局不均<sup>[2]</sup>。由此国内水文研究亟需针对无资料地区进行研究。国内常见的方法有水文比拟法和单位线法。近年来,随着水文模型不断发展,许多新方法相应提出,如移用相关法<sup>[3]</sup>、地貌参数法<sup>[4]</sup>等。

国际水文科学协会(IAHS)于2003~2012年开展

了PUB(Predictions in Ungauged Basins)<sup>[5]</sup>计划,在这10年里,无资料地区的水文预报研究有了巨大的突破。遥感、分布式模型和统计区划是国际上解决PUB问题的常见方法,其中最为通用的当属区划方法。水文区划(regionalization)是指结合水文模型、遥感技术、统计等方法,通过寻找流域间水文相似性和加强水文模型与流域特征的联系,来解决水文模拟中无资料问题的一种方法。本文将重点介绍国际上应用区划方法解决无资料地区水文预报问题的研究进展、存在问题和应用前景,来为国内无资料地区水文模拟研究提供借鉴和参考。

## 2 区划分析方法

区划方法可以分为3类(图1)。第一类方法是临近流域替代法,无资料流域可以通过临近有资料区域的数据来替代或插补。第二类方法是水文相似流域替代法,即基于流域特征相似性寻找相似流域进行替代。第三类方法是回归法,通过寻找模型参数(model parameters)和流域特征(catchment characteristics)

收稿日期:2013-08-23

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07102-06, 2012ZX07503-002)

作者简介:伊璇(1989-),女,山东泰安人,博士研究生,主要从事水资源管理与水污染控制工作。E-mail: xuanyi.eva@gmail.com

通讯作者:郭怀成(1953-),男,北京人,教授,博士生导师,主要从事环境规划与管理及水污染控制等方面研究。E-mail: hcguo@pku.edu.cn

之间的回归关系  $MPs=f(CC_s), r^2 \rightarrow \max$ , 来估计无资料流域的水文模型参数。



图1 区划分析的方法分类  
Fig.1 Category of regionalization analysis methods

### 2.1 临近流域替代法

空间距离是表现水文相似的最直接特征。一般来说，这类区划分析的前提为水文行为在空间上的变化是逐渐且平稳的<sup>[6]</sup>。Sawicz<sup>[7]</sup>对空间临近区划分析的解释为气候对于水文行为的影响很大，且流域在空间变化上缓慢均匀。两流域在地理空间上的距离可以用欧氏距离表示：

$$d_{u,g} = \sqrt{(X_u - X_g)^2 + (Y_u - Y_g)^2} \rightarrow \min \quad (1)$$

式中： $X_u, X_g$  和  $Y_u, Y_g$  分别为无资料流域和有资料流域的地理坐标。

临近流域替代法可以分为空间临近法<sup>[8,9]</sup>和插值法<sup>[10,11]</sup>，前者是直接移用临近流域的水文信息(包括模型参数)，例如水文比拟法<sup>[12]</sup>；后者则是通过临近几个流域进行插值，例如线性插值<sup>[13]</sup>，格里格插值法等。许多学者对不同方法进行对比，例如靳晓莉<sup>[9]</sup>对比代理流域法和全局平均法，效果相似。Merz<sup>[8]</sup>在对奥地利308个流域研究时发现基于Kriging法和上下游平均法的区划结果好于空间临近法。Vandewiele<sup>[10]</sup>研究比利时75个流域中临近法有44%的流域模型拟合效果很好，格里格法高达72%。

### 2.2 水文相似流域替代法

一个流域的结构特征(即景观、地形、地质等)和气候特征(即降雨、蒸发等)决定着流域的水文响应行为<sup>[14,15]</sup>。当流域特征相似，流域的水文响应行为也相似，即流域具有水文相似性(图2)。此外，流域地貌结构与气候特征相对于径流数据在测量上更加详细，为数据外推提供可靠保障<sup>[16]</sup>。水文相似流域替代法是通过识别与无资料地区水文相似的有资料流域(式2)，进行资料(或参数)传递以解决PUB问题的一种方法。

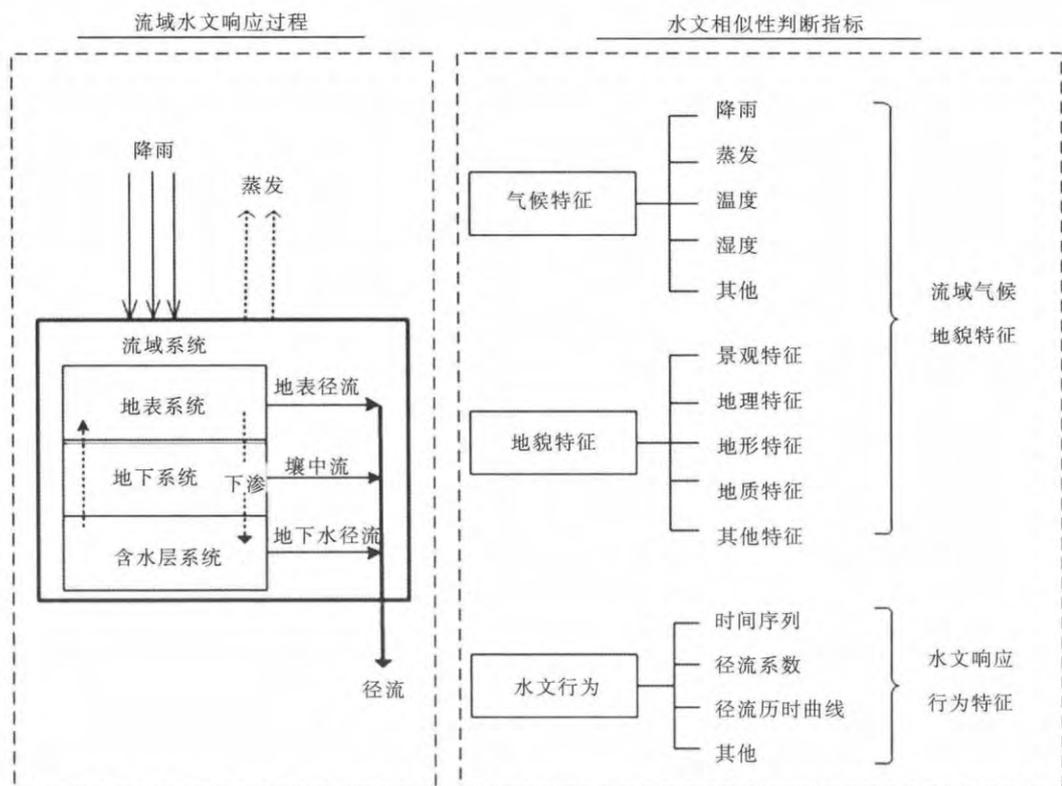


图2 流域的水文相似性  
Fig.2 Hydrological similarity of the catchments

$$d_{u,g} = \sqrt{\sum_i^I \omega_i \left( \frac{X_{u,i} - X_{g,i}}{\sigma X_i} \right)^2} \rightarrow \min \quad (2)$$

式中:  $X_{u,i}, X_{g,i}$  为无资料流域和有资料流域的模型第  $i$  ( $i=1, \dots, I$ ) 个特征值;  $\omega_i$  为特征值  $i$  的权重;  $\sigma X_i$  为标准差。当  $d_{u,g}$  越小, 则认为流域之间越相似。

聚类<sup>[7]</sup>、主成分分析<sup>[17]</sup>、多维标度法<sup>[18]</sup>、人工神经网络<sup>[19]</sup>是识别多特征指标相似的常用方法。He<sup>[18]</sup>对莱茵河 27 个集水区采用多维标度和局部方差削减法进行区划分析, 模型参数传递后拟合程度很好。Kilesbye Onema<sup>[17]</sup>利用主成分分析方法和聚类分析, 根据 GIS 提取的流域结构特征值将尼罗河 21 个子流域划分为两大类, 从而为解决 PUB 问题提供了依据。

### 2.3 回归法

回归法是水文区划在解决 PUB 问题上最常用的方法<sup>[20]</sup>。是将流域降雨-径流模型参数与流域特征值建立回归关系, 来估计无资料地区流域连续径流模型参数值。

降雨-径流模型可以表示为以下形式<sup>[21]</sup>:

$$Q = M_L(\theta_L|I) + \varepsilon_L \quad (3)$$

式中:  $Q$  为模型预测径流;  $M_L(\theta_L|I)$  为经验降雨-径流模型;  $\theta_L$  为模型参数;  $I$  为输入变量;  $\varepsilon_L$  为模型误差。数据长度一般为 3 年到 10 年以上, 以尽可能反映一个完整的气候时长。

基于上述模型, 区划回归模型可以表示如下:

$$\hat{\theta}_L = H_R(\theta_R|\Phi) + V_R \quad (4)$$

式中:  $\hat{\theta}_L$  代表无资料流域水文模型参数;  $H_R$  表示  $\hat{\theta}_L$  和流域特征  $\Phi$  的关系式;  $\theta_R$  代表区划模型参数, 假设模型参数为独立的<sup>[20]</sup>。

基于回归的水文区划方法很多, 如多元线性回归<sup>[22]</sup>、逐步回归<sup>[23,24]</sup>、加权回归<sup>[20]</sup>、非线性回归<sup>[17]</sup>、一步回归<sup>[25]</sup>、连续回归<sup>[20, 26]</sup>等。其中, 前四种方法都是先确定模型参数, 再建立回归方程; 而后两种方法则略有区别。一步回归是指同时校准水文模型和回归模型。连续回归则改变了模型校准过程, 模型参数不是一次性全部校准, 而是按照一定的顺序从最可辨别参数到最不可辨别参数依次校准, 在每一轮校准中, 将参数与流域特征进行回归。一些已建的回归模型详见表 1。

表1 回归模型研究总结  
Table 1 Summary of research on regression models

作者(年份)	方法	模型	流域数量,地点
Abdulla(1997) <sup>[23]</sup>	逐步回归	VIC-2L 模型	34, 美国中南部 Arkansas-Red 河
Sefton(1998) <sup>[27]</sup>	逐步回归	IHACRES 模型	62, 英格兰和威尔士
	非线性回归		
Xu(1999) <sup>[22]</sup>	多元线性回归	MWB-6 模型	26, 瑞典中部; 24, 比利时北部
Fernandez(2000) <sup>[25]</sup>	一步回归	"abed" 月水量平衡模型	33, 美国东南部
Lamb(2004) <sup>[26]</sup>	连续回归	概率分布模型 (PDM)	40, 英国
Wagener(2006) <sup>[20]</sup>	加权回归	降雨-径流建模工具箱	10, 英国东南部
	连续回归		
Yadav(2007) <sup>[24]</sup>	逐步回归	集总式 5 参数模型	30, 英国
Kilesbye Onema(2012) <sup>[17]</sup>	非线性回归	月径流模型	21, Semliki 流域, 尼罗河

## 3 对比讨论

### 3.1 不同区划方法存在问题

临近流域替代法是计算较为简单的方法之一, 但在应用上存在一定限制条件。空间临近法存在随机性, McIntyre<sup>[28]</sup>在研究英国国内流域时指出空间临近法需建立在流域之间气候和地形变化不大且存在相临流

域的前提条件下, 否则可能无法达到期望。相反, 空间插值法适用性相对较高, 因为多个区域的平均一定程度上降低了空间临近法的随机性, 但是临近流域与目标流域的差异会在一定程度上影响结果, 且缺乏水文解释。

基于水文相似性的区划分析是目前解决 PUB 问题上一个热点方法。但是, 这类方法仍存在几个问题有

待解决,即:①缺乏一个统一的流域特征选择标准;②目前还无法证明流域特征相似即水文响应相似,且目前有部分研究提出了相反的观点<sup>[15, 19]</sup>;③流域适用尺度仍需探讨;④当模型参数传递效果较佳时,应该反演哪类特征值占了主导影响,这对于识别模型参数的意义十分重要,而这类工作并没有进展。

基于回归的区划分析在建立回归关系时常常面临的问题有两个。其一是模型参数的不确定性,即参数的异参同效性和参数间不独立性<sup>[29]</sup>。目前常见的解决方法为蒙特卡罗法<sup>[20]</sup>和参数集法<sup>[30]</sup>。更重要的问题是参数和特征值缺乏相关关系,因此难以将所有参数建立回归方程<sup>[31, 32]</sup>。例如 Peel<sup>[33]</sup>在研究澳大利亚 331 个流域时发现,模型参数与流域特征值的相关系数均小于 0.25。此外即使参数与流域特征值可以显著相关,但对于 PUB 的预测也不一定令人满意<sup>[25, 30]</sup>。为此,确定不同方法的适应范围非常重要,具体可见下一节内容。

### 3.2 区划方法适用范围及方法选择

我国幅员辽阔,不同地区的气候地理特征相差甚大,使得水文模拟因地制宜。目前国内无资料区水文模拟的研究历史虽然很长,但方法多为临近流域水文比拟法、空间插值法以及通过遥感信息直接获得模型参数,其他方法相对应用较少,具有较大的研究空间。本节将通过总结国内外文献,概述不同方法的适用范围。这些范围可以指导我国无资料地区水文模拟研究。

从气候分布来看,临近流域替代法和水文相似流域替代法,在热带地区(如澳大利亚北部<sup>[34]</sup>)和温带地区有很好的效果。高寒地区无资料问题的研究普遍使用回归法,或者直接通过遥感资料获得模型参数。Xu<sup>[22]</sup>利用多元回归法对瑞典多个流域的模型参数进行回归。此外国内常常利用 MODIS 数据与其他地面数据结合,计算模型相应参数(如融雪水当量)和阈值(如融雪阈值)<sup>[35, 36]</sup>。原因是由于寒冷地区严寒时间长,积雪、冻土及内部水分运动规律的转换不稳定,目前多采用的经验模型可以与 MODIS 数据建立关系。不过,也有学者<sup>[37]</sup>认为前两种方法更适合。但总的来说,气候条件仅仅是选择方法的一个方面,研究区域的资料条件更是选择方法的重要参照。

一般来说,对流域的认识不足时,基于空间距离的区划法无疑是解决 PUB 问题的一个较佳选择<sup>[11]</sup>。这类

方法的优点是所需资料最少,不过仅适用于地貌和气候条件变化不大的临近流域,否则将难以得到可靠结果。而较之水文数据,遥感数据和气象数据通常容易获得。当有所有流域遥感和 GIS 数据,以及部分流域的水文数据,可以采用水文相似流域替代法。这类方法需要的数据较前者虽然更多,但是对于流域的相对位置要求不大。且可同时解决多个流域无资料问题,对于多流域研究非常重要。

以云南省滇池流域为例(图 3)对比上述两类方法。因篇幅及文章主旨,本文将不具体介绍采用方法和计算过程。滇池共有 30 条入湖河流,其中大部分河流没有实测数据,本文采取基于层次聚类的水文相似区划方法以及基于临近流域参数替代方法对滇池流域 43 个子流域进行水文模拟研究。基于水文相似性方法首先通过流域特征变量判断相似流域,本文选取面积、流域长度、流域坡度、河网密度、流域形状系数、平均海拔、土地利用类型(耕地、林地、草地、水域、建筑用地、未利用地)和土壤类型(沙土、粘土、壤土)为流域特征变量。通过层次聚类法,将滇池流域 43 个子流域分为 7 组相似流域(见图 3),同组中水文模型参数可以相互传递。

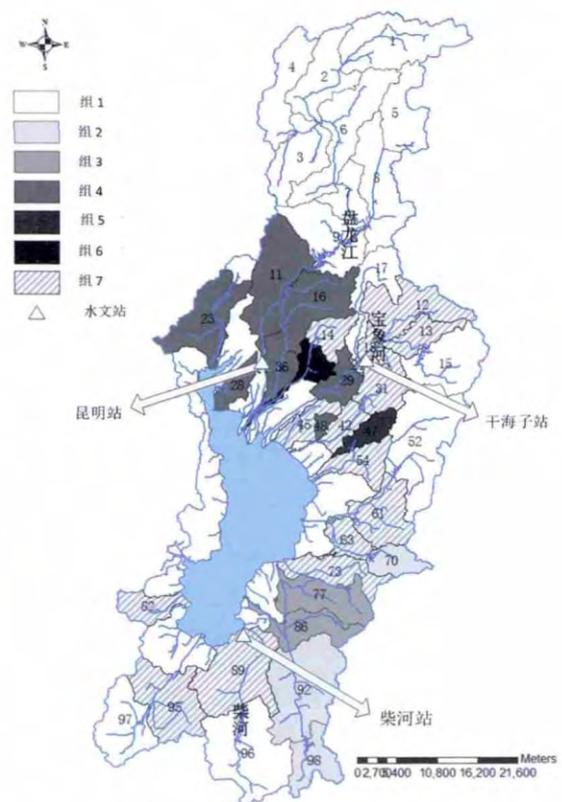


图 3 滇池流域及水文相似分类  
Fig.3 The Dianchi Lake basin and hydrological similarity classification

以 HBV 模型作为水文模拟模型,图 3 表明干海子站和柴河站所在流域为相似流域,将干海子流域的 HBV 模型参数带入柴河站 HBV 模型中验证,得到  $R^2$  为 0.8390,NSE 为 0.6355,模拟结果较好。所以水文相似流域替代法适用于滇池流域无资料问题。

由于干海子站和昆明站所处流域相近,基于邻近流域参数替代的原则,可将干海子站的模型参数带入昆明站验证此类方法的可行性。结果表明, $R^2$  仅为

0.7079,NSE 为 0.2473,次于前种方法。对比两者径流序列图(图 4),与上述结果一致。由此可见,在滇池流域上,基于水文相似性的方法更为适用。不过,也有很多学者得到相反的结果。例如 Merz 和 Blöschl<sup>[8]</sup>在奥地利 308 个流域进行区划分析时,基于空间临近流域(尤其是上下游)的效果最好。由此可见,需要因地制宜进行方法选择,最好选择多种方法进行对比,以得到最佳方案。

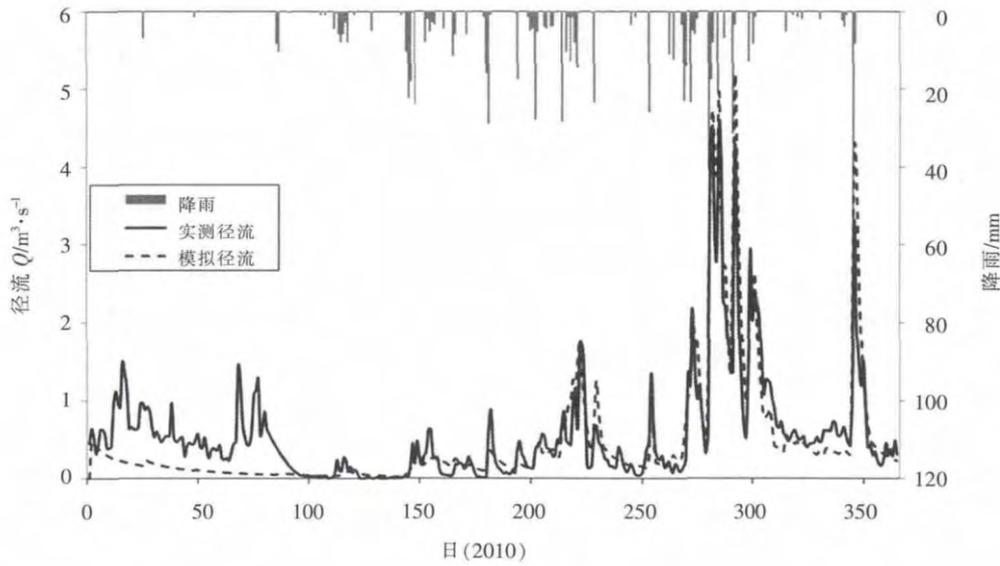


图 4(a) 柴河站验证结果

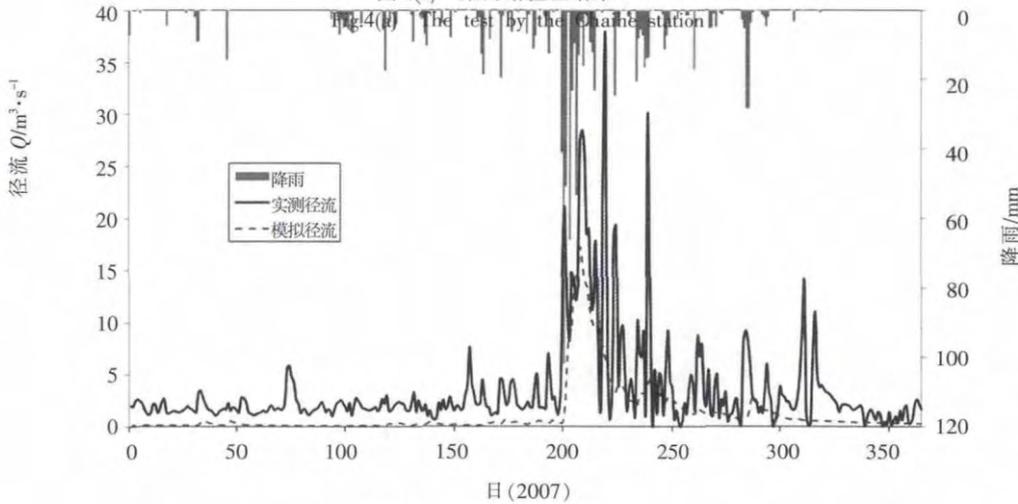


图 4 (b) 昆明站验证结果

Fig.4(b) The test by the Kunming station

回归法需要的数据最多:一方面要求有相应的流域特征变量,另一方面需要大量流域的模型校准参数,以建立回归方程。一般来说,为了建立模型参数与流域特征变量之间的回归关系,需要 10 组以上流域及对应

的水文模型参数。由此可见,此类方法需要大量的数据资料支持,在实际应用上并不适合。

总体来说,各类方法的适用范围较为模糊,如何选择方法需要根据资料情况确定,其中回归法所需资料

量最多,水文相似流域替代法次之,基于空间距离的最少。另外,通过实例验证与文献对比,可以发现水文相似流域替代法和临近流域替代法不分伯仲。不过由于参数的不确定性及所需资料量,这两种方法较之回归法更有效<sup>[30]</sup>。

#### 4 结论与展望

区划方法是解决无资料地区水文预报研究的重要方法之一。本文通过总结国际上水文区划在解决 PUB 问题上的具体方法和应用,指出了目前各类方法的问题和不足,并分析相应的适用范围,来为国内无资料地区水文模拟提供参考和借鉴。从方法上看,国内外水文区划的思路基本一致,都是从有资料数据传递信息到无资料地区,国内尤以空间临近和插值法最为常见。通过实例及其他研究结果对比,本文发现各类方法的适用范围较为模糊,但不同方法的需要数据量不同,可以作为方法选择的参考,不过总的来说前两种方法较之第三种方法更为有效。尽管水文区划在解决无资料地区水文模拟上有很大的贡献,但仍在存在许多问题有待进一步研究。

第一,如何确定水文相似性需要有明确准则,一般认为流域特征相似即水文相似,但研究表明物理特征相似不等于水文相似。第二,缺乏一个统一的指标选择流域特征指标,我国在水文研究领域的特色是区域化突出,但是无资料地区水文研究需要一个全国性合作。第三,虽然国外在此方面的方法很多,但中国需要寻找适合本国特色的方法。第四,模型存在的不确定性问题影响到区划和水文预报的准确性。第五,时间和空间尺度对于水文区划结果的影响需要被研究。

#### 参考文献:

- [1] 柴晓玲. 无资料地区水文分析与计算研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (CHAI Xiaoling. Hydrologic Estimation Methods and Analysis in Ungauged Basins [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [2] 谈戈, 夏军, 李新. 无资料地区水文预报研究的方法与出路[J]. 冰川冻土, 2004, 26 (2): 192-196. (TAN Ge, XIA Jun, LI Xin. Hydrological prediction in ungauged basins [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(2): 192-196. (in Chinese))
- [3] 陈斯伦, 许小娟. 移用相关法在无资料地区建立 Z-Q 曲线的应用[J]. 水文, 2009, Supp. 1(29): 88-89, 191. (CHEN Silun, XU Xiaojuan. Application on shifted-correlation method in Z-Q relation curve of Ungauged basins [J]. Journal of China Hydrology, 2009, Supp. 1(29): 88-89, 191. (in Chinese))
- [4] 庄广树. 基于地貌参数法的无资料地区洪水预报研究 [J]. 水文, 2011, 31 (5): 68-71. (ZHUANG Guangshu. Flood forecasting in ungauged area based on geomorphic parameter method [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(5): 68-71. (in Chinese))
- [5] Sivapalan M, Takeuchi K, Franks S W, et al. IAHS decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences [J]. Hydrological Sciences Journal, 2003, 48(6): 857-880.
- [6] Blöschl G. Rainfall runoff modeling of ungauged catchments [J]. Encyclopedia of Hydrological Sciences (Ed. M. Anderson), 2005: 1332061-1332050.
- [7] Sawicz K, Wagener T, Sivapalan M, et al. Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(9): 2895-2911.
- [8] Merz R, Blöschl G. Regionalisation of catchment model parameters [J]. Journal of Hydrology, 2004, 287(1): 95-123.
- [9] 靳晓莉, 张奇, 许崇育. 一个概念性水文模型的参数区域化研究: 以东江流域为例 [J]. 湖泊科学, 2008, 20 (6): 723-732. (JIN Xiaoli, ZHANG Qi, XU Chongyu. Regionalization study of a conceptual hydrological model in the Donjiang basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(6): 723-732. (in Chinese))
- [10] Vandewiele G L, Elias A. Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization [J]. Journal of Hydrology, 1995, 170(1): 277-291.
- [11] Parajka J, Merz R, Blöschl G. A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2005, 2(2): 509-542.
- [12] 陈守煜. 相似流域选择的模糊集模型与方法 [J]. 水科学进展, 1993, 4(4): 288-293. (CHEN Shouyu. Fuzzy model and method for choosing analogy basins [J]. Advances in Water Science, 1993, 4 (4): 288-293. (in Chinese))
- [13] Guo S, Wang J, Yang J. A semi-distributed hydrological model and its application in a macroscale basin in China [J]. IAHS Publication, 2001: 167-174.
- [14] Burn D H, Boorman D B. Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments [J]. Journal of Hydrology, 1993, 143 (3-4): 429-454.
- [15] Oudin L, Kay A, Andreassian V, et al. Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? [J]. Water Resources Research, 2010, 46.
- [16] Toebes C, Palmer B R. Hydrologic Regions of New Zealand [M]. Wellington: Water and Soil Division Miscellaneous Hydrological Publication, 1969.
- [17] Kileshye Onema J M, Taigbenu A E, Ndiritu J. Classification and flow prediction in a data-scarce watershed of the equatorial Nile region [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(5): 1435-1443.
- [18] He Y, Bárdossy A, Zehe E. A catchment classification scheme using local variance reduction method [J]. Journal of Hydrology,

- 2011,411(1-2):140-154.
- [19] Ley R, Casper M C, Hellebrand H, et al. Catchment classification by runoff behaviour with self-organizing maps (SOM)[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011,15(9):2947-2962.
- [20] Wagener T, Wheater H S. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 320(1): 132-154.
- [21] Wagener T, Wheater H, Gupta H V. Rainfall-runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments [M]. Imperial College Pr., 2004.
- [22] Xu C Y. Estimation of parameters of a conceptual water balance model for ungauged catchments [J]. *Water Resources Management*, 1999,13(5): 353-368.
- [23] Abdulla F A, Lettenmaier D P. Development of regional parameter estimation equations for a macroscale hydrologic model [J]. *Journal of Hydrology*, 1997,197(1-4):230-257.
- [24] 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.
- [25] Fernandez W, Vogel R M, Sankarasubramanian A. Regional calibration of a watershed model [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2000,45(5):689-707.
- [26] Lamb R, Kay A L. Confidence intervals for a spatially generalized, continuous simulation flood frequency model for Great Britain [J]. *Water Resources Research*, 2004,40(7):W7501.
- [27] Sefton C E M, Howarth S M. Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales [J]. *Journal of Hydrology*, 1998,211(1-4):1-16.
- [28] McIntyre N, Lee H, Wheater H, et al. Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments [J]. *Water Resources Research*, 2005,41(12).
- [29] Kuczera G, Mroczkowski M. Assessment of hydrologic parameter uncertainty and the worth of multiresponse data [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(6): 1481-1489.
- [30] 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.
- [31] Sefton C, Boorman D B. A regional investigation of climate change impacts on UK streamflows [J]. *Journal of Hydrology*, 1997,195(1):26-44.
- [32] Yu P S, Yang T C. Using synthetic flow duration curves for rainfall-runoff model calibration at ungauged sites [J]. *Hydrological Processes*, 2000,14(1):117-133.
- [33] Peel M C, Chiew F H S, Western A W, et al. Extension of unimpaired monthly streamflow data and regionalisation of parameter values to estimate streamflow in ungauged catchments [R]. Report to the National Land and Water Resources Audit, Cent. for Environ. Appl. Hydrol., Univ. of Melbourne, Parkville, Vict., Australia, 2000.
- [34] Petheram C, Rustomji P, Chiew F, et al. Rainfall-runoff modelling in northern Australia: A guide to modelling strategies in the tropics [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 462(SI): 28-41.
- [35] 舒畅, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 新安江模型在高寒无资料地区的水文过程模拟 [J]. *资源与生态学报 (英文版)*, 2010,(2):186-192. (SHU Chang, LIU Suxia, MO Xingguo, et al. The simulation of hydrological processes in an ungauged alpine basin by using Xinanjiang model [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010,(2): 186-192. (in Chinese))
- [36] 关志成. 寒区流域水文模拟研究 [D]. 河海大学, 2002. (GUAN Zhicheng. *Hydrological Simulation of Cold Zone in China* [D]. Nanjing: Hohai University, 2002. (in Chinese))
- [37] Razavi T, Coulibaly P. Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013,18(8):958-975.

## Application of Regionalization in Hydrological Forecasting for Ungauged Basins

YI Xuan<sup>1</sup>, ZHOU Feng<sup>2</sup>, ZHOU Jing<sup>1</sup>, WANG Xinyu<sup>1</sup>, GUO Huaicheng<sup>1</sup>

(1. *Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China*; 2. *Laboratory for Earth Surface Process, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract:** Regionalization is a common method for prediction in ungauged basins (PUB), and it is one of the research hotspots in recent 20 years. This paper introduced the current international research on regionalization in solving PUB problem, to provide reference for domestic research. This paper divided regionalization into 3 categories, namely, regionalization based on spatial distance, regionalization based on hydrological similarity and regionalization based on regression. By literature review and case analysis, the problem and the scope of application has been analyzed. At last, this paper pointed out 5 problems in the PUB in China.

**Key words:** prediction in ungauged basins; regionalization; regionalization analysis; hydrological similarity; hydrological model