

Hydrological Modeling in a Changing Environment: Issues and Challenges*

Chongyu Xu^{1,2}, Hua Chen¹, Shenglian Guo¹

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

²Department of Geosciences, University of Oslo, Oslo, Norway

Email: c.y.xu@geo.uio.no

Received: Feb. 28th, 2013; revised: Mar. 16th, 2013; accepted: Mar. 28th, 2013

Copyright © 2013 Chongyu Xu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This paper discusses the impact of environment change on hydrological cycle, hydrological processes and hydrological modeling. The paper starts with a review of the history of the hydrological models' development, the current state and the main challenges. Emphases are then paid to the following issues: the non-stationarity of hydrological processes and the rainfall-runoff relationship, the transferability of hydrological models (structure and parameters) across time periods, across spatial regions, across spatial and time scales, and coupling of hydrological models with climate models.

Keywords: Environment Change; Hydrological Modeling; Ungauged Basins; Non-Stationarity; Spatial and Time Scales Coupling

变化环境下水文模拟的几个关键问题和挑战*

许崇育^{1,2}, 陈 华¹, 郭生练¹

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

²挪威奥斯陆大学地学系, 奥斯陆, 挪威

Email: c.y.xu@geo.uio.no

收稿日期: 2013年2月28日; 修回日期: 2013年3月16日; 录用日期: 2013年3月28日

摘 要: 本文讨论了环境变化对水文循环和水文过程的影响, 回顾了水文模型发展的历史, 取得的成就和存在的问题。重点讨论了环境变化下水文模拟的几个主要问题: 1) 水文过程和降雨-径流关系的非稳定性问题; 2) 水文模型在无资料流(区)域的应用问题; 3) 水文模型在变尺度(时间和空间)情况下存在的问题; 4) 和水文模型与气候模型耦合的可能性问题。在讨论问题的同时提出作者独到的观点和想法。

关键词: 环境变化; 水文模拟; 无资料流域; 非稳定性; 时空尺度耦合

1. 引言

当前, 随着全球气候的变化、世界人口的不断增

长、城市建设和工农业生产的迅速发展以及人民生活水平的日益提高, 人类对资源的攫取改变了地球系统的原有状态。同时, 地球系统在其长期的演变过程中, 具有其固有的周期性和运动规律。这两者的共同变化造成了今天的环境变化。本文中变化环境主要指气候

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51190094、51279138)。

作者简介: 许崇育(1961-), 男, 江苏徐州人, 教授, 主要从事水文水资源研究。

变化和流域下垫面变化以及二者的综合变化等,同时气候变化和流域下垫面变化均包括了气候系统和下垫面的自然变化和异常变化。

环境变化不但是水文序列的非稳定性主要原因^[1](Milly等,2008),而且也是降雨径流关系改变的主要原因^[2](Zhang等,2011)。近年来,各国的水文学家针对如何甄别水文序列的变化和探讨其变化原因做了大量的研究工作,也得出了不同的结论(e.g., Groisman et al., 1999^[3]; Suppiah and Hennessy, 1998^[4]; Zhai et al., 1997^[5]; Wang and Zhou, 2005^[6]; Gao et al., 2013^[7]; Zhang et al., 2012a,b^[8,9]; Zhang et al., 2013^[10])。相对于甄别水文序列变化的研究来说,研究降雨径流关系非稳定性的论文较少。Zhang等^[2](Zhang et al., 2011)研究和比较了中国九大流域的降雨和流量近50年(1956~2005)的变化趋势以及降雨径流关系的变化规律。结果表明,在中国北方干旱和半干旱地区(e.g., 黄河,海河,塔里木河,松辽河),降雨和径流出现明显不一致的变化趋势,导致了降雨径流关系的非平稳性。而在中国南方湿润地区(长江,珠江,岷江,及西南诸河),虽然降雨和径流都有不同程度的变化,但降雨和径流的变化趋势基本一致,说明南方诸河的降雨径流关系趋于稳定。

水文模型通过建立降雨径流的数学关系定量模拟径流,因此研究和探讨降雨径流关系是否稳定是水文模拟非常关键的一步。而水文模型被广泛用于洪水预报(e.g. Beven et al., 1984^[11]; Refsgaard et al., 1988^[12]; Yao et al., 2009^[13])、流(区)域水资源估算(e.g. Xu et al., 1996^[14]; Xu, 1997^[15]; Kizza et al., 2011^[16], 2013^[17])、大尺度和全球尺度的水文模拟(e.g. Arnell, 1999^[18]; Widén-Nilsson et al., 2007^[19], 2009^[20]; Vörösmarty et al., 2000^[21]; Mulligan, 2013^[22]; Li et al., 2013^[23]; Döll et al., 2003^[24])、气候和土地利用变化下的水文响应模拟(e.g. Parkin et al., 1996^[25]; Bathurst et al., 2004^[26]; Xu, 1999a,b,c^[27-29]; Xu et al., 2005^[30]; Guo et al., 2008^[31]; Jiang et al., 2012^[32]; Yang et al., 2012^[33]; Zhang et al., 2012c^[34])和无资料地区的径流模拟(e.g., McIntyre et al., 2005^[35]; Servat and Dezetter, 1993^[36]; Seibert, 1999^[37]; Xu, 1999d^[38]; Xu and Singh, 2004^[39]; Merz and Blöschl, 2004^[40]; Murray & Blöschl, 2011^[41])等研究中。不管水文模型使用目的如何,它都是建立在稳

定的降雨径流关系这一基础上。针对非平稳的水文序列和非平稳的降雨径流关系,如何建立和应用水文模型来模拟降雨径流关系是目前水文学领域研究的最前沿问题之一。这个问题的研究包括以下几个内容:

- 1) 水文模型的参数和结构随时间转移的可能性(情景包括气候和土地利用变化下的水文响应模拟);
- 2) 水文模型的参数和结构随空间转移的可能性(情景包括无(缺)资料地区的水文模拟,区域和全球尺度的水文模拟等);
- 3) 水文模型的参数和结构同时随时间和空间转移的可能性(情景包括无资料地区环境变化下的水文响应模拟);
- 4) 水文模型的参数和结构随不同时间和空间尺度转移的可能性(情景包括水文模型和气候模型耦合的可能性);
- 和 5) 水文模型的不确定性问题。本文将针对以上问题,从水文模型的发展历史、现状和局限、变化环境下水文模拟的几个问题、以及水文模型和气候模型耦合的问题等方面展开论述。

2. 水文模型的发展历史、现状和局限

不同时间和空间尺度水文模型研究、开发和应用的历史可以追溯到19世纪。1850年,一名爱尔兰工程师 Mulvaney^[42](Mulvaney, 1850)建立了第一代计算洪峰流量的水文模型-推理模型(Rational Model),为解决当时所面临的市区排水系统、填海土地排水系统和水库溢洪道等的设计问题提供了数学工具。在20世纪,水文模型的发展经历了几个里程碑阶段。20世纪30年代,美国工程师 Sherman^[43](Sherman, 1932)提出了单位线(Unit Hydrograph)的概念,使水文工作者不仅能计算洪峰流量(推理模型),而且能对完整径流过程的进行模拟。20世纪50年代,爱尔兰水文学家 Nash 深入分析了瞬时单位线的物理机制,并用数学语言来定量描述流域汇流过程,即 Nash 的线性水库理论^[44,45](Nash, 1958, 1960)。目前该理论已被广泛应用于各种水文模型中。20世纪60至70年代,随着对产汇流机制理解的不断深入和计算机的使用,水文学家开发了大量的集总式概念性模型,并应用于水资源估算和洪水预报等业务中。具有代表性的水文模型有斯坦福模型^[46](Crawford and Linsley, 1966)、萨克拉门托模型(Burnash et al., 1973)、HBV模型^[47](Bergström, 1976)、坦克模型^[48](WMO, 1975)和新安江模型^[49](Zhao, 1977)等。同一时期,Box和Jenkins应用自回归模型、

马尔科夫模型和其他形式的时间系列随机模型来实现对径流预测和模拟^[50](Box and Jenkins, 1970),为径流预测提供了另一种预测模式。20世纪80年代以后,由于土地利用变化的影响以及点面源水污染加剧,同时无资料地区水文模拟的重要性被日益重视,水文学家借助地理信息系统(GIS)技术和数字高程模型(DEM),建立了有物理基础的分布式水文模型,并在流域水资源管理和水文预报中广泛应用。具有代表性的模型有SHE模型^[51](Abbott et al., 1986)、SWAT模型^[52](Arnold and Fohrer, 2005)和TOP模型^[53](Beven and Kirkby, 1979)。而在20世纪的80年代末和90年代初,为了更精确估算全球和大区域水资源量、预测气候变化的水文响应和改进全球气候模型陆面过程的模拟精度等,水文模型研究迎来了新的突破。大尺度乃至全球尺度水文模型的研究逐渐成为国际水文领域的研究热点和难点(Döll et al., 2003^[24]; Nijssen et al., 2001^[54]; Vörösmarty et al., 2000^[21]; Widen-Nilsson et al., 2007^[19], 2009^[20]; Xu, 1999a^[27]; Xu et al., 2005^[30])。

流域水文模型经过一个多世纪的发展,目前全世界已有很多种不同时空尺度的水文模型被应用于水文研究和水文计算的各个领域,包括水文预报、水资源估算、流域管理、水库调度、无资料区域的径流模拟、以及土地利用变化和气候变化影响研究等。流域水文模型包括产流和汇流两个模块。产流模块是建立在径流形成原理的基础上,包括超渗产流(Horton (1933)^[55] and review recently by Beven (2004)^[56]、蓄满产流、变源面积理论(Hewlett and Hibbert, 1963^[57]; 1967^[58]; Dunne and Black, 1970^[59])和其混合形式。由于气候和流域下垫面等因素的差异,流域呈现出不同的产流特性。如有的流域以霍顿超渗产流为主,有的流域以蓄满产流为主,而有的区域却以壤中流、回流、饱和区直接产流等为主。水文模型的开发最初只是为了解决某一区域或流域特定的问题,因此大多数水文模型只适用于某一种产流情况。汇流模块包括三个部分,即格网(子流域)内的汇流计算,格网(子流域)之间的汇流计算和河道演算。有时把后面两种情况划分为上下网格和河道连续计算(cell to cell)和各产流单元到流域出口的直接计算(source to sink)(Gong et al., 2009^[60]; Li et al., 2013^[23])。格网(子流域)内的汇流计

算主要有等流时线(time-area routing method)或(各种形式的)单位线(Unit hydrograph)方法计算。格网(子流域)之间包括河道汇流计算以水力学方法(以圣维南方程组为代表)或水文学方法(以马斯京根为代表)计算。只有认识和区分这些产、汇流特性,才能选择合适的模型。如以新安江模型和HBV模型为代表的概念性蓄满产流模型,它们一般不直接利用下垫面资料,多个参数需率定,在湿润地区模拟效果一般比较好。但是参数随时间和空间的转移受到限制影响了无资料流域模拟效果。以TOPMODEL为代表的第二类物理模型,它们利用地形数据和坡度(topographic and slope data),采用变源面积理论,这一类型模型在山区、浅层土壤效果比平原区好。以SWAT为代表的第二类物理模型,直接利用下垫面的土壤、植被和土地利用类型等物理参数(soil, vegetation, land use),产流机制采用了SCS-CN的概念,径流模拟在平原区效果比山区好,但是CN需要调整及其调整的方向和方法还需要深入研究。所有的水文模型在开发时都有一个基本假设即水文序列和降雨径流关系的平稳性,如果对于模型的特性和流域的环境变化没有了解清楚,径流模拟难以取得理想的结果。

3. 变化环境下水文模型面临的问题

变化环境下水文模拟所面临问题和挑战很多,包括模型参数和结构随时间(变化的气候)转移的问题;模型参数和结构随空间(不同的流域)转移的问题;上述两种情况的组合,即变化环境下无资料流域水文响应的模拟;模型参数和结构随时间和空间尺度转移的问题,即水文模型和气候模型耦合的可能性;模型的不确定性等问题。本章将探讨前4个问题,关于模型的不确定性问题将在另文专述。

3.1. 模型参数和结构随时间(变化的气候)转移的可能性

本节所讨论的问题是同一个流域在环境变化情景下的水文模拟。在水文序列和降雨径流关系稳定的假设下建立的水文模型被广泛应用于模拟气候变化和土地利用变化情景下的水文响应。一般的应用方法和步骤是:1) 通过历史资料对模型参数进行率定;2) 利用不同的方法和模型建立将来的气候和土地利用

变化情景; 3) 将第二步产生的情景, 作为第一步率定好参数模型的输入信息和资料, 模拟生成变化环境下的径流和其它水量平衡项。关于土地利用情景的产生主要是应用 CLUE-S 模型(e.g., Verburg et al., 2002^[61]; Zhou et al., 2013^[62])。关于气候变化情景的产生有很多方法, 感兴趣的读者可以参考如下文献(Xu et al., 2005^[30]; Chiew et al., 2009a,b^[63,64]; 2010^[65]; Vicuna et al., 2010^[66]; Perkin and Pitman, 2009^[67]; Macadam et al., 2010^[68]; Graham et al., 2007^[69]; Driessen et al., 2010^[70])。本节所要指出研究的核心问题是水文模型的结构和参数是否具备在环境变化下转移应用的能力。大量的研究表明大多数的模型并不具备这个功能(Boorman and Sefton, 1997^[71]; Panagoulia and Dimou 1997a, b^[72,73]; Jiang et al., 2007^[74]; Eregno et al., 2013^[75])。主要表现在即使是非常相似的模型而且在率定期模拟结果相差无几, 一旦把环境变化的情景作为模型的输入其结果相差巨大(Jiang et al., 2007^[74])。如何才能得到较为客观的环境变化情景下水文响应的结果呢? 最简单的方法也是被广泛使用的方法是采用多个水文模型的结果加以平均, 也就是简单的集合(ensemble)预测方法。该方法虽然能在一定程度上降低单一模型的不确定性, 但由于它不能确定不同模型的优劣, 导致了它们的平均值可能仍有很大的不确定性, 而且这个不确定性的程度是未知的。即使是同一个模型, Merz et al. (2011)^[76]在奥地利 273 个流域, 用 41 年的资料对 HBV 模型每 5 年率定一次, 结果发现不管是模型的效率系数还是模型参数值都随时间发生明显变化。Young(2010)^[77]也发现模型参数随率定时段的不同而发生显著变化。也就是说, 如果用不同时期资料率定的模型参数模拟将来环境变化情景的水文响应将得出不同的结果。因此, 上述讨论表明, 大量已发表的模拟环境变化情景下水文响应的文献所报道的水文响应结果都不能代表该流域将来的水文情景, 因为它只代表了所使用特定的历史资料率定得到参数的模型模拟结果。

由于未来的情景是不可测的, 所以在现状条件下, 环境变化下水文模型模拟的结果是不可检验的。前国际水文学会(IAHS)主席 Klemes 早在 1986 年就已经指出了这个问题, 并提出了利用历史资料检验水文模型模拟变化环境下水文响应的模拟方法, 即 Dif-

ferential split-sample test (Klemes, 1986^[78]; Xu, 1999c^[29]), 只是由于受到资料长度的限制没有被广泛应用。这也是为什么绝大部分研究环境变化情景下水文响应的论文都没有做这个检验。其方法是选择一个有较长历史资料的流域(越长越好), 如果想要预测的将来气候是以温度升高为主要变化情景, 就在长系列历史资料中选择 5~10 年温度偏低的时段率定模型, 再选择 5~10 年温度偏高的时段检验模型。同理, 如果将来的气候是以雨量增加为情景, 就在长系列历史资料中选择 5~10 年水量偏枯的时段率定模型, 再选择 5~10 年水量偏丰的时段检验模型。检验期结果较好的模型为在气候变化情景下转移功能较好的模型。其物理根据是有的模型参数对输入输出资料的变化比较敏感, 这类模型不适合用来模拟气候变化下的水文响应。原因是虽然所有的概念性模型和有物理基础的模型都被认为其模型参数和流域下垫面的物理特性有关, 但其相关的程度各异。关于这点在下节再详细论述。完成该检验后, 模拟环境变化下水文响应的方法有两种: 一是选用转移效果最好的模型而不是任何一个模型; 二是采用集成预测的方法但根据检验的结果对不同模型加以不同的权重。

3.2. 模型参数和结构随空间(不同的流域)转移的可能性

本节所指的是模型的空间转移能力, 也就是无(缺)资料流(区)域的水文模拟。对于集总模型(lumped model)来说, 是指流域缺少实测的流量资料来率定模型参数和检验模拟结果; 对于分布式模型(distributed model)来说所有的流域都属于无(缺)资料流(区)域, 因为除了流域出口处以外所有网格里的流量都是无法观测的, 也就是说模型在各网格计算的结果一般是不能验证的。无(缺)资料流(区)域模型参数是需要通过移用有资料流域的参数来实现的。因为每个流域的气候和下垫面条件不完全相同, 所以无(缺)资料流(区)域水文模拟也属于变化环境下的水文模拟问题。预测同一个流域土地利用变化下的水文响应可以认为是其中的一种特殊的情景。

无资料地区的水文模拟自有水文模型以来一直是一个难点, 为此, 国际水文科学协会(IAHS)启动了一个全球重点研究计划——缺资料流域的水文预测

(Prediction in Ungauged Basin, 简称 PUB)(2003~2012)。该计划以减小水文水资源预测预报中的不确定性为核心, 旨在探索水文模拟的新方法, 改进径流、泥沙和水质等预报精度, 并从基于观测数据进行率定的传统方法向更多地基于机理分析的新方法转变。该计划实施 10 余年来虽然取得了很多理论和应用的重大成果, 但由于水文机理的复杂性、流域的多样性、资料的限制和模型的局限性等原因, 还有很多未解决的难题, 缺资料流域的水文预测在相当长的一段时间内仍然是水文模型研究的重点和难点之一。下面介绍一下目前的成果和问题。

无(缺)资料流(区)域的模型参数估算有很多方法以及不同的分类方法。目前常见的分类是多元回归法(multiple regression)、流域空间邻近法(catchment spatial proximity)和流域物理特性相似法(similarity of physical properties)、全局平均法(global mean)和多目标区域率定法(multi-objective regional calibration)。

1) 多元回归法(multiple regression)。通过建立以模型参数为因变量, 以流域下垫面物理参数(土壤类型, 植被类型, 坡度, 河网密度等影响模型参数的所有参数)作为自变量的多元回归方程来估算无资料流域的模型参数, 以达到模型参数空间转移的目的(Jarboe and Haan, 1974^[79]; Magette et al., 1976^[80]; Weeks and Ashkenasy, 1985^[81]; Weeks and Boughton, 1987^[82]; Servat and Dezetter, 1993^[36]; Karlinger et al., 1988^[83]; Post and Jakeman, 1996^[84]; Mwakalila et al., 2003^[85]; Merz and Blöschl, 2004^[40]; Xu, 1999d^[38], 2003^[86])。虽然多元回归法被广泛应用, 但结果各异。普遍的情况是部分参数可以取得可以接受的回归方程, 而有些模型参数和流域下垫面参数的相关不显著, 造成模拟结果较差。Blöschl(2005)^[87]把多元回归法(multiple regression)效果不好归结为三个原因: 1) 可观测得流域下垫面物理参数可能不能很好的定量反映流域的产流特性, 或者说真正能反映不同流域产流特性的流域下垫面物理参数还不知道; 2) 反映模型参数和流域下垫面物理参数相关关系的模型还不知道。事实上, 通常选择的是一个方便的线性回归模型, 而不是基于已知关系, 也有使用非线性回归的, 但它们也只是增加需要估计参数的数目; 3) 率定的模型参数可能有很大的不确定性, 特别是在异参同效性(equifi-

nality, Beven and Freer, 2001)^[88]普遍存在的情况下, 和流域物理特性相关较好的那组参数值可能是未知的(e.g., Gottschalk, 2002)^[89]。Kuczera and Mroczkowski (1998)^[90]则认为在无资料地区的小流域, 实现区域化流域模型参数的目的几乎是不可能的, 因为存在多个最优模型参数集和模型参数之间的相关程度高。他们所强调的就是 Blöschl(2005)^[87]所说的第三个原因。

2) 流域空间邻近法(catchment spatial proximity)和流域物理特性相似法(similarity of physical properties)。这两种方法的思路和应用方式一样都是通过直接移植其它流域的模型参数到无资料流域, 或者通过多个流域空间插值的方法估算本区内无资料流域的参数(Vandewiele and Elias, 1995^[91]; Parajka et al., 2005^[92], 2007^[93])。不同的是空间邻近法通过把地理上相近的流域模型参数转移到无资料流域, 或者空间插值时局限在使用空间距离近的一些流域。而物理特性相似法首先比较流域的相似性, 然后通过把最相似的流域模型参数转移到无资料流域(adopt from most physically similar catchment), 或者空间插值时也局限在相似的流域(interpolating calibrated parameters in similar space), 而不是距离最近的流域或区域内所有的流域。空间邻近法和物理特性相似法近年来被很多研究者应用(Bardossy, 2007^[94]; McIntyre et al., 2005^[35]; Merz and Blöschl, 2004^[40]; Oudin et al., 2008^[95]; Parajka et al., 2005^[92]; Chiew et al., 2008^[96])。部分研究表明(Bardossy, 2007^[94]; McIntyre et al., 2005^[35]; Oudin et al., 2008^[95]; Parajka et al., 2007^[93])空间邻近法和物理特性相似法可以取得比多元回归法更好的结果。Merz and Blöschl(2004)^[40]在奥地利的 300 多个流域比较了多种参数区域化方法结果显示空间邻近法效果最好, 其次是物理特性相似法, 而全局平均法(下面介绍)结果最差。Oudin et al.(2008)^[95]在法国 913 个流域的研究结果得出相似的结论, 即空间邻近法效果最好, 其次是物理特性相似法, 最差是多元回归法。而 Vandewiele and Elias(1995)^[91]研究结果则显示空间邻近法结果很差, 他们所取得的最好结果是克里金(Kriging)空间插值法。不同的结论还包括 Reichl et al.(2009)^[97]通过对澳大利亚 95 个流域的研究得出物理特性相似法的结果比空间邻近法和多元回归法的结果要好, 而 Zhang and Chiew(2009)^[98]对澳大利亚 210 个流域的研究得出

空间邻近法比物理特性相似法的结果稍好等等。

3) 全局平均法(global mean)。该方法和以上讨论的方法不同, 它既不是转移最近的流域模型参数也不是转移最相似的流域或空间插值, 它利用区域内各流域参数的平均值(算术平均或流域面积加权平均)对区域内无资料流域进行模拟(Jin et al., 2009^[99]; Kizza et al., 2013^[17]; Li et al., 2013^[23]; Merz and Bloshl, 2004^[40]; McIntyre et al., 2005^[35])。不同的研究者用全局平均法取得了不同的结果, 有时是相反的结论。Jin et al. (2009)^[99]中国东江流域的9个子流域中取得了可以接受的结果。Kizza et al. (2013)^[17]在非洲维多利亚湖流域的9个子流域的研究结果表明, 本方法在其中7个子流域取得了较为理想的结果。而 Merz and Bloshl (2004)^[40]在奥地利300多个流域的研究表明全局平均法取得了最差的结果, 其原因可能是这些流域的自然条件相差很大(包括山区、平原、森林、农田等)。McIntyre et al. (2005)^[35]的研究则表明全局平均法和物理特性相似法结合起来则效果较好, 也就是选择相似的流域进行模型参数平均或集总(ensemble)。

4) 多目标区域率定法(multi-objective regional calibration)。鉴于上述的种种问题, 部分学者提出并尝试了多目标区域率定法(Fernandez et al., 2000^[100]; Parajka et al., 2005^[92]; Vogel, 2006^[101]; Hundecha and Bardossy, 2004^[102]; Götzinger and Bardossy, 2005^[103], 2007^[104]; Hundecha et al., 2008^[105]; Zhang et al., 2008^[106]; Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2010^[107])。此类方法有两种情况。一是通过参数区域率定, 试图得到既适合单一流域同时适合区域内多个流域的一组参数, 其模型率定的目标函数为:

$$\text{maximize} \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i^2 \right] \quad (1)$$

二是通过参数区域率定, 试图得到即能使区域内各流域流量模拟效果好, 同时又能达到区域内以模型参数为因变量, 流域下垫面参数为自变量的多元回归模型结果好的一组参数(Fernandez et al., 2000^[100])。其目标函数为

$$\text{maximize} \left\{ \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i^2 \right] + \left[\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k R_j^2 \right] \right\} \quad (2)$$

- m 为流域个数;

- R_j^2 流域 i 的效率系数;
- k 为模型参数个数;
- R_j^2 为以模型参数 j 为因变量流域下垫面参数为自变量的多元回归方程的效率系数。

Fernandez et al. (2000)^[100]和 Vogel(2006)^[101]研究表明, 多目标区域率定法(公式(2))可以大大提高模型参数与流域下垫面参数多元回归方程的效率系数。但是在选择没有参与率定的流域作独立检验时, 发现并没有提高上面提到的传统回归方法的模拟精度。

综上所述, 到目前为止水文模型参数区域化的研究, 还没有取得普遍认可的理想方法和结果。主要表现为不同的研究不能得出统一的结论, 有时甚至是相反的结论。部分原因是因为所用的模型及流域的类型和数量各不相同。几乎所有的研究都表示在该领域还需要做大量深入的研究。

3.3. 模型参数和结构随时间和空间转移的可能性

这里所指的是在无资料流域模拟环境变化情景下的水文响应, 即模型参数同时随时间和空间转移的问题。它的难度包含了前面两节(3.1 和 3.2)的所有难度, 即模型参数在变化的气候环境下随时间转移和在空间转移的问题。如上所述, 由于这两个问题还没有很好的解决, 本节所论述的情况目前研究还不多。Xu^[29](1999c)作了初步尝试。但只用了一个模型, 而且由于流域个数和序列长度有限, 结果还有待对其它模型在不同区域作进一步验证。这一问题最早是由 Kleme (1986)^[78]在 1986 年提出的, 他指出要想做这方面的水文模拟, 最基本的研究工作是对多个模型作 Proxy-basin differential-split sample 检验, 不能通过这个检验的模型不适合用来做这方面的应用。这个检验的基本思路是, 如果要应用水文模型在某一无资料流域 C 模拟环境变化情景下的水文响应, 必须在临近区域选择至少两个有较长实测资料的流域做检验。检验具体方法是: 如果预测将来的气候是以温度升高为主要变化情景, 则先在流域 A(B)的长系列历史资料中选择 5-10 年温度偏低的时段率定模型, 再在流域 B(A)中选择 5~10 年温度偏高的时段检验模型。同理, 如果将来的气候是以雨量增加为情景, 则在流域 A(B)的长系列历史资料中选择 5~10 年偏枯的时段率定模型, 再在流

域 B(A) 中选择 5~10 年水量偏丰的时段检验模型。检验期结果较好的模型为候选模型。

3.4. 水文模型和气候模型耦合的可能性

水文模型和气候模型耦合是当前水文学家讨论比较多的一个问题。不少研究项目也把它作为主要研究目标之一。笔者认为在讨论这个问题之前有必要把水文模型做个分类。根据不同的目的水文模型有多种分类方法。为了方便讨论耦合问题, 水文模型可以分为: 1) 流域尺度的水量平衡模型(比如, 新安江模型、HBV 模型、斯坦福模型、坦克模型和 TOPMODEL 等); 2) 大尺度水量平衡模型(比如, WBM (Vörösmarty et al., 1989^[108], 2000^[21]), Macro-PDM (Arnell, 1999^[18], 2003^[109]), WGHM (Döll, 2003^[24]), VIC (Wood et al., 1992^[110]; Liang et al., 1994^[111]), TOPLATS (Famiglietti and Wood, 1991^[112]), WAS-MOD-M (Widen-Nilsson et al., 2007^[55], 2009^[56]; Gong et al., 2009^[60]; Li et al., 2013^[23]), 包括全球尺度水文模型(global scale hydrological model)和区域尺度水文模型(regionnal scale hydrological model); 3) 陆面过程模型(Land surface processes model 或 land surface parameterization model), 又叫 SVAT 模型(soil-vegetation-atmosphere-transfer model)。从上世纪 80 年代以来, 在原来桶式模型(Bucket model)的基础上, 已有众多的陆面过程模型被改进和开发, 读者可以在网上搜索, 在此就不一一列出。以上三类模型的异同见表 1。其中第一类模型和第二类模型的主要相同点是都以水量平衡为基础, 主要区别在于空间尺度。第一类模型由于空间尺度和气

候模型(全球或区域气候模型)的差别巨大, 不具备耦合的条件。第二类模型和第三类模型的主要区别相同点在于空间尺度相同或相近, 而主要区别在于 1) 第二类模型以水量平衡为基础, 而第三类模型以能量平衡为基础; 2) 第二类模型以土壤含水量为计算蒸发和产流的来源, 第三类模型通过垂直通量的差值计算蒸发和产流; 3) 第二类模型用等流时线(time-area routing method)或(简化)单位线(Unit hydrograph)方法计算格网或子流域的汇流, 以水力学方法(以圣维南方程组为代表)或水文学方法(以马斯京根为代表)计算格网或子流域之间以及河道汇流, 而这两点是第三类模型一般所不具备的。现有的陆面过程模型也引入了河道汇流计算。第二类模型比第三类模型在独立运行时(off line run)的精度好, 因为它更符合流域或区域的产汇流理论。

关于水文模型和气候模型的耦合问题, 作者认为第三类模型和气候模型的耦合不能称作水文模型和气候模型的耦合, 因为第三类模型或者本来就是气候模型的一个部分或者是专门为气候模型开发的一种陆面过程模型。它研发的目的或者是为了提高区域或全球尺度陆面水量平衡的计算精度或者为了改进气候模型的陆面过程模拟。也就是说它不是传统意义上的水文模型。关于第二类模型和气候模型耦合的问题, 作者认为也是不可能的, 原因有: 1) 水文模型不具有能量平衡模块; 2) 水文模型需要参数率定; 3) 水文模型(第二类)的时间步长一般是以日为单位, 而气候模型的时间步长小于一小时(一般 15 分钟)。即使此类耦合中有水文模型和气候模型耦合的物理基础(见

Table 1. Types of different scale hydrological models

表 1. 不同尺度水文模型的种类

模型	流域水量平衡模型	大尺度水量平衡模型	陆面过程模型
应用	洪水预报, 工程设计, 水文过程理解	水资源规划和管理	改进全球气候模式及区域气候模式的陆面过程模拟
概念	流域水量平衡	地表水量平衡	地表能量平衡
输入	降雨、蒸发和土地利用等	降雨、蒸发和土地利用等	全球(区域)气候模式生成的降雨, 辐射通量、湿度等
空间离散化	子流域/网格	子流域/网格	网格
建模方法	经验性、或概念性, 或物理模型	概念性模型	从概念性到物理模型
时间尺度	从小于 1 小时到 1 年	从 1 天到 1 个月	10 到 30 分钟
空间尺度	小于 5000 km ²	大于 100,000 km ²	大于 1,000,000 km ²
与 GCM 的耦合	不	不	可能

Xu et al., 2005^[30]的图 1), 即通过陆面水量平衡与陆面能量平衡的通项 - 实际蒸散发和陆面能量平衡与陆面辐射方程的通项 - 净辐射来实现, 但关键的水文模型参数率定问题, 特别是水文模型参数随时间步长的变化以及如何变化的问题, 在耦合中一直没有得到重视、研究和解决。而对如此短的时间步长, 水文模型的参数如何取值需要进一步深入研究。Littlewood 等 (Littlewood, 2007^[113], 2008^[114]; Littlewood et al., 2008^[115], 2010) 针对水文模型的参数随时间步长变化的问题, 做了开启式的探讨和研究, 结论是水文模型率定的参数值随模拟时间步长变化显著。然而目前大部分的水文模型都没有进行水文模型参数随时间步长变化的比较研究。

根据以上几点我们可以看出传统意义上的水文模型和气候模型的耦合是不现实的。关于耦合的问题作者认为可能的方法有: 1) 把水文模型变成陆面过程模型; 2) 把水文模型变成近似的陆面过程模型, 即加上能量平衡模块保留原来的计算步长。但第一个方法已经属于陆面过程模型和气候模型的耦合问题, 第二个方法不能算完全成功的耦合, 因为不能保持一个气候模型的完整性和一致性。但它可以部分解决所谓的耦合问题。关于水文模型和气候模型的耦合问题, 作者专门请教了当前世界水文权威英国兰卡斯特大学的 Keith Beven 教授, 他不假思索地回答说水文模型和气候模型的耦合是不可能的。作者认为即使存在可能性, 研究水文模型和气候模型耦合也必须首先解决水文模型参数随时间步长的变化问题。

4. 结语

水文模型经历了长期的开发、应用、改进的过程, 从原来单一的以水文设计为目的, 发展为服务于水文预报、流域管理以及预测环境变化情景下水文响应等多种复杂的科研业务需求。每一种模型在不同时期都有自己的主要特点和应用目的, 但所有的模型都是建立在降雨 - 径流关系平稳性这一基础上的。因此, 在变化环境下水文模型的应用面临着一些急需研究和解决的问题, 如水文模型的结构和参数随时间转移的可能性, 随空间转移的可能性, 随时间和空间尺度转移的可能性等。本文并没有也不可能为这些研究课题都提出解决方案, 其目的是总结现有的研究成果, 指

出还存在的主要问题和提出可能的研究方向, 可能存在以偏概全, 也可能有不正确的观点, 欢迎大家讨论。

参考文献 (References)

- [1] MILLY, P. C. D., BETANCOURT, J., FALKENMARK, M., HIRSCH, R. M., KUNDZEWICZ, Z. W., LETTENMAIER, D. P. and STOUFFER, R. J. Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 2008, 319(5863): 573-574.
- [2] ZHANG, Z. X., CHEN, X., XU, C.-Y., YUAN, L. F., YONG, B. and YAN, S. F. Evaluating the non-stationary relationship between Precipitation and Streamflow in Nine Major Basins of China during the past 50 years. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(1-2): 81-93.
- [3] GROISMAN, P. YA., COAUTHORS. Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 243-283.
- [4] SUPPIAH, R., HENNESSY, K. Trends in seasonal rainfall, heavy rain-days, and number of dry days in Australia 1910-1990. *International Journal of Climatology*, 1998, 18(10): 1141-1155.
- [5] ZHAI, P. M., ESKRIDGE, R. E. Atmospheric water vapor over China. *Journal of Climate*, 1997, 10: 2643-2652.
- [6] WANG, Y. Q., ZHOU, L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(9): L09707.
- [7] GAO, P., GEISSEN, V., RITSEMA, C. J., MU, X.-M. and WANG, F. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River basin, China. *Hydrology and Earth System Science*, 2013, 17(3): 961-972.
- [8] ZHANG, Z. X., XU, C.-Y., YING, B., HU, J. J. and SUN, Z. H. Understanding the changing characteristics of droughts in Sudan and the corresponding components of the hydrologic cycle. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(5): 1520-1535.
- [9] ZHANG, Z. X., XU, C.-Y., EL-HAJ EL-TAHIR, M., CAO, J. and SINGH, V. P. Spatial and temporal variation of precipitation in Sudan and their possible causes during 1948-2005. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2012, 26(3): 429-441.
- [10] ZHANG, Q., LI, J. F., SINGH, V. P., XU, C.-Y. and DENG, J. Y. Influence of ENSO on precipitation in the East River basin, South China. *Journal of Geophysical Research*, 2013, in press.
- [11] BEVEN, K. J., KIRKBY, M. J., SCOELD, N. and TAGG, A. Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments'. *Journal of Hydrology*, 1984, 69(1-4): 119-143.
- [12] REFSGAARD, J. C., HAVNØ, K. and AMMENTORP, H. C. Applications of hydrological models for flood forecasting and flood control in India and Bangladesh. *Advances in Water Resources*, 1988, 11: 101-105.
- [13] YAO, C., L. I., Z., BAO, H. and Yu, Z. Application of a developed Grid-Xinjiang model to Chinese watersheds for flood forecasting purpose. *Journal of Hydrology*, 2009, 14(9): 923-934.
- [14] XU, C.-Y., SEIBERT, J. and HALLDIN, S. Regional water balance modelling in the NOPEX area: Development and application of monthly water balance models. *Journal of Hydrology*, 1996, 180: 211-236.
- [15] XU, C.-Y. Application of water balance models to different climatic regions in China for water resources assessment. *Water Resources Management*, 1997, 11(1): 51-67.
- [16] KIZZA, M., RODHE, A., XU, C.-Y. and NTALE, H. K. Modelling catchment inflows into Lake Victoria: Uncertainties in rainfall runoff modelling for Nzoia River. *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(7): 1210-1226.
- [17] KIZZA, M., GUERRERO, J.-L., RODHE, A., XU, C.-Y. and

- NTALE, H. K. Modelling catchment inflows into Lake Victoria: Regionalisation of the parameters of a conceptual water balance model. *Hydrology Research*, 2013, in press.
- [18] ARNELL, N. W. A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain. *Journal of Hydrology*, 1999, 217(3): 314-335.
- [19] WIDÉN-NILSSON, E., HALLDIN, S. and XU, C.-Y. Global water-balance modelling with WASMOD-M: Parameter estimation and regionalization. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(1-2): 105-118.
- [20] WIDÉN-NILSSON, E., GONG, L., HALLDIN, S. and XU, C.-Y. Model performance and parameter behavior for varying time aggregations and evaluation criteria in the WASMOD-M global water balance model. *Water Resource Research*, 2009, 45(5): W05418.
- [21] VÖRÖSMARTY, C. J., FEKETE, B. M., MEYBECK, M. and LAMMERS, R. B. Global system of rivers: Its role in organizing continental land mass and defining land-to-ocean linkages. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(2): 599-621.
- [22] MULLIGAN, M. WaterWorld: A self-parameterising, physically-based model for application in data-poor but problem-rich environments globally. *Hydrology Research*, 2013, in press.
- [23] LI, L., NGONGONDO, C. S., XU, C.-Y. and GONG, L. Comparison of the global TRMM and WFD precipitation datasets in driving a large-scale hydrological model in Southern Africa. *Hydrology Research*, 2013, in press.
- [24] DÖLL, P., KASPAR, F. and LEHNER, B. A global hydrological model for deriving water availability indicators: Model tuning and validation. *Journal of Hydrology*, 2003, 270(1): 105-134.
- [25] PARKIN, G., O'DONNELL, G., EWEN, J., BATHURST, J. C., O'CONNELL, P. E. and LAVABRE, J. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 2. Case study for a Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, 1996, 175(1): 595-613.
- [26] BATHURST, J.C., EWEN, J., PARKIN, G., O'CONNELL, P.E. and COOPER, J.D. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 3. Blind validation for internal and outlet responses. *Journal of Hydrology*, 2004, 287: 74-94.
- [27] XU, C.-Y. From GCMs to river flow: A review of downscaling techniques and hydrologic modeling approaches. *Progress in Physical Geography*, 1999, 23(2): 229-249.
- [28] XU, C.-Y. Climate change and hydrologic models: A review of existing gaps and recent research developments. *Water Resources Management*, 1999, 13(5): 369-382.
- [29] XU, C.-Y. Operational testing of a water balance model for predicting climate change impacts. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 98-99(1-4): 295-304.
- [30] XU, C.-Y., WIDÉN, E. and HALLDIN, S. Modelling hydrological consequences of climate change—Progress and challenges. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(6): 789-797.
- [31] GUO, H., HU, Q. and JIANG, T. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. *Journal of Hydrology*, 2008, 355(1-4): 106-122.
- [32] JIANG, S., REN, L., YONG, B., Fu, C. B. and YANG, X. L. Analyzing the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe basin in northern China. *Hydrology Research*, 2012, 43(1-2):3-13.
- [33] YANG, X., REN, L. L., SINGH, V. P., LIU, X., YUAN, F., JIANG, S. and YONG, B. Impacts of land use and land cover changes on evapotranspiration and runoff at Shalamulun River watershed, China. *Hydrology Research*, 2012, 43(1-2): 23-37.
- [34] ZHANG, A., ZHANG, C., FU, G., WANG, B., BAO, Z. and ZHENG, H. Assessments of impacts of climate change and human activities on runoff with SWAT for the Huifa river basin, northeast China. *Water Resources Management*, 2012, 26(8): 2199-2217.
- [35] MCINTYRE, N., LEE, H., WHEATER, H., YOUNG, A. and WAGENER, T. Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments. *Water Resource Research*, 2005, 41(12): W12434.
- [36] SERVAT, E., DEZETTER, A. Rainfall-runoff modelling and water resources assessment in northwestern Ivory Coast. Tentative extension to ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 1993, 148(1-4): 231-248.
- [37] SEIBERT, J. Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 98-99: 279-293.
- [38] XU, C.-Y. Estimation of parameters of a conceptual water balance model for ungauged catchments. *Water Resources Management*, 1999, 13(5): 353-368.
- [39] XU, C.-Y., SINGH, V. P. Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. *Water Resources Management*, 2004, 18(6): 591-612.
- [40] MERZ, R., BLOSCHL, G. Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 2004, 287(1-4): 95-123.
- [41] MURRAY, C. P., BLOSCHL, G. Hydrological modelling in a changing world. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(2): 249-261.
- [42] MULVANEY, T. J. On the use of self-registering rain and flood gauges. *Transactions of the Institution of Engineers, Ireland*, 1850, 4(2): 1-8.
- [43] SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Engineering News Record*, 1932, 108: 501-505.
- [44] NASH, J. E., The form of the instantaneous unit hydrograph. IUGG General Assembly, Toronto, IAHS, Genthbrugge, 1958, 3(45): 114-121.
- [45] NASH, J. E. A unit hydrograph study with particular reference to British catchments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1960.
- [46] CRAWFORD, N. H., LINSLEY, R. K. Digital simulation in hydrology. *Stanford Watershed Model IV*. Stanford, Department of Civil Engineering, University of California, Technical Report No. 39, 1966.
- [47] BERGSTRÖM, S. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Report, Nr. RHO7, 1976.
- [48] WMO. Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting. *Operational Hydrology Report 7*, WMO No 429, Geneva, 1975.
- [49] ZHAO, R. J. The Xinanjiang model applied in China. *Journal of Hydrology*, 1992, 135: 371-381.
- [50] BOX, G. E. P., JENKINS, G. M., Time series analysis, forecasting, and control. San Francisco: Halden-Day, 1970: 543.
- [51] ABBOTT, M. B., BATHURST, J. C., CUNGE, J. A., O'CONNELL, P. E. and RASMUSSEN, J. An introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique European, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based distributed modelling system, and 2: Structure of a physically-based distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 1986, 87: 45-59, 61-77.
- [52] ARNOLD, J. G., FOHRER, N. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed. *Hydrological Processes*, 2005, 19(3): 563-572.
- [53] BEVEN, K. J., KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1): 43-69.
- [54] NIJSSEN, B., O'DONNELL, G., HAMLET, A. and LETTENMAIER, D. P. Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change. *Climatic Change*, 2001, 50(1-2): 143-175.
- [55] HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 1933, 14(1): 446-460.
- [56] BEVEN, K. J., ROBERT, E. Horton's perceptual model of infiltration processes. *Hydrological Processes*, 2004, 18(17): 3447-3460.
- [57] HEWLETT, J. D., HIBBERT, A. R. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 68(4): 1081-1087.
- [58] HEWLETT, J. D., HIBBERT, A. R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In:

- SOPPER, W.E., LULL, H.W., Eds., International Symposium on Forest Hydrology, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, 1967: 275-290.
- [59] DUNNE, T., BLACK, R. D. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Research*, 1970, 6: 1296-311.
- [60] GONG, L., WIDÉN-NILSSON, E., HALLDIN, S. and XU, C.-Y. Large-scale runoff routing with an aggregated network-response function. *Journal of Hydrology*, 2009, 368(1-4): 237-250.
- [61] VERBURG, P. H., SOEPBOER, W., VELDKAMP, A., LIMPIADA, R. and ESPALDON, V. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391-405.
- [62] ZHOU, F., XU, Y. P., CHEN, Y., XU, C.-Y., GAO, Y. Q. and DU, J. K. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region. *Journal of Hydrology*, 2013, 485: 113-125.
- [63] CHIEW, F. H. S., TENG, J., VAZE, J. and KIRONO, D. G. C. Influence of global climate model selection on runoff impact assessment. *Journal of Hydrology*, 2009, 379(1-2): 172-180.
- [64] CHIEW, F. H. S., TENG, J., VAZE, J., POST, D. A., PERRAUD, J. M., KIRONO, D. G. C., *et al.* Estimating climate change impact on runoff across southeast Australia: Method, results, and implications of the modelling method. *Water Resources Research*, 2009, 45: W10414.
- [65] CHIEW, F. H. S., YOUNG, W. J., CAI, W. and TENG, J. Current drought and future hydroclimate projections in southeast Australia and implications for water resources management. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2010, 25(4): 601-612.
- [66] VICUNA, S., DRACUP, J. A., LUND, J. R., DALE, L. L. and MAURER, E. P. Basin-scale water system operations with uncertain future climate conditions: Methodology and case studies. *Water Resources Research*, 2010, 46: W04505.
- [67] PERKINS, S. E., PITMAN A. J. Do weak AR4 models bias projections of future climate changes over Australia? *Climatic Change*, 2009, 93(3-4): 527-558.
- [68] MACADAM, I., PITMAN, A. J. WHETTON, P. H. and ABRAMOWITZ, G. Ranking climate models by performance using actual values and anomalies: Implications for climate change impact assessments. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(16): L16704.
- [69] GRAHAM, L. P., HAGEMANN, S., JAUN, S. and BENISTON, M. On interpreting hydrological change from regional climate models. *Climatic Change*, 2007, 81(1): 97-122.
- [70] DRIESSEN, T. L. A., HURKMANS, R. T. W. L., TERINK, W., HAZENBERG, P., TORFS, P. J. J. F. and UULENHOET, R. The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modelled by the HBV model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(4): 651-665.
- [71] BOORMAN, D. B., SEFTON, C. E. Recognizing the uncertainty in the quantification of the effects of climate change on hydrological response. *Climatic Change*, 1997, 35(4): 415-434.
- [72] PANAGOULIA, D., DIMOU, G. Linking space-time scale in hydrological modelling with respect to global climate change. Part 1. Models, model properties, and experimental design. *Journal of Hydrology*, 1997, 194(1): 15-37.
- [73] PANAGOULIA, D., DIMOU, G. Linking space-time scale in hydrological modelling with respect to global climate change. Part 2. Hydrological response for alternative climates. *Journal of Hydrology*, 1997, 194(1-4): 38-63.
- [74] JIANG, T., CHEN, Y. D., XU, C.-Y., CHEN, X. H., CHEN, X. and SINGH, V. P. Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dong-jiang Basin, South China. *Journal of Hydrology*, 2007, 336(3-4): 316-333.
- [75] EREGNO, F. E., XU, C.-Y. and KITTEROD, N.-O. Modeling hydrological impacts of climate change in different climatic zones. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2013, in press.
- [76] MERZ, R., PARAJKA, J. and BLOÖSCHL, G. Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. *Water Resources Research*, 2011, 47(2): W02531.
- [77] YOUNG, P. C. Stochastic, dynamic modelling and signal processing: Time variable and state dependent parameter estimation. In: FITZGERALD, W. J., WALDEN, A., SMITH, R. and YOUNG, P. C., Eds., *Nonlinear and Nonstationary Signal Processing*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 74-114.
- [78] KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrology Science Journal*, 1986, 31(1): 13-24.
- [79] JARBOE, J. E., HAAN, C. T. Calibrating a water yield model for small ungauged watersheds. *Water Resource Research*, 1974, 10(2): 256-262.
- [80] MAGETTE, W. L., SHANHOLTZ, V. O. and CARR, J. C. Estimating selected parameters for the Kentucky watershed model from watershed characteristics. *Water Resource Research*, 1976, 12(3): 472-476.
- [81] WEEKS, W. D., ASHKENASY, N. M. Regional parameters for the Sacramento model: A Case Study. *Transactions of the Institution of Engineers of Australia*, 1985, CE27(3): 305-313.
- [82] WEEKS, W. D., BOUGHTON, W. C. A simple ARMA hydrologic model for ungauged catchments in Queensland. *Transactions of the Institution of Engineers of Australia*, 1987, CE29: 85-95.
- [83] KARLINGER, M. R., GUERTIN, D. P. and TROUTMAN, B. M. Regression estimates for topological-hydrograph input. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1988, 114(4): 446-456.
- [84] POST, D. A., JAKEMAN, A. J. Relationships between catchment attributes and hydrological response characteristics in small Australian mountain ash catchments. *Hydrological Processes*, 1996, 10(6): 877-892.
- [85] MWAKALILA, S. Estimation of stream flows of ungauged catchments for river basin management. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28(20-27): 935-942.
- [86] XU, C.-Y. Testing the transferability of regression equations derived from small sub-catchments to large area in central Sweden. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2003, 7(3): 317-324.
- [87] BLOSCHL, G. Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, John Wiley, Chichester, 2005: 2061-2080.
- [88] BEVEN, K. J., FREER, J. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems. *Journal of Hydrology*, 2001, 249(1-4): 11-29.
- [89] GOTTSCHALK, L. Advances in observational hydrology—Field experiments and modeling. In: TAKEUCHI, K., Ed., *Proceedings of Workshop on the Prediction of Ungauged Basins (PUBs)*, Yamanashi University, Kofu, 2002: 26-34.
- [90] KUCZERA, G., MROCKOWSKI, M. Assessment of hydrologic parameter uncertainty and the worth of multiresponse data. *Water Resource Research*, 1988, 34(6): 1481-1489.
- [91] VANDEWIELE, G. L., ELIAS, A. Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. *Journal of Hydrology*, 1995, 170(1-4): 277-291.
- [92] PARAJKA, J., MERZ, R. and BLOSCHL, G. A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005, 9(2): 157-171.
- [93] PARAJKA, J., BLOSCHL, G. and MERZ, R. Regional calibration of catchment models: Potential for ungauged catchments. *Water Resources Research*, 2007, 43(6): W06406.
- [94] BARDOSSY, A. Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(2): 703-710.
- [95] OUDIN, L., ANDRE'ASSIAN, V., PERRIN, C., MICHEL, C. and LE MOINE, N. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 2008, 44(3): W03413.

- [96] CHIEW, F. H. S., VAZE, J., VINEY, N., JORDAN, P., PERAUD, J. M., ZHANG, L., TENG, J., YOUNG, W., ARANCIBIA, J., MORDEN, R., FREEBAIRN, A., AUSTIN, J., HILL, P., WIESENFELD, C. and MURPHY R. Rainfall-runoff modelling across the Murray-Darling Basin. A Report to the Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Project. CSIRO, Australia, 2008.
- [97] REICHL, J. P. C., WESTERN, A. W., MCINTYRE, N. R. and CHIEW, F.H.S. Optimization of a similarity measure for estimating ungauged streamflow. *Water Resources Research*, 2009, 45(10): W010423.
- [98] ZHANG, Y. Q., CHIEW, F. H. S. Evaluation of regionalisation methods for predicting runoff in ungauged catchments in south-east Australia. 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, 13-17 July 2009.
- [99] JIN, X.-L., XU, C.-Y., ZHANG, Q. and CHEN, Y. D. Regionalization study of a conceptual hydrological model in Dongjiang Basin, South China. *Quaternary International*, 2009, 208(1-2): 129-137.
- [100] FERNANDEZ, W., VOGEL, R. M. and SANKARASUBRAMANIAN, A. Regional calibration of a watershed model. *Hydrological Sciences Journal*, 2000, 45(5): 689-707.
- [101] VOGEL, R. M. Regional calibration of watershed models. In: SINGH, V. P., FREVERT, D. F., Eds., *Watershed Models*, Boca Raton: CRC Press, 2006: 549-567.
- [102] HUNDECHA, Y., BARDOSSY, A. Modeling of the effect of landuse changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology*, 2004, 292(1-4): 281-295.
- [103] GÖTZINGER, J., BARDOSSY, A. Integration and calibration of a conceptual rainfall-runoff model in the framework of a decision support system for river basin management. *Advances in Geosciences*, 2005, 5: 31-35.
- [104] GÖTZINGER, J., BARDOSSY, A. Comparison of four regionalisation methods for a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2-4): 374-384.
- [105] HUNDECHA, Y., OUARDA, T. B. M. J. and BARDOSSY, A. Regional estimation of parameters of a rainfallrunoff model at ungauged watersheds using the "spatial" structures of the parameters within a canonical physiographic-climatic space. *Water Resources Research*, 2008, 44: W01427.
- [106] ZHANG, Z., WAGENER, T., REED, P. and BHUSHAN, R. Reducing uncertainty in predictions in ungauged basins by combining hydrological indices regionalization and multiobjective optimization. *Water Resources Research*, 2008, 44: W00B04.
- [107] EFSTRATIADIS, A., KOUTSOYIANNIS, D. One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modeling: A review. *Hydrological Sciences Journal*, 2010, 55(1): 58-78.
- [108] VÖRÖSMARTY, C. J., MOORE, B., GRACE, A. L., GILDEA, M. P., MELILLO, J. M., PETERSON, B. J., RASTETTER, E. B. and STEUDLER, P. A. Continental scale models of water balance and fluvial transport: An application to South America. *Global Biogeochem*, 1989, 3(3): 241-265.
- [109] ARNELL, N. W. Effects of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: A global perspective. *Hydrology and Earth System Science*, 2003, 7(5): 619-641.
- [110] WOOD, E. F., LETTENMAIER, D. P. and ZARTARIAN, V. G. A land surface hydrology parameterization with subgrid variability for General Circulation Models. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1992, 97(D3): 2717-2728.
- [111] LIANG, X., LETTENMAIER, D. P., WOOD, E. and BURGESS, S. J. A simple hydrologically based model of landsurface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1994, 99(D7): 14415-14428.
- [112] FAMIGLIETTI, J. S., WOOD, E. F. Evapotranspiration and runoff from large land areas: Land surface hydrology for atmospheric general circulation models. *Surveys in Geophysics*, 1991, 12(1-3): 179-204.
- [113] LITTLEWOOD, I. G. Rainfall-streamflow models for ungauged basins: Uncertainty due to modelling time-step. In: PFISTER, L., HOFFMANN, L., Eds., *Proceedings of Eleventh Biennial Conference of the EuroMediterranean Network of Experimental Basins (ERB)*, Luxembourg, 20-23 September 2006: 149-155.
- [114] LITTLEWOOD, I. G. Characterisation of river flow regimes for environmental and engineering hydrology: Unit hydrographs for rainfall-streamflowmodelling. *Folia Geographica: Series Geographica-Physica*, 2008, 39: 5-36.
- [115] LITTLEWOOD, I. G., CROKE, B. F. W. Data time-step dependency of conceptual rainfall-streamflow model parameters: An empirical study with implications for regionalisation. *Hydrological Sciences Journal*, 2008, 53(4): 685-695.