

# 水文相似概念与理论发展探析

刘金涛<sup>1,2</sup>, 宋慧卿<sup>2</sup>, 王爱花<sup>2</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 目前, 工程水文领域面临诸多问题有待解决, 例如怎样合理地将现有水文观测成果外推至无资料流域, 这也成为国际水文科学协会“无测站流域水文预测计划(PUB)”所遭遇的理论瓶颈。一个可行的方法就是依据流域结构特征构建水文相似因子, 并对流域进行分类, 在相似框架下完成观测成果向无(缺)测站流域的转化。分析发现, 水文学缺乏类似于水力学、化学和生物学的分类与相似理论体系。通过对不同学科相似理论的回顾, 定义了水文相似的概念, 给出了构成流域水文相似的三要素, 即驱动力、结构和水动力要素。最后, 讨论了可用于水文相似研究的两类方法: 数理解析法和量纲分析法, 并给出了其用于实际流域水文相似研究时存在的问题及解决途径。

**关键词:** 流域结构; 无资料流域; 无因次相似因子; 水文相似

**中图分类号:** P341; G353.11      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2014)02-0288-09

近年来, 中国大江大河防洪标准得到提高, 而中小流域抵御山洪灾害的能力较低, 已成为防洪减灾工作中突出的难点<sup>[1]</sup>。为数众多的中小河流分布广泛, 大部分流域站网密度稀疏, 监测手段缺乏, 属于典型的无资料或缺资料流域。在气候及植被覆被条件相近的小流域, 如何深入挖掘地形、土壤及基岩特性等山坡结构特征信息, 并在水文预测中定量反映, 是水文研究的热点问题之一, 也是国际水文科学协会“无测站流域水文预测计划”(PUB)所遭遇的理论瓶颈<sup>[2-3]</sup>。野外实验研究已向人们展示了山坡结构特征的巨大变异性及其对降雨径流过程影响的复杂性, 但目前对两者关系的描述多为经验性的或定性的<sup>[4]</sup>。由于缺乏简单易行的解析方法, 现有实验成果很难在邻近无资料流域进行外推<sup>[5]</sup>。解决上述问题的一个公认可行方法就是依据流域下垫面结构特征构建水文相似因子, 并对流域进行分类, 在相似框架下完成观测成果从有测站向无(缺)测站流域的转化<sup>[4-6]</sup>。

本文将阐述流域水文相似的基本概念、研究进展以及如何进一步发展水文相似的理论体系, 讨论现有研究存在的问题, 给出水文相似研究未来可能的发展方向。

## 1 概念的引出

相似是一种常见的现象, 涉及自然界的各个领域, 当事物存在某些相同的特征、属性或现象时则认为相似。早在18世纪, 现代生物学分类命名的奠基人、著名生物学家 Linnaeus 就依据相似特性对生物进行分类, 即以种为单位, 亲缘相近的种集为属, 相近的属集为科, 科集为目, 目集为纲, 纲集为门, 门集为界<sup>[7]</sup>。生物分类对于人类认识生物间的亲缘关系和识别生物具有重要意义, 是科学调查生物资源的前提<sup>[8]</sup>。元素周期表则是化学领域进行元素分类和相似研究的重要理论依据, 其将最外层电子数相同的元素归为同一族, 同族元素核外电子构型相似, 从而导致其化学性质相似<sup>[9-10]</sup>。在土壤学中, 依据有严格限定的诊断层和诊断特性(相当于相似判别因子), 建立了一个全新的具有完整检索系统的谱系式土壤系统分类<sup>[11]</sup>。在工程领域,

**收稿日期:** 2013-07-24; **网络出版时间:** 2014-02-26

**网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20140226.1355.016.html>

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41271040; 51190091)

**作者简介:** 刘金涛(1977—), 男, 河北唐山人, 教授, 博士, 主要从事水文相似理论研究。E-mail: jliu@hhu.edu.cn

物理模型试验是通过对试验中主要因素进行独立控制, 使得自然界(工程)中发生的现象在实验室中得以再现出来的一种常用方法, 其指导理论即为“相似理论”, 如  $\pi$  定理<sup>[12]</sup>。物理模型试验中的相似理论结合了数学解析法和试验法的优点, 所谓“相似”指组成模型的每个要素必须与原型的对应要素相似, 这些对应要素包括几何要素和物理要素。在作为水文学理论基础的流体力学领域中, 若两种流动现象相似, 一般应满足: 几何相似、运动相似和动力相似<sup>[13]</sup>。此外, 流体力学采用量纲一相似准数来描述流体运动的特征及规律(表 1), 这使得定量界定流体的运动状态成为可能, 极大地推动了流体力学理论的发展。

表 1 流体力学中 3 个典型的量纲一相似准数

Table 1 Three representative similarity indices in fluid mechanics

量纲一数	符号	意义	应用
雷诺数 $\left(Re = \frac{\rho v d}{\eta}\right)$	$\rho$ 为流体密度; $v$ 为流体速度; $\eta$ 为流体动力粘度; $d$ 为特征长度	表征流体惯性和黏性力之比值	对液体的流态按层流或紊流进行区分, 大于下临界雷诺数时是紊流, 小于下临界雷诺数时是层流 <sup>[14]</sup>
弗劳德数 $\left(Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}\right)$	$v$ 为断面平均流速; $h$ 为断面平均水深; $g$ 为重力加速度	表征流体惯性和重力相对大小	判别明渠水流流态: 急流 ( $Fr > 1$ )、临界流 ( $Fr = 1$ )、缓流 ( $Fr < 1$ ) <sup>[14]</sup>
马赫数 $\left(Ma = \frac{u}{c}\right)$	$u$ 为特征速度; $c$ 为声速	表征某点的速度和该点的声速的比值	$Ma < 1$ 为亚声速流, $Ma > 1$ 为超音速流动, $Ma > 5$ 为超高速流 <sup>[15]</sup>

参照物理模型试验及流体力学的相关原理, 水文相似可定义为研究流域间水文响应关系的科学, 并用来定量指示流域间水文特性的区别与联系, 是水文学发展水平的标志。流域水文相似由驱动力、结构及水动力等方面要素组成。具有相同或相似的下垫面结构特征、驱动力条件、水流动力特征等的山坡或流域, 可以定义为水文相似的山坡或流域。水文相似的三要素是构成流域水文系统不可或缺的 3 个组成部分(图 1)。

当然, 流域水文系统 3 个组成部分间的作用是相互的, 如图 1 中虚线箭头。流域水文系统中驱动力(外部的能量和水输入)和结构要素(植被、土壤和地形等)决定了流域水文循环的动力学机制(图 1 中实箭头)。因此, 从水循环过程的规律出发研究水文相似是通常的途径。然而, 在较大的时间尺度上, 水流的动力过程往往会深刻地改变流域地貌结构, 而流域结构的变化, 一方面将改变驱动因素的输入, 如地形增雨效应和阴阳坡对辐射的吸收等等; 另一方面将改变水流的路径, 进而改变水流的动力特征。在较大的空间尺度上, 如整个长江或者黄河流域, 由于其可能横跨多个气候带, 水热等驱动力因素是影响水文循环的重要因素。而处于同一气候类型的中尺度流域, 水热条件类似, 如仅仅考虑相邻或者相近流域的设计洪水外插或移用问题, 则流域山坡结构要素是主要考虑的因子。

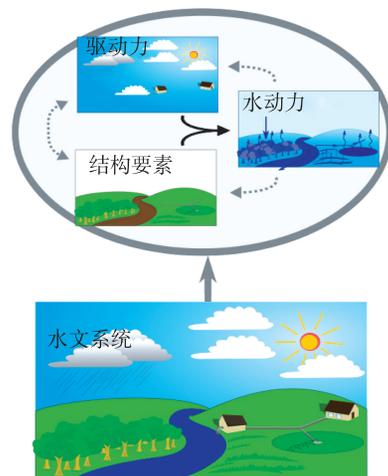


图 1 流域水文系统中水文相似性的三要素组成<sup>[16]</sup>  
Fig. 1 Three primary components in hydrological similarity

## 2 研究进展

目前, 水文学中常用依照气候、土地类型的分类方式, 这些分类和相似研究往往是经验性或描述性的, 很难深刻揭示和理解水文现象的本质<sup>[17-19]</sup>。量化的水文相似研究始于 20 世纪 50 年代, 早期的科学家尝试将水力学中的物理模型试验(如 Langhaar<sup>[13]</sup>)引入水文学研究中, 但由于缺乏一套完备的相似理论体系及对实际流域结构的必要认识, 研究并未取得预期的成果<sup>[20]</sup>。Rodriguez-Iturbe 和 Valdes<sup>[21]</sup>开辟了水文相似研究量化的新途径, 其通过所建立的地貌瞬时单位线(GIUH)将河流地貌特征转化为流域水文响应函数。GIUH

方法适合应用于河网水文过程占主导的大流域,而对于一级支流子流域或山坡,方法未能捕捉到其水文响应的控制因子<sup>[22]</sup>。然而,山坡或小流域观测结果如何外推到其他地区恰恰是当前水文相似性研究的关键问题之一。著名的 TOPMODEL 则采用地形指数  $\ln(\alpha/\tan\beta)$  来模拟流域水文响应,流域内具有相同地形指数的点其水文特性也相同<sup>[23]</sup>,具有相同地形指数频率分布的流域具有水文相似性<sup>[24-25]</sup>。

近年来,在工程水文计算领域出现了一类水文相似流域筛选和评价的方法,该类方法通过人为设定流域特征指标,并采用相关评价方法(如模糊优选法、聚类分析法、投影寻踪分类法等等)来进行相似流域分类或参证流域的选取<sup>[17, 26-28]</sup>。正如这些研究者自身所指出的,选取并设定流域特征指标的过程通常依赖研究者的经验,具有很大的不确定性<sup>[27-28]</sup>。考虑到流域河网的自相似性,近二三十年来分形理论也被用来定量分析河网结构及流域地形地貌的特征<sup>[29-30]</sup>。例如,Shen 等<sup>[31]</sup>分析黄河水系的分形特征与地质构造的关系。此外,亦有研究基于分形维数构建了所谓的分形瞬时单位线(FIUH),进一步拓展了分形理论的应用范围<sup>[32]</sup>。

然而,上述的相似方法缺乏描述流域下垫面结构特征与水流动力过程的解析关系,即已有关系的建立没有上升至水流动力学理论层面,因而导致经验性的存在<sup>[20, 33]</sup>。通过对 Boussinesq 方程的线性化,Brutsaert<sup>[34]</sup>导出了平直山坡土壤水流解析解及其特征响应函数(CRF),并给出了反映山坡尺寸(坡长和坡度)和水力特性的水文相似因子——山坡数( $H_i$ )。Berne 等<sup>[35]</sup>则研究了具有指数型山坡宽度函数的平坦山坡水流问题,其通过对山坡蓄量 Boussinesq 方程的线性化,导出了水流相似度参数——山坡 Péclet 数( $Pe$ ),旨在表达山坡收敛或发散的形状特征与山坡水文响应的关系。Harman 和 Sivapalan<sup>[36]</sup>给出了平直山坡的无因次数 $\bar{\eta}$ ,解析结果显示 $\bar{\eta}$ 是 $H_i$ 和 $Pe$ 的简化特例。以上研究均采用数理解析的方式导出相似因子,并指示流域(山坡)间的水文响应相似性,可统称为数理解析法。目前,此类方法仅限于分析连续水流问题(如多孔介质水流问题),对简化的(或理想的)山坡或流域的地下水控制方程进行解析。

但是,应该看到,实际流域水文过程具有很强的时空变异性,存在的介质也是高度非均一的。例如,在土壤和地下水含水层中,除土壤基质流和地下水多孔介质流等连续水流问题外,由于根系、虫洞、岩石裂隙等的存在,土壤优先流和地下水裂隙流等也广泛存在。这使得建立统一的数学物理方程,并描述非均匀、不连续的水分运动过程变得很困难,进而限制了数理解析法的应用。例如,刘金涛等<sup>[37]</sup>将 $Pe$ 数应用于实际流域,表明现有的基于理想山坡推导的水文相似因子有助于理解山坡降雨径流与结构特征的关系,但其未能充分考虑实际流域山坡结构的分布规律,因而导致其实际应用效果并不理想。

事实上,水文学家对山坡结构是影响径流产生的重要控制因子已普遍达成共识<sup>[38-41]</sup>。但受实际流域地表地形、土壤结构和质地、土壤厚度、基岩特性(基岩地形及其渗透性)等山坡结构要素的空间变异及其协同影响,山坡结构与降雨径流的这种响应关系尚难定量表述,加大了流域(尤其是无资料流域)洪水预测的难度<sup>[39, 42]</sup>。过去 30 年间,基于山坡结构特征及水流动力机理探求水文相似因子的努力一直是水文科学研究的热点问题之一。水文学家已建立了理想状态下反映特定水流过程的无因次相似因子(如 $Pe$ 等),但与其他学科相比,理论体系并不完善,仍缺乏一整套连续的描述水文响应特征的相似因子及方法。一方面,应深入研究并揭示山坡结构特征的空间分布规律,构建具有实际意义的水文物理方程,在数理解析方面寻求突破;另一方面,还需借鉴相近学科(如水力学)的做法,发展水文相似理论。

### 3 比较研究与讨论

#### 3.1 水文学与水力学相似要素的比较

相似及相关联的分类研究是学科发展到特定阶段并走向成熟的必需环节,也将为相关应用研究提供定量标准。例如,在生物分类学中,根据生物的相似性(如形态、形状等),将其归入不同的类群(分类单元),从而为更广泛、更有效地保护和利用生物资源提供方便。显然,水文学与生物学和化学等在学科研究方法、内容及基本理论上存在截然不同的区别。作为自然地理学和地球物理学的分支,水文学相似理论的发展应当

遵循本领域的内在规律, 吸收、借鉴相近分支学科(如水力学)的研究方法, 发展自身相似理论。

从概念上讲, 水文学是研究水在自然界土壤、岩石等中运动、变化和分布等的科学, 而水力学则主要研究以水为代表的液体的宏观机械运动规律及其工程技术应用。事实上, 水文学与水力学关系密切, 两者具有共同的研究对象——水, 前者研究水循环的整个过程, 后者则着重于水体的动力过程。一般认为, 河道测流属水文学研究内容, 而明渠流的动力学等则属水力学的范畴<sup>[43]</sup>。通过比较分析水文学及水力学的研究对象、内容等, 发现水力学问题同样包含了驱动力、几何结构和运动特性等三方面的要素, 如表 2 所示。

表 2 水文学与水力学系统中相似要素条件比较  
Table 2 Comparison of similarity factors between hydrology and hydraulics

组成	系统要素		水力学中相似条件
	水文学	水力学	
驱动力	太阳辐射、重力、流域(区域)外部的水分(水汽)输入 <sup>[44]</sup>	作用在流体上相应位置处的各种力(如重力、压力、粘性力和弹性力等) <sup>[14]</sup>	驱动力相似: 两个流动现象所有作用力方向相同, 且大小的比值相等 <sup>[45]</sup>
几何结构	流域区域下垫面植被、土壤、地形地貌和近地表岩石等	河道、过水建筑物或者管道的尺寸(直径、长度)及粗糙度等	几何相似: 物模与原型形状相同, 尺寸成比例 <sup>[46]</sup>
水动力特性	水在空气、土壤及岩石介质中运动的动力学特征, 其间水的存在状态有气、液和固态之分, 在土壤中还分饱和、非饱和状态	水体中水质点水流方向、速度及加速度等	水动力相似: 两个质点沿着几何相似的轨迹运动, 在互成一定比例的时间段内通过一段几何相似的路程 <sup>[46]</sup>

驱动力在水文学中主要表现为太阳辐射、重力及流域(区域)外的水分输送等。水力学中驱动力为作用在流体上相应位置处的各种力, 如重力、压力、粘性力和弹性力等, 如果两个流动现象所有作用力方向相同, 且大小的比值相等, 即认为它们驱动力相似。水文系统中的几何结构要素主要指流域或者区域下垫面植被、土壤、地形地貌和近地表岩石等。在水力学系统中, 几何结构要素主要指河道、过水建筑物或者管道的尺寸(直径、长度)及粗糙度等, 几何相似的物理模型与原型形状需相同, 尺寸成比例。在水文学中, 水流动力特性较为复杂, 表现为水在空气、土壤及岩石介质中运动的动力学特征, 这其中水的存在形式也是多样的。水力学中水流现象的动力学特性体现为水体中水质点水流方向、速度及加速度等。因此, 水力学运动相似是指对不同的流动现象, 在流场中的所有对应点的速度和加速度的方向一致, 且比值相等。

表 2 中可以看出, 水文学与水力学系统均由驱动力、几何结构和水动力特性等三方面要素组成, 但两者在构成这三要素的具体内容上相差较大。水文学更加关注水分在自然界大气、土壤及岩石等的赋存、运动及演变规律的研究, 水力学则主要研究水质点在驱动力作用下的运动规律。前者偏重研究水在自然状态下的运动转化规律, 后者偏向解决水利工程实际问题。

### 3.2 水文相似研究方法讨论

3.1 节的分析表明, 作为研究水的科学, 水文学与水力学具有相近的要素组成。因此, 可以得出推论: 存在一种可能性, 即水文学可以吸收并借鉴水力学物理模型试验的理论、方法来发展自身的相似理论。综上, 包括水文学中现有的相似研究方法——数理解析法, 以及可能被采用的物理模型试验方法——量纲分析法, 共有两类可用于水文学相似研究的方法(表 3)。

表 3 两类可用于水文学相似研究的方法  
Table 3 Two kinds of methods for the study of hydrological similarity

名称分类	方法描述	应用范围
数理解析法	对能建立微分方程的问题, 可以采用数学方法, 对方程进行解析, 推求出相似因子。常用的分析方法有相似转换法、积分变换法, 如 Brutsaert <sup>[34]</sup> 的研究等	适合于连续水流问题, 比如土壤基质流、地下水多孔介质水流等, 可以建立描述物理现象的方程, 且能求出完整的解析解。如果存在优先流、裂隙流则不适合
量纲分析法	在研究现象相似问题的过程中, 对各种物理量的量纲进行考察时产生 <sup>[45]</sup>	无法掌握足够的、成熟的物理定律, 或是缺乏基本的微分方程的指导 <sup>[47]</sup>

所谓数理解析法,即采用数学方法(如积分变换),对水文物理方程进行解析,推求出相似因子。该方法适合于能够建立统一的微分方程的水文问题。例如,Brutsaert<sup>[34]</sup>、Berne等<sup>[35]</sup>、Harman和Sivapalan<sup>[36]</sup>分别对各自建立的描述山坡水文过程的 Boussinesq 方程进行线性化和积分变换,导出了反映山坡结构和水力特性的水文相似因子。但是,由于水文过程的时空变异性及存在介质的非均一性,目前很难建立普适的数学物理方程,这限制了数理解析法的实际应用。

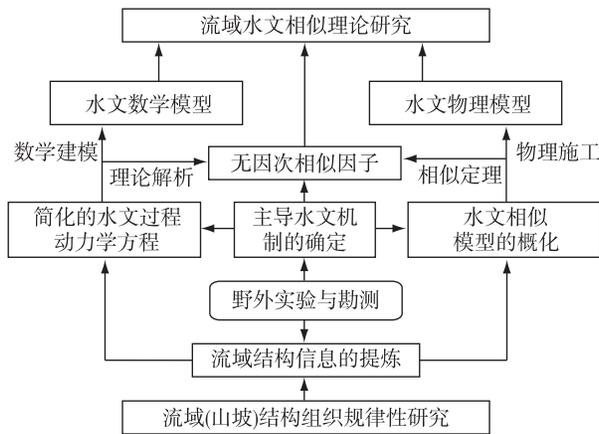


图 2 流域水文相似理论研究的框架

Fig. 2 Flow diagram for the studies of hydrological similarity

为此,近年发展了一些简化的方法,如山坡蓄量动力学方程通过引入宽度函数和土壤厚度函数等巧妙地考虑了山坡结构信息,提供了一种简化的、低维的描述山坡水文过程的方法<sup>[48-50]</sup>。然而,山坡蓄量动力学理论建立以来,其模型主要应用于高度概化的理想山坡,例如山坡的宽度服从指数型函数分布且土壤厚度为常数等,主要是方便理论分析,但限制了模型在实际流域的应用<sup>[51]</sup>。实际流域山坡土壤厚度和宽度函数服从怎样分布,不同的函数分布对蓄量动力学模型建模和解析的影响如何?因此,首先需要探讨实际流域山坡结构特征自身的组织规律性,然后构建适合实际流域的简化的水文过程动力学方程,最后应用其进行理论解析,这不失为一个行之有效的发展水文相似理论的数理途径(图2)。

量纲分析法则是在工程技术领域物理模型试验所广泛采用的方法。量纲分析法的最大优点在于,当所面对的某一现象无法采用微分方程来准确描述时,可选取其主要的影响因素进行分析,从而得到用于描述这一现象的相似准则。就水文学科而言,所要研究的降雨径流过程受制于多方面的因素,不但过程复杂,而且也难于得到描述其内在关系的微分方程。但是,驱动力、下垫面结构及水动力三要素是主要影响因素。通过将量纲分析的方法应用于降雨径流过程的分析,达到对这一现象的简化,从而为水文相似研究提供新的理论指导。

然而,相对其他物理现象(过程),水文过程具有独特性。在水文学中,水的存在形式有气、液和固态之分,即便在土壤中也分饱和与非饱和状态;水存在的介质具有多样性,如大气、植被、土壤、岩石、河道等,决定了水文相似研究较水力学相应研究更为复杂的特性。与水力学相比,水文学中流域的下垫面结构异常复杂,自然界中几乎找不到两个形状、地形起伏完全相同的流域。此外,流域各处的土壤结构及渗透性等高度变异,很难在水文物理实验中找到一种材料以充分模拟自然界中的全部土壤物理特征(如土壤基质结构、大孔隙分布等),物理模型施工难度巨大。因此,在将物理模型试验方法应用于水文相似研究时,需要进一步发展物理模型试验的相关理论和方法。具体如下:

第一,论证在无资料区水文预测和工程水文计算中引入物理模型的可行性。物理模型试验通常是水利工程建设所采用的方法,在水文中鲜有采用。而水文数学模型及野外定位实验则是常用的方法。因此,在水文中引入物理模型试验方法的研究阶段,需要参考数模及野外实验的成果(图2)。分析物模、原型、数模三者间的区别联系,从而检验、评价物理模型中材料、结构及驱动因素对模拟结果的影响,以确保水文物理模型试验方法的可行性。

第二,对于水文相似因子的推求,需要对实际流域结构及主要水文机制充分认识,抓住主要控制因子并概化出合理的相似模型,然后应用相似准则导出无因次相似因子(图2)。当然,不同区域水文过程(环节)的主导机制不一样,如南方湿润山丘区中径流以壤中流为主,需加以区分,最终目标是发展一套水文相似及工程水文试验的理论和方法。

第三,开展水文相似模型试验方法研究,以给出水文物理模型中材料选取、结构尺寸及驱动因素的确定方法。在试验中,通常需遵循基本的相似准则,如几何相似,即物模与原型流域高程、土壤的厚度成比例,

地形起伏相同等。同时,为了控制水流动力特性的相似,需要保持模型及原型流域的某些无因次相似因子的量值相等。通过遵循这些准则,可以完成较大尺度的原型流域向小尺度水文物模的缩放,然后依据物模试验结果推求出原型的设计值,从而又实现了小尺度向大尺度的转化,则水文尺度问题可以像其他工程问题一样得以解决。

图2为流域水文相似理论研究的框架图,列出了实施水文相似研究的两种途径。可以看出,量纲一相似因子的推求是流域水文相似理论研究的核心理论内容。此外,不论是数理解析法还是量纲分析法均要求对流域结构规律认知水平的提高,即依赖于野外实验与勘测。可以说,水文实验是相似理论研究的基础。

## 4 结论与展望

回顾了相似理论在水文学中的研究进展,发现水文学缺乏类似生物学、化学及水力学等学科的相似理论体系,极大地限制了学科理论(如流域分类的定量化)的发展与工程应用(如无资料流域的水文预测问题)。通过对比相邻学科,如水力学,初步给出了流域水文相似的定义及相似三要素(驱动力、结构及水动力要素),得到了两类可用于水文学相似研究的方法,即数理解析法和量纲分析法。

本文所归纳、建议的两类相似研究的方法其相关研究仍处于起步阶段。对于数理解析法,亟待解决的难题是如何勘测、预测及概化流域下垫面结构信息,首先需要新的探测手段及预测方法以深化对流域结构的认知水平,然后有效概化并建立实际流域的数学物理模型以描述水文过程,最后完成解析。对于量纲分析方法,同样需要对流域结构信息认知水平的提高,同时需面对物理模型试验方法移用到水文学后的一系列重大问题(如水文物模的适用性、可行性等)以及具体问题,诸如物模材料选取、结构尺寸及驱动因素的确定方法等。

水文相似性研究是水文学的前沿问题,研究的开展将增进人们对水文现象的理解,提高水文研究的科学性,不断发展和完善水文学。此外,水文相似研究的成果对无资料小流域山洪预测、设计洪水计算甚至滑坡灾害防治等都有一定指导意义。

**致谢:** 河海大学任立良教授、陈喜教授给出了中肯建议,加拿大阿尔伯塔大学(University of Alberta)的 Xiaopeng LI 博士后修改了英文摘要,在此表示感谢。

### 参考文献:

- [1] 刘志雨,杨大文,胡健伟. 基于动态临界雨量的中小河流山洪预警方法及其应用[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2010, 46(3): 317-321. (LIU Zhiyu, YANG Dawen, HU Jianwei. Dynamic critical rainfall-based torrential flood early warning for medium-small rivers [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2010, 46(3): 317-321. (in Chinese))
- [2] TROCH P A, CARRILLO G A, HEIDBUCHEL I, et al. Dealing with landscape heterogeneity in watershed hydrology: A review of recent progress toward new hydrological theory [J]. Geography Compass, 2009, 3: 375-392.
- [3] 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. (LIU Suxia, LIU Changming, ZHAO Weimin. Towards the methodology for predictions in ungauged basins [J]. Progress in Geography, 2010, 29(11): 1333-1339. (in Chinese))
- [4] McDONNELL J J, SIVAPALAN M, VACHE K. Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology [J]. Water Resources Research, 2007, 43, W07301. [doi: 10.1029/2006WR005467]
- [5] McDONNELL J J, WOODS R. On the need for catchment classification [J]. Journal of Hydrology, 2004, 299: 2-3.
- [6] WAGENER T, SIVAPALAN M, TROCH P A, et al. Catchment classification and hydrologic similarity [J]. Geography Compass, 2007, 1: 901-931.
- [7] LINNAEUS C. Systema naturae per regna tria naturae: Secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis (in Latin) (10th edition ed.) [M]. Stockholm: Laurentius Salvius, 1758.
- [8] 袁运开,顾明远. 科学技术社会辞典: 生物[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 1991. (YUAN Yunkai, GU Mingyuan. Science tech-

- nology society: Biology [M]. Hangzhou: Zhejiang Education Press, 1991. (in Chinese))
- [9] MENDELEJEV D. Über die Beziehungen der eigenschaften zu den atomgewichten der elemente [J]. Zeitschrift Für Chemie, 1869, 12: 405-406.
- [10] 杨水彬, 张玉平, 胡钢. 谈化学元素性质的相似性[J]. 黄冈师范学院学报, 2002, 22(3): 80-82. (YANG Shuibin, ZHANG Yuping, HU Gang. On property similarity of chemical elements [J]. Journal of Huanggang Normal University, 2002, 22(3): 80-82. (in Chinese))
- [11] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (GONG Zitong, ZHANG Ganlin, CHEN Zhicheng, et al. Pedogenesis and soil taxonomy [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [12] BUCKINGHAM E. On physically similar systems: Illustrations of the use of dimensional equations [J]. Physical Review, 1914, 4(4): 345-376.
- [13] LANGHAAR H L. Dimensional analysis and theory of models [M]. New York: John Wiley, 1951: 166.
- [14] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (WU Chigong. Hydraulics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))
- [15] PRANDTL L. Essentials of fluid dynamics [M]. New York: Hafner Publications, 1952: 452.
- [16] SIVAPALAN M. Predictions under change (PUC): Water, earth and biota in the anthropocene [R]. Draft Research Report, Center for Water as a Complex Ecosystem, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011.
- [17] 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))
- [18] ROBINSON J S, SIVAPALAN M. Temporal scales and hydrological regimes: Implications for flood frequency scaling [J]. Water Resources Research, 1997, 33: 2981-2999.
- [19] BEVEN K J. Searching for the holy grail of scientific hydrology:  $Q_t = (S, R, \Delta t)$  as closure [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 10: 609-618.
- [20] ARYAL S K, OLOUGHLIN E M, MEIN R G. A similarity approach to predict landscape saturation in catchments [J]. Water Resources Research, 2002, 38: 1208. [doi: 10.1029/2001WR000864]
- [21] RODRIGUEZ-ITRUBE I, VALDES J B. The geomorphologic structure of hydrologic response [J]. Water Resources Research, 1979, 15: 1409-1420.
- [22] SIVAPALAN M, WOOD E F, BEVEN K J. On hydrologic similarity: 3: A dimensionless flood frequency model using a generalized GUH and partial area runoff generation [J]. Water Resources Research, 1990, 26: 43-58.
- [23] BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1979, 24: 43-69.
- [24] 孔凡哲, 芮孝芳. 基于地形特征的流域水文相似性[J]. 地理研究, 2003, 22(6): 709-715. (KONG Fanzhe, RUI Xiaofang. Hydrological similarity of catchments based on topography [J]. Geographical Research, 2003, 22(6): 709-715. (in Chinese))
- [25] 刘利峰, 毕华兴. 吉县蔡家川小流域水文响应相似性研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 161-164. (LIU Lifeng, BI Huaxing. Research on the hydrological comparability of the Caijiachuan small watershed in Jixian county of Shanxi province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(4): 161-164. (in Chinese))
- [26] 张欣莉, 丁晶, 王顺久. 投影寻踪分类模型评定相似流域[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 356-360. (ZHANG Xinli, DING Jing, WANG Shunjiu. Projection pursuit method for assessing analogy basins [J]. Advances in Water Science, 2001, 12(3): 356-360. (in Chinese))
- [27] 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))
- [28] SAVICZ 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: 2895-2911.
- [29] 张少文, 王文圣, 丁晶, 等. 分形理论在水文水资源中的应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 141-146. (ZHANG Shaowen, WANG Wensheng, DING Jing, et al. Application of fractal theory to hydrology and water resources [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1): 141-146. (in Chinese))

- [30] RODRIGUEZ-ITURBE I, RINALDO I. Fractal river basins, chance and self-organization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [31] SHEN X H, ZOU L J, ZHANG G F, et al. Fractal characteristics of the main channel of Yellow River and its relation to regional tectonic evolution [J]. *Geomorphology*, 2011, 127: 64-70.
- [32] CUDENNEC C, FOUAD Y, SUMARJO G I, et al. A geomorphological explanation of the unit hydrograph concept [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18: 603-621.
- [33] LYON S W, TROCH P A. Hillslope subsurface flow similarity: Real-world tests of the hillslope Péclet number [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43, W07450. [doi: 10.1029/2006WR005323]
- [34] BRUTSAERT W. The unit response of groundwater outflow from a hillslope [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30: 2759-2763.
- [35] BERNE A, UIJLENHOET R, TROCH P A. Similarity analysis of subsurface flow response of hillslopes with complex geometry [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41, W09410. [doi: 10.1029/2004WR003629]
- [36] HARMAN C J, SIVAPALAN M. A similarity framework to assess controls on shallow subsurface flow dynamics [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45, W01417. [doi: 10.1029/2008WR007067]
- [37] 刘金涛, 冯德程, 陈喜, 等. 应用 Péclet 数解析山坡结构特征的水文效应[J]. *水科学进展*, 2012, 23(1): 1-6. (LIU Jintao, FENG Dezeng, CHEN Xi, et al. Application of the hillslope Péclet number for analyzing hillslope subsurface flow responses in a real catchment [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(1): 1-6. (in Chinese))
- [38] JENCISO K G, McGLYNN B L, GOOSEFF M N, et al. Hydrologic connectivity between landscapes and streams: Transferring reach-and plot-scale understanding to the catchment scale [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45, W04428. [doi: 10.1029/2008WR007225]
- [39] JENCISO K G, McGLYNN B L. Hierarchical controls on runoff generation: Topographically driven hydrologic connectivity, geology, and vegetation [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47, W11527. [doi: 10.1029/2011WR010666]
- [40] McDONNELL J J, McGUIRE K, AGGARWAL P, et al. How old is streamwater? Open questions in catchment transit time conceptualization, modeling and analysis [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24: 1745-1754.
- [41] NIPPGEN F, McGLYNN B L, Marshall L A, et al. Landscape structure and climate influences on hydrologic response [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47, W12528. [doi: 10.1029/2011WR011161]
- [42] LEHMANN P, HINZ C, McGRATH G, et al. Rainfall threshold for hillslope outflow: An emergent property of flow pathway connectivity [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11: 1047-1063.
- [43] BISWAS A K. History of hydrology [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Co, 1970.
- [44] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (RUI Xiaofang. Principles of hydrology [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [45] 徐挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982. (XU Ting. Similarity theories and model test [M]. Beijing: China Agricultural Machinery Press, 1982. (in Chinese))
- [46] 左东启. 模型试验的理论和方法[M]. 北京: 水利水电出版社, 1984. (ZUO Dongqi. The theories and methodology of model test [M]. Beijing: China Water Power Press, 1984. (in Chinese))
- [47] 柳晖. 基于能量和量纲分析的高温蠕变分析方法研究[D]. 武汉: 华东理工大学, 2012. (LIU Hui. Research on the methodology for high temperature creep based on energy and dimensional analysis [D]. Wuhan: East China University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))
- [48] FAN Y, BRAS R. Analytical solutions to hillslope subsurface storm flow and saturation overland flow [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34: 921-927.
- [49] TROCH P A, van LOON E E, HIBERTS A. Analytical solutions to a hillslope-storage kinematic wave equation for subsurface flow [J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25: 637-649.
- [50] TROCH P A, PANICONI C, van LOON E E. Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1: Formulation and characteristic response [J]. *Water Resources Research*, 2003, 39. [doi: 10.1029/2002WR001728]
- [51] MATONSE A H, KROLL C. Simulating low streamflows with hillslope storage models [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45, W01407. [doi: 10.1029/2007WR006529]

## Advances in the theories of hydrologic similarity: A discussion\*

LIU Jintao<sup>1,2</sup>, SONG Huiqing<sup>2</sup>, WANG Aihua<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Nowadays, engineering hydrology is facing many challenges such as the extrapolation or regionalization of the observations of watershed behaviors. The difficulties in producing concise, easily understood explanations of watershed behaviors have been considered as a theoretical bottleneck by the Prediction in Ungaged Basins (PUB) of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS). An applicable solution is to develop a classification system based on dimensionless similarity indices, group watersheds into distinct groups, and then transfer observed results from gauged to ungaged basins under the frame of hydrologic similarity. In this study, it is found that hydrology does not have a theoretical system of classification and similarity as hydraulics, chemistry and biology, etc. By reviewing and comparing the similarity theory in other disciplines, we discussed the concept of hydrologic similarity, its basic methodology and three primary components, i. e., driving, structural, and hydrodynamic factors. Finally, two useful methods for hydrologic similarity (mathematical and dimensional analysis) as well as the future directions are discussed.

**Key words:** Landscape structure; ungaged basin; dimensionless similarity indices; hydrological similarity

---

### 征 稿 启 事

《水科学进展》是以水为论述主题的学术期刊，主要反映国内外在暴雨、洪水、干旱、水资源、水环境等领域中科学技术的最新成果、重要进展，当代水平和发展趋势，报道关于水圈研究的新事实、新概念、新理论和新方法，交流新的科研成果、技术经验和科技动态；她涉及与水有关的所有学科，包括水文科学、大气科学、海洋科学、地质科学、地理科学、环境科学、水利科学和水力学、冰川学、水生态学以及法学、经济学和管理科学中与水有关的内容。

本刊热诚欢迎广大水科学工作者踊跃投稿，尤其欢迎以下几方面的稿件：

- (1) 题材较重大，能为国家对与水有关的重大问题的决策提供科学依据的稿件；
- (2) 反映水科学各分支学科重要研究成果尤其是前沿课题的稿件；
- (3) 探讨水圈与地球其他圈层相互关系及水与社会发展相互关系等宏观科学问题的稿件；
- (4) 报道对推动水科学发展有重要意义的新事实、新概念及新途径的稿件；
- (5) 运用多学科的理论与方法探讨水科学基础理论(尤其是跨学科的生长点)与实际问题的稿件；
- (6) 介绍有推广价值，思路新颖的技术方法和经验的稿件。

《水科学进展》编辑部

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41271040; No. 51190091).