

无测站流域水文预测(PUB)的研究方法

刘苏峡¹, 刘昌明¹, 赵卫民²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 水利部黄河水利委员会水文局, 郑州 450004)

摘 要:根据国内外研究成果,结合自身的科研体会,借用“巧妇面临无米之炊”时可能用到的“借、替和种米”的应对逻辑,将无测站流域水文预测(Predictions in Ungauged Basins, PUB)的研究方法归纳为移植法、替代法和生成法。将移植法归类为两种,一是当研究地区没有测站资料(简称无资料)而周边某个地区有测站资料(简称有资料)时,如果有资料区的自然地理环境与研究地区相似,直接移用该有资料地区的资料到无资料区,即直接移植法;二是倘若周边不只一个区域有资料,那么就借用所有这些点的信息,采用插值法得到无资料区的资料,即间接移植法。定义替代法为如果本研究区域或者相似区域没有资料,但有可能“求出”资料的辅助信息,则挖掘这些信息的方法。将替代法分为两类,一是根据本研究区域其他信息,通过模型模拟、同化、融合、从本学科和多学科领域挖掘信息等技术,得到本研究区所需资料。二是根据其它研究区域其他信息得到本研究区所需资料,包括就地外延和对比流域法。定义生成法为通过获取第一手资料开展水文预测的方法,包括野外实验和室内实验。通过梳理PUB的这些研究途径,探索了PUB方法发展的可能突破口,旨在推动PUB的研究提供思路。

关 键 词:水文预测; 资料; PUB; 方法; 流域

1 引言

国际水文科学协会于2003年在日本札幌召开了第23届国际地球物理和大地测量联合会。会上启动了一个称为“无测站流域水文预测,简称为PUB(Predictions for Ungauged Basins)研究计划^[1]。该计划拟用2003—2012年这10年时间集中研究PUB问题。与20世纪60年代启动的国际水文十年计划相呼应,该计划又被称为新国际水文十年计划。自启动以来,该计划历经澳大利亚/美国的Murugesu Sivapalan教授、美国的Jeff McDonnell教授、奥地利的Gunter Blöschl教授和加拿大的John Pomeroy教授等两年一度的执行主席领导,各个国家以国家工作小组形式已经开展了大量工作。中国的PUB工作组成立于2004年^[2],迄今已召开了多次不定期的工作会议和两届以中国PUB为题的国际研讨会^[3-4]。

纵观已有的PUB研究,大多是从不同的角度研究PUB的某个具体问题,缺乏方法层面上的思考。PUB研究可以类比中国的一句俗语“巧妇难为无米

之炊”,强调在无米情况下,如何充饥。对一个巧妇而言,在面临无米之炊时,大约总是从借米、找替代品和“想法种点能吃的”这3个方面去尝试各种充饥的办法。根据国内外研究成果,结合自身的科研体会,认为PUB研究至今,其方法也基本上循此。本文基于这个思路,总结没有测站资料(简称无资料)流域水文预测的研究方法,梳理PUB的研究途径,探索PUB方法发展的可能突破口,旨在推动PUB的研究提供思路。

2 PUB定义

传统水文预测的对象是河道流量。包括水位预测、洪峰(峰量、峰现时间)预测、年径流预测、流量过程预测、枯水预测等^[5]。随着人类活动对地球上水的影响加剧,人们对水循环的认识更加全面,水文预测的对象逐步扩大,不仅包括河、湖、海等一切地表水,还包括地下水、大气水、植被水(蒸腾、蒸发)、土壤水等其他水分贮存形式^[6-7],不仅包括水量还包括浓度等水质指标和一些特有指标,如新近的

收稿日期:2010-01; 修订日期:2010-07.

基金项目:国家自然科学基金项目(40971023,40671032,40830636);“973”国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421307,2010CB428404);对欧盟科技合作专项经费项目(0911);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q06-1-3,KZCX2-YW-433)。

作者简介:刘苏峡(1965-),女,湖北黄陂人,博士,副研究员,主要从事流域水文模拟预测、界面水文过程、土壤水分、生态需水量等方面的研究。Email: liusx@igsnrr.ac.cn

热门话题环境流^[8]等。按照这个定义,所有的这些对象在本文中都被广义地称为水文变量。

水文预测方法一般均是基于模型/方案。模型/方案可以是两个或几个定义相同但时间和空间不同的水文变量之间的经验关系,如今天和昨天的流量、上下游水位关系等;可以是水文变量和与水文变量相关的其他变量的经验关系,如洪峰与流域面积的关系等;也可以是水文变量和与水文变量相关的其他变量的机理关系。水文预测就是根据某时刻、某地点的已知变量,预测未来时刻和未知空间位置的水文变量。这里的预测对象为模型的输出,预测的支持变量为模型的输入。为了建立模型,水文预测一般需要拥有一定时段的输入与输出的实测资料来率定模型参数。

而事实是,目前全球很多地方是无资料区,中国的资料观测站网尚不发达。中国幅员广阔,河流众多,尽管大多数大河都已设有水文站点控制,并且在西部偏远地区都已经有点站布设,但站网密度与发达国家相比仍有不少距离(图1)。以中国黄河流域为例,现有水文站416处(基本水文站348处),黄河流域面积为752660 km²,平均站网密度为2163km²/站。站网密度不算稀,但分布极不均匀(图2),西部站点非常稀少(图3),站网密度稀于世界气象组织定的标准(表1),大约8000~9000 km²才一个站。所以在无资料条件下,预测模式的输入、输出或其中任何一个未知时,水文预测就

面临严峻的挑战。PUB计划的提出就正是应对这样的挑战。

从上面分析推广,广义的“无测站流域水文预测”就应该指与水相关的所有变量的预测,包括水量、水质、水效应和环境流等。而且预测的意义不仅仅是时间尺度预测,也指空间尺度的估算。另外,无资料的含义既原指(观测)资料一无所有的极端情形,也指仅仅部分资料缺失情形,或者原来有资料,但因为人类活动影响环境造成变化,使原有资料不可用,失去了延续性。后者常被(严格意义上说)称为稀缺资料。而且在广义的无测站流域水文预测中,流域也有时被广义地推广为区域。要注意的是,实际有资料但因为客观原因未能收集到资料的无资料情形不属于本文讨论的范畴。

表1 世界气象组织规定的站网密度
Tab.1 The station density defined by World Meteorology Organization (WMO)

		降雨/(km ² /站)	径流/(km ² /站)	蒸发/(km ² /站)
温带、热带	平原	600	1000	50000
	山区	100	300	50000
干旱地带		1500	5000	3000

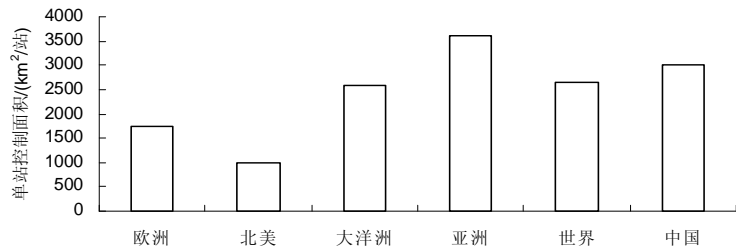


图1 中国和世界单站控制面积对比

Fig.1 The controlled area per station (km²) in China and other places in the world

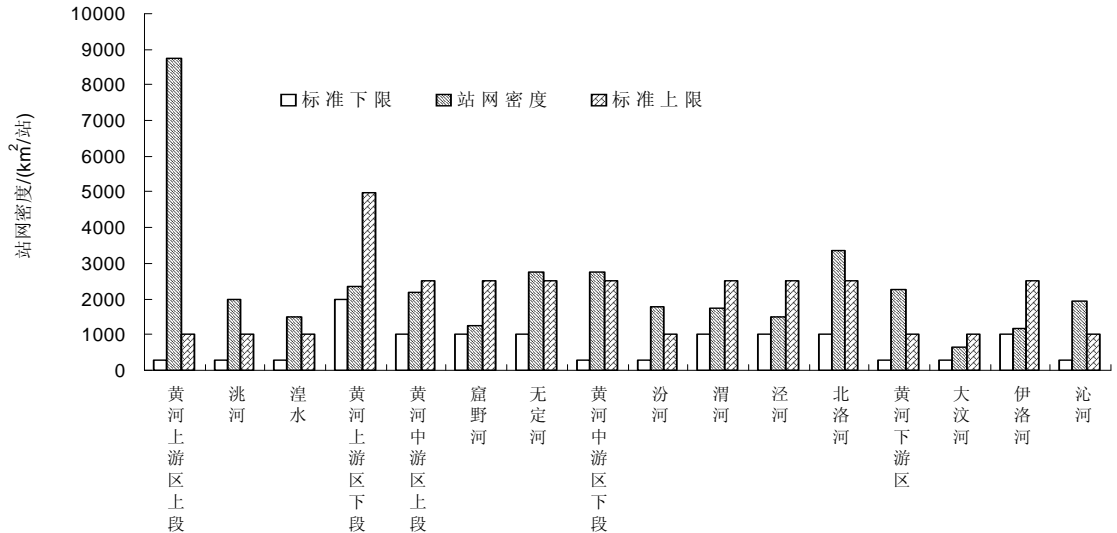


图2 黄河流域不同子流域站网密度对比

Fig.2 The station density at each sub-catchment of the Yellow River Basin
注:标准上、下限参考WMO标准(表1)。

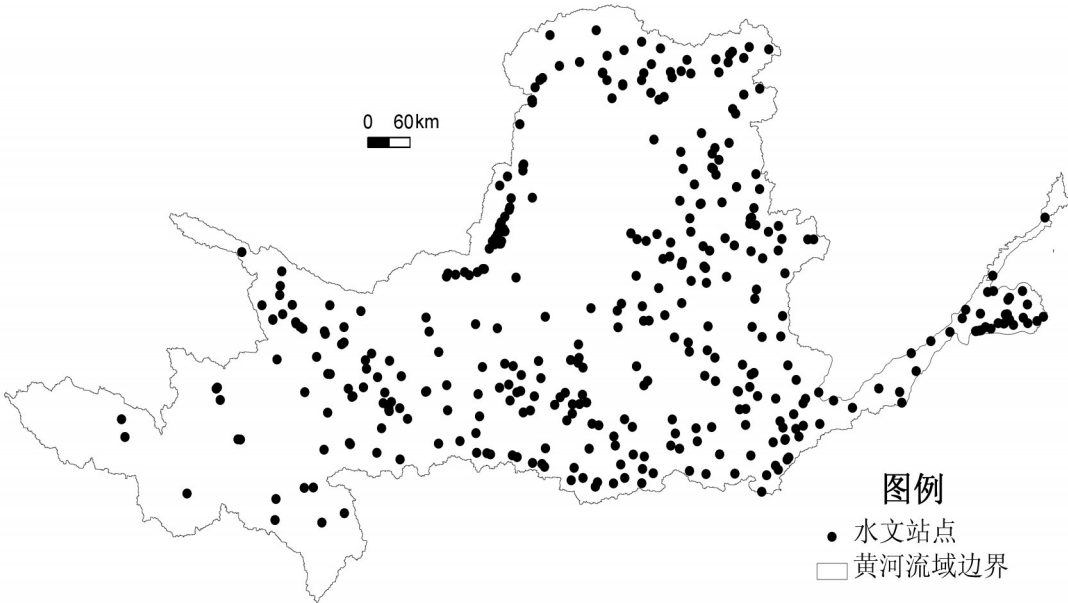


图3 黄河流域水文站点分布比较图

Fig.3 The distributions of hydrological gauges in the Yellow River basin

3 PUB研究方法

沿着巧妇备炊面临无米困境时一般能想到的方法无外乎“借米,替米,种米”的思路,回顾国内外关于PUB的研究,PUB的研究方法可以归纳为一“借”、二“替”、三“种”的方法,也就是移植、比较和生成3种方法。

3.1 “借米”——移植法

移植法算是最古老、最简单、也常容易奏效的办法。当研究地区没有资料而周边某个地区有资料时,如果有资料区的自然地理环境与研究地区相似,直接移用该有资料地区的资料到无资料区。这就叫直接移植法。倘若周边不只一个区域有资料,那么就借用所有这些点的信息,采用插值法得到无资料区资料。这种方法叫内插法,也即间接移植法。内插的方法很多,包括绘制等值线图,用算术平均、几何平均和反距离平方内插等^[9-10]。Micovic等^[11]在对加拿大12个流域进行降雨径流模拟时发现,用平均后的模型参数来进行水文模拟与用率定后的参数来进行模拟的确定性系数相差不大,这从一个侧面展示了平均法在无资料流域的水文预测研究中的作用。

20世纪60年代中国对河流水文动态类型进行了全面的分类^[12]。该分类按照(中小)河川径流年内动态的差异,将中国全部河流分成8个大类,29个类型和38个亚型。随后全国进行了大规模的水

文调查^[13],勾绘了中国年正常径流深等一系列水文特征值的等值线图,各省也相应制定了《水文图集》、《水文手册》和《暴雨洪水查算手册》。这些积累为实际工作中使用移植、内插法对无资料地区进行水文特征值的简单预测提供了极大的方便,在资料短缺的中小流域的设计洪水方面发挥了积极作用。即使到21世纪的今天,水文图集仍然是水文研究不可或缺的研究基础^[14],如全球水系统(GWSP)亚洲区域办公室启动的中国水图研究计划,国家科技进步重大成果之一的中国百万地貌图研究等。移植法的缺点是当被移植的区域与无资料区域之间存在突变点时,移植法可能失效。

3.2 “替米”——比较法

如果无米可借,但有可填饱肚子的其他食物,巧妇也会想法弄来先给家人充充饥。相应地,如果本研究区域或者相似区域没有资料,但有可能“求出”资料的辅助信息,则挖掘这些信息是解决PUB问题的另一类有效途径,包括如下两类。

3.2.1 根据本研究区域其他信息得到本研究区所需资料的方法

这类方法有两种是根据容易获取的各个网格点的大气驱动资料,驱动分布式模型,获得地表各网格的水文特征。目前可用的分布式模型很多,除了国际上许多著名模型之外,中国自主也开发了一系列模型,如水文水资源模拟系统(HydroInformatic Modeling System, HIMS)^[15]和简称为植被界面过

程(Vegetation Interface Processes, VIP)的分布式生态水文动力学模型等^[16]。根据本研究区域其他信息得到本研究区所需资料的方法之二是先量化流域的地表不均匀性,再通过地理信息系统建立水文模型的参数与地表特征的转换函数,从而进行无资料流域的水文预测。为了克服无资料给模型率定造成的困难,常采用同化、融合、挖掘等技术,这也是目前几乎是各门学科的热点话题。Liu 等^[17]采用维也纳理工大学(Technische Universitat Wien, TUW)基于欧洲遥感卫星生成的全球遥感土壤水分数据、VIP生态水文过程模型模拟结果和流域内绥德及榆林站的实测数据相融合的方法,生成了无定河流域各个空间格点1956—2004年的长系列日尺度的土壤水分数据是运用这种方法的一个例子。土壤水分是水文循环的重要环节,对区域干旱预测、生态系统管理和水土资源配置均具有重要意义。然而传统的水文模拟更看重降水和径流,视土壤水分为中间环节,缺乏深入研究。另外,土壤水分的观测资料在全球范围内都非常贫乏,资料积累尤为有限。Liu 等采用的这种比较法,发挥了遥感数据能获得大范围土壤水分的优势,克服了遥感资料年限较短的不足。基于经过实测站点和区域遥感资料双验证的VIP过程模型模拟出的长系列资料,采用“变异系数—变量”双指标法,分析了土壤水分在日、月、年和多年尺度的变化规律,并给出了变化的物理解释。该法研究思路见图4。不仅是从本学科领域挖掘信息,还通过多学科交叉获取无资料信息也是一重要方法。如基于两栖动物多样性与流量变化的流域生态需水量研究^[18](图5)。

3.2.2 根据其他研究区域其他信息得到本研究区所需资料的方法

方法之一是就地外延。也就是对无资料流域进行尺度上延,总能找到一个包括该无资料流域、但却具有水文资料的较大流域。假设流域产流是各子流域的比面积^[19]或者地形指数^[20]为权重的产流贡献的组合,据此可求出无资料流域的产流量。由于壤中流和地下径流更多地取决于路径而不是

面积,此法不适合于地表径流占少数的流域的径流预测。方法之二是对比流域法。它是基于两个相似流域,一个作为控制,一个经过处理,开展(水文)一段时间的对比实验,采用双累计曲线、流量历时曲线、统计回归等技术获取水文过程对某项措施的响应的研究方法,在水文上有大量应用^[21-32]。对比流域法的缺点是无法区分响应是来自大气驱动,还是地表特征的变化。当数据系列不够长时,所得出的数据统计意义上可能不可靠^[30]。上述方法的思想实质是比较水文学思想^[33](图6),该法无论是在

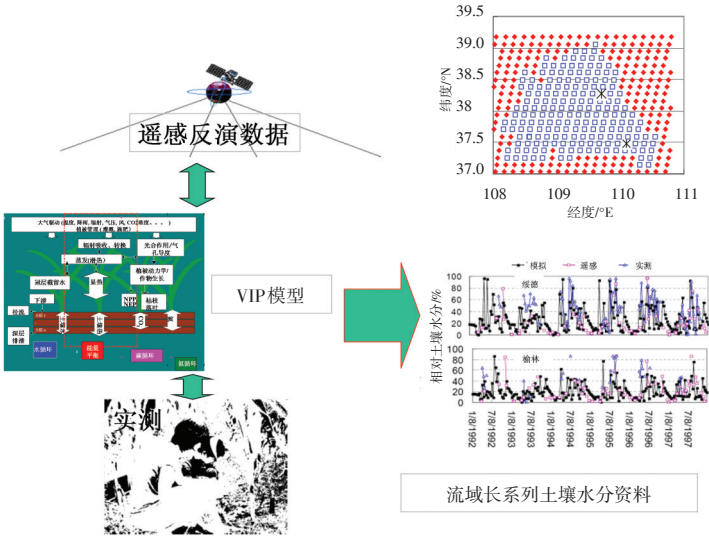


图4 PUB 比较法研究思路举例(一)
Fig.4 The Research flowchart of PUB by using the ideas of comparative hydrology: Example (I)

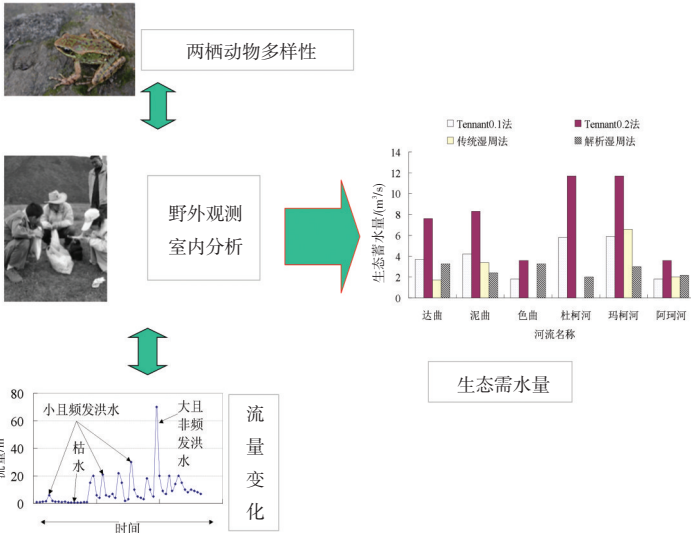


图5 PUB 比较法研究思路举例(二)

Fig.5 The Research flowchart of PUB by using the ideas of comparative hydrology: Example (II)

PUB 计划启动以前^[34],还是在当前的 PUB 研究中,都有重要应用^[35-36]。

3.3 “种米”——生成方法

生成方法,言外之意就是没有条件,那就就地开荒“种米”,通过获取第一手资料开展水文预测。包括野外实验和室内实验。20 世纪 50 年代,中国科学院地理所与铁道部科学研究院及铁道部的设计院及其研究所合作,进行了大量的野外和室内实验,从降雨径流的成因出发,分析降雨径流的形成过程,通过野外实验确定不同土地利用与覆盖的降雨损失和产流条件,采用模型试验对山坡与河道汇流过程的不同条件进行模拟测试,建立了小流域洪峰流量的新模型,该模型的所有参数均有明确的物理意义,其研发成果被中国 8 条铁路新线的小桥涵设计所应用,并获得 1978 年全国科学大会重大成果奖^[37-38]。此工作的思路正应用于目前国家自然科学基金委支持的稀缺资料小流域的径流预测和估算(图 7)。

3.4 讨论

纵观已有的 PUB 研究方法,3 类方法各有功能,针对不同的命题。第二类是目前研究热点。然而第一类和第三类方法也不应被忽视。在人类不容易到达的偏远原始地区,资料积累条件非常差,第一类方法可能是最佳之举。而在平原交通发达的地方,应该大力提倡第三类方法的积累。

4 展望

PUB 10 年计划已经转入后期。不容置疑,为在下一阶段更加有力地推动 PUB 研究,还需持续进行 PUB 研究。

(1) 应该加强 PUB 的方法理论研究。已有的 PUB 方法比较成熟,但多在技术层面。挖掘、弘扬和继承与 PUB 密切相关的区域水文、比较水文学的研究积累,联合 PUB 研究各方力量,加强 PUB 方法的理论探索,特别是开展水文过程的室内室外实验研究与普适模型的研制,是 PUB 研究当务之急。

(2) 应致力于 PUB 方法的

创新。如前面的分析,目前所用的方法还在巧妇面临无米之炊时所能想到的方法的框架之中。

(3) 目前的研究,理论研究多,应用尚显薄弱。今后的 PUB 研究应该特别抓住 PUB 特有的与生产部门密切相连的本质和 PUB 的成果本身对水文预测的实际应用、和有利于对国家财产的保护的重大意义,积极酝酿“产—学—研”的重大成果。广大稀缺资料小流域的径流预测和估算(简称预估)对各地交通(铁路与公路及通讯跨河工程)、输电塔,化工等工矿场/厂址的防洪与供水的确定、设计以及应对如地震导致的山洪有重要意义。根据我们的初步统计,山丘区的铁路与公路平均每 1 km 的跨水建筑就有 7 处,100 km 多达 700 余处,设计的建筑费用上千元计,工程造价以亿元计。仅此一例足以说明,PUB 研究的巨大意义和价值。目前作为新能源补充的小水电的设计也在很大程度依赖于 PUB 的

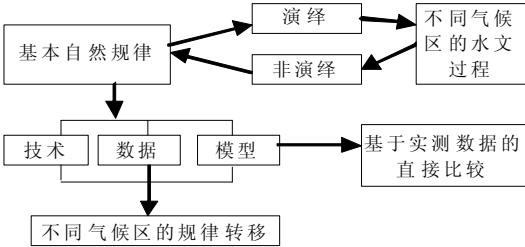


图6 比较水文学的基本思想(改自刘昌明,1987)
Fig.6 The essential frame of comparative hydrology

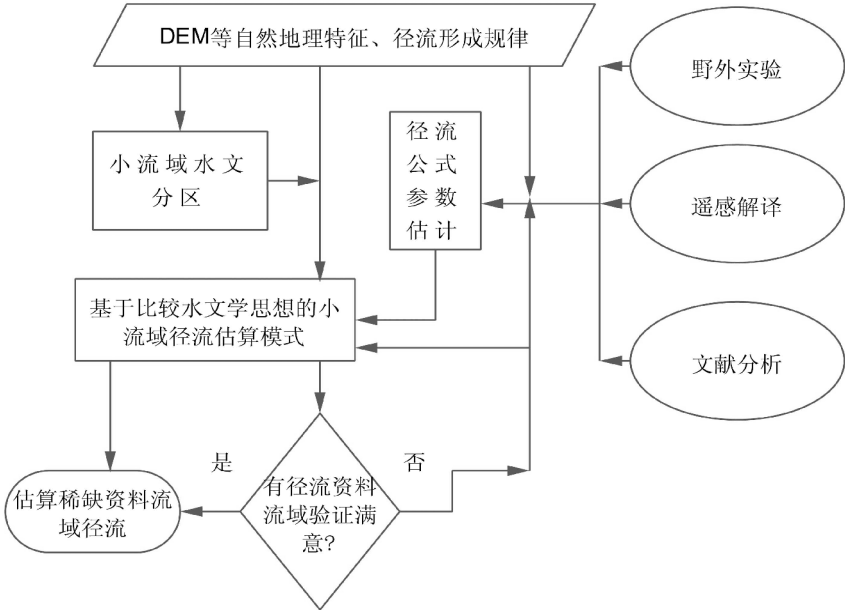


图7 稀缺资料小流域的径流预报和估算的研究思路
Fig.7 The flowchart of runoff prediction and estimation for data scarce basins

研究成果,因为这些小水电常位于无资料区。在防灾减灾中,山溪骤发洪水的预测是难点,PUB研究责无旁贷地担当提供决策支持的科学依据的重任。

(4) 中国的PUB既有过去工作的积累,又有地域丰富的特色。应该大力开展中国PUB,产出一系列具有中国特色的PUB国际精品。

致谢:博士生舒畅帮助绘制图3。硕士生邢博帮助校对参考文献。

参考文献

- [1] 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. *Hydrological Sciences Journal*, 2003, 48(6): 857-880.
- [2] 刘苏峡, 夏军, 莫兴国. 无资料流域水文预报(PUB计划)研究进展. *水利水电技术*, 2005, 36(2): 9-12.
- [3] Yang D W, Tian F Q, Tang L H, et al. Hydrological research in China: Process studies, modelling approaches and applications. *Proceedings of IAHS-PUB meeting held at Beijing (China), October 2006, IAHS Publ. 322 (2008) ISBN 978-1-901502-64-0, 262+x pp*
- [4] Xu W L, Ao T Q, Zhang X H.. *Hydrological Modelling and Integrated Water Resources Management in Ungauged Mountainous Watersheds. Proceedings of IAHS-PUB meeting held at Chengdu (China), November 2008. IAHS Publ.335, 2009, ISBN978-1-907161-07-0, 310+x pp.*
- [5] 庄一鸽, 林三益. *水文预报*. 北京: 水利电力出版社, 1981.
- [6] 刘昌明. 自然地理界面过程及水文界面分析. 中国科学院地理研究所编, *自然地理综合研究: 黄秉维学术思想探讨*, 北京: 气象出版社, 1993: 19-28.
- [7] 刘苏峡. 世纪之交的水文研究. *水科学进展*, 2001, 12(1): 113-117.
- [8] Liu S, Liu C, Xia J. *Environmental flow in China. GWSP Newsletter*, 2008, 7: 9-11.
- [9] 杨家坦. 无资料地区小流域设计径流若干技术问题. *福建水土保持*, 1999, 11(1): 39-44.
- [10] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国陆地区域气象要素的空间插值. *地理学报*, 2002, 57(1): 047-056.
- [11] Micovic Z, Quick M C. A rainfall and snowmelt runoff-modelling approach to flow estimation at ungauged sites in British Columbia. *Journal of Hydrology*, 1999, 226(122): 101-120.
- [12] 郭敬辉, 汤奇成. 关于中国河川径流动态类型及其分区的初步研究. *地理集刊*, 1980(12).
- [13] 刘昌明. 中国水量平衡与水资源储量的分析//中国地理学会第三次全国水文学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1986.
- [14] 刘昌明, 曾燕, 邱新法. *黄河流域气象水文学要素图集*. 郑州: 黄河水利出版社, 2004.
- [15] 刘昌明, 王中根, 郑红星, 等. HIMS 系统及其定制模型的开发与应用. *中国科学: E 辑*, 2008, 38(3): 350-360.
- [16] Mo X, Liu S, Lin Z, et al. Regional crop yield, water consumption and water use efficiency and their responses to climate change in the North China Plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 134(1-2): 67-78.
- [17] Liu S, Mo X, Zhao W, et al. Temporal variation of soil moisture over the Wuding River Basin assessed with an eco-hydrological model, in-situ observations and remote sensing. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13: 1375-1398.
- [18] Liu S, Liu C, Xia J, et al. *Environmental flow in China. GWSP Newsletter*, 2008, 7: 9-11.
- [19] Jarvie H P, Neal C, Williams R J, et al. Phosphorus sources, speciation and dynamics in the lowland eutrophic River Kennet, UK. *The Science of The Total Environment*, 2002, 282-283: 175-203.
- [20] Schreider S Y, Jakeman A J, Gallant J, et al. Prediction of monthly discharge in ungauged catchments under agricultural land use in the Upper Ping basin, Northern Thailand. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, 59(1-3): 19-33.
- [21] Langford K J. Change in field of water following a bushfire in a forest of eucalyptus regnans. *Journal of Hydrology*, 1976, 29(1-2): 87-114.
- [22] Helvey J D. Effects of a north-central Washington wildfire on runoff and sediment production. *Water Res Bull*, 1980, 16(4): 627-634.
- [23] Homes J W, Wronski E B. On the water harvest from afforested catchments. 1st National Symp. on Forest Hydrology. National Conference Publication, Institute of Engineers, Australia, 1982: 1-6.
- [24] Kuczera G. Prediction of water yield reductions following a bush fire in ash-mixed species eucalyptus forest. *Journal of Hydrology*, 1987, 94(3-4): 215-236.
- [25] Cornish P M, Vertessy R A. Forest age-induced changes in evapotranspiration and water yield in a eucalyptus forest. *Journal of Hydrology*, 2001, 242(1-2): 43-63.
- [26] Loaiciga H A, Pedreros D, Roberts D. Wildfire-streamflow interactions in a chaparral watershed. *Advances in Environmental Research*, 2001, 5(3): 295-305.
- [27] Roberts S, Vertessy R, Grayson R. Transpiration from Eucalyptus sieberi (L. Johnson) forests of different age. *Forest Ecology and Management*, 2001, 143(1-3):

- 153-161.
- [28] Townsend S A, Douglas M M.. The effect of three fire regimes on stream water quality, water yield and export coefficients in a tropical savanna (Northern Australia). *Journal of Hydrology*, 2000, 229(3-4): 118-137.
- [29] Watson F, Vertessy R, McMahon T, et al. Improved methods to assess water yield changes from paired-catchment studies: application to the Marinade catchments. *Forest Ecology and Management*, 2001, 143: 189-204.
- [30] Liu S, Leslie L M, Speer M, et al. The effects of bushfires on hydrological processes using a paired-catchment analysis. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2004, 86 (1-2): 31-44.
- [31] Brown A E, Zhang L, McMahon T A, et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 2005, 310(1-4): 28-61.
- [32] Larssen T, Holme J. Afforestation, seasalt episodes and acidification: A paired catchment study in western Norway. *Environmental Pollution*, 2006, 139(3): 440-450.
- [33] 刘昌明. 关于比较水文学的研究. *地理学报*, 1987, 42 (2): 181-184.
- [34] Woo M K, Liu C M. Mountain hydrology of Canada and China: A case study in comparative hydrology. *Hydrological Processes*, 1994, 8(6): 573-587.
- [35] McDonnell J J, Woods R. Editorial: On the need for catchment classification. *Journal of Hydrology*, 2004, 299 (1-2): 2-3.
- [36] Blöschl G, Merz R. Thoughts on a process-based catchment classification. *Geophysical Research Abstracts*, 2008, 10, EGU. 2008-A-08153.
- [37] 小流域暴雨径流研究组(刘昌明等执笔). 小流域暴雨洪峰流量计算. 北京: 科学出版社, 1978.
- [38] Liu C M, Wang G T. The estimation of small-watershed peak flows, China. *Water Resources Research*, 1980, 16 (5): 881-886.

Towards the Methodology for Predictions in Ungauged Basins

LIU Suxia¹, LIU Changming¹, ZHAO Weimin²

(1. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes,

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. The Bureau of Hydrology, Yellow River Conservancy Committee, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: Based on the research results in the field of predictions in ungauged basins (PUB) available from the literatures and our own research experiences in PUB, the methodology of PUB is generalized to include "borrowing", "replacing" and "creating" methods, according to the logic of a Chinese saying: "even a clever housewife can not cook a meal without rice". Borrowing method is defined as the method to get the data by transplanting the data from a similar region or doing interpolation among the data from the neiboughood area. Replacing method is defined as the method to mine the target data from the related information either from the same research area by simulation, assimilation and interdisciplinary studying or from other areas by upscaling and paired-catchment analysis, all with similar geographic characteristics. Creating method is defined as the method to get the data via field or indoor observation. By combining the above research methods available so far, some clues for breaking through the barriers of PUB research to find the right solutions are proposed.

Key words: hydrological predictions; data; PUB; methodology; watershed

本文引用格式:

刘苏峡, 刘昌明, 赵卫民. 无测站流域水文预测(PUB)的研究方法. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1333-1339.