

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.02.001

半湿润半干旱流域降雨径流关系及下垫面相似性

李巧玲,李致家,陈利者,姚 成

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:以半湿润半干旱地区的 5 个流域为研究对象,建立并综合各流域降雨径流相关图,发现其中 3 个地理位置相距较远的流域可以采用一个共同的降雨径流关系图描述,误差在许可范围内且精度等级在乙级以上。采用相似性指标、相对均方根误差和地形指数分布曲线综合定量评价流域的下垫面条件,发现这 3 个流域的下垫面条件较为相似。结果表明,下垫面条件较为相似的流域,尽管地理位置相距较远,仍可以用一个共同的降雨径流相关图描述;相对均方根误差和地形指数分布曲线更适用于评价半湿润半干旱流域下垫面条件的相似性。

关键词:半湿润半干旱流域;降雨径流相关图;下垫面条件相似性;相似性指标;相对均方根误差;地形指数;区域规律

中图分类号:P339 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2015)02-0095-05

Research on rainfall-runoff relationship and similarity of underlying surface in semi-humid and semi-arid basins

LI Qiaoling, LI Zhijia, CHEN Lizhe, YAO Cheng

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

Abstract: Rainfall-runoff relationships were developed and comprehensively assessed for five basins located in semi-humid and semi-arid areas. It was shown that a common rainfall-runoff relationship can represent that of three basins far away from one another. The error was allowable and the accuracy was high. Three evaluation metrics, including the similarity index, the relative root mean square error, and the topography index, were employed to quantitatively assess the similarity of the underlying surface in selected basins. Results show that a common rainfall-runoff relationship can describe different basins with similar underlying surface conditions, even though they are far from one another. It was concluded that the relative root mean square error and the distribution curve of the topography index are more suitable for assessing the similarity of the underlying surface in semi-humid and semi-arid basins.

Key words: semi-humid and semi-arid basin; rainfall-runoff correlation diagram; similarity of underlying surface conditions; similarity index; relative root mean square error; topography index; regional law

半湿润半干旱流域约占我国国土面积的 1/3 以上,与湿润流域相比,半湿润半干旱流域降雨时空分布不均,地形、植被等下垫面复杂性对径流的影响更大,洪水破坏性也更大^[1-2]。如何建立适当的降雨径流关系对半湿润半干旱流域进行径流预报是水文学者面临的重大问题^[3]。目前,在有实测水文资料的流域,降雨径流相关图与降雨径流模型是国内普遍采用的方法。

1949 年,Kohler 等在美国地球物理学会第三十届年会上提交了根据实测降雨和径流资料分析制作的世界上第 1 幅降雨径流相关图^[4]。20 世纪 60 年代,降雨径流相关图作为一种产流量计算方法在中国已得到

收稿日期: 2014-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(41201028,41130639,41101017,51179045)

作者简介: 李巧玲(1982—),女,河南许昌人,讲师,博士,主要从事流域水文模拟及预报、流域水文过程对气候变化的响应研究。E-mail: liqiaolinghhu@hhu.edu.cn

普遍应用^[5]。赵人俊等^[6]通过分析实测水文资料,得到湖南省与浙江省的山丘流域降雨径流相关图,由于2个地区的自然地理条件相似,因此两者的降雨径流关系基本一致。李致家等^[7]通过对不同自然地理条件下的15个流域进行降雨径流相关关系分析,发现嵌套流域的相关关系适用于相应嵌套流域内的任何子流域,但未对下垫面条件做定量分析。

笔者采用降雨径流相关图,分析半湿润半干旱地区5个流域的降雨径流关系,论述并定量分析流域下垫面条件的相似性,探讨降雨径流关系的区域规律,期望能为半湿润半干旱流域以及无资料地区径流预报提供借鉴和参考作用。

1 流域概况和数据资料

选择位于半湿润半干旱地区的紫荆关、张家口、大阁、戴营、下会5个流域作为研究对象。紫荆关流域植被较差,仅局部地区有小块成林,上游石门以上为涞源盆地,石门至紫荆关之间为开阔谷地。张家口流域内主要有东沟、正沟、西沟3条支流,东沟植被最好,正沟植被较差,西沟最差;河道纵坡0.954%。大阁流域、戴营流域、下会流域为嵌套流域,流域基本属于土石山区,一般土层较薄,植被较好;暴雨分布以密云水库为中心,分别沿潮白河向东北和西北方向渐减;河道比降较大。流域选取的主要依据是流域地理位置相距较远,地理环境及人类活动强度不同,有可利用的较长历史数据资料。实测次洪水降雨与径流资料时期及流域特征见表1。

采用的数据包括水文气象数据、数字高程数据(DEM)和土地覆盖数据。水文气象数据包括时段长分别为日和小时的降雨与径流数据资料。数字高程数据来自中国科学院国际科学数据镜像网站(<http://datamirror.csdb.cn>),由SRTM3 V4.1数据加工而来。

2 研究方法

2.1 降雨径流相关图法

降雨径流相关图是在成因分析统计相关的基础上,用每次洪水的流域平均降雨量和相应产生的径流总量以及影响降雨径流关系的主要因素所建立起来的一种定量相关图^[8]。制作降雨径流相关图的关键是合理选取降雨时段、分割径流以及正确计算前期影响雨量 P_a 等。笔者先采用递推公式计算单站前期影响雨量,然后采用泰森多边形法^[9]求得流域平均前期影响雨量;采用泰森多边形法计算流域平均降雨量;采用蓄泄关系法^[10]计算次洪径流深。假设蓄泄关系为线性,则次洪径流深为

$$R = \frac{3.6\Delta t \left[\sum_{i=2}^{n-1} Q_i + \frac{Q_1 + Q_n}{2} + (Q_n - Q_1)K \right]}{A}$$

(1)

式中: Δt ——时段长,h; Q_i ——第*i*时段流量, m^3/s ; n ——时段数; A ——流域面积, km^2 ; K ——蓄泄系数,由流域退水曲线求得。

根据5个流域的实测日降雨量、时段降雨量和时段流量资料分别计算次洪前期影响雨量、降雨量以及径流深,制作降雨径流相关图并进行精度评定^[11]。采用径流深的相对误差与合格率(以径流深绝对误差和许可误差评定合格率)作为评定指标。确定每个流域的降雨径流相关图后,对所有流域进行综合分析,将所有场次洪水(共*m*场)数据($(P+P_a)_j, R_j$)(P 为流域平均降雨量; j 为洪水场次, $j=1, \cdots, m$)点绘到一张图上,分析降雨径流的区域规律。

2.2 下垫面条件相似性分析

地形、土地覆盖类型以及土壤类型等下垫面条件将影响蒸发、下渗等水文过程,进而影响产流。下垫面条件的相似性采用相似性指标、相对均方根误差(R')、地形指数3个指标衡量。

2.2.1 相似性指标

相似性指标^[12]描述了2个对比流域的相似程度,取值范围为0~1,值越大,流域越相似,其计算公式为

$$S = 1 - \sum_{i=1}^N \alpha_k \frac{\Delta V_k}{\max(\Delta V_k, \bar{V}_k)} \tag{2}$$

式中: N ——用来计算相似性指标的流域特性个数; α_k ——权重系数,取值范围为0~1(本文所有流域特性取相同权重); $V_k, \Delta V_k, \bar{V}_k$ ——流域特性的值、2个对比流域特性的绝对差值和平均值。本文仅选用平均高程和平均坡度计算流域地形相似性程度。

2.2.2 相对均方根误差

S 可以考虑平均坡度对产流的影响, R' 则可以考虑坡度的分布对产流的影响, R' 的计算公式为

$$R' = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{l=1}^M (S_l - S'_l)^2}}{\bar{S}} \tag{3}$$

式中: M ——坡度的最大值; S_l ——流域内坡度为 l 的面积所占比例, l 取值范围为1~ M ; S'_l ——另一流域相应的坡度为 l 的面积所占的比例; $\bar{S}$ ——第1个流域的各坡度面积所占比例的平均值。依此计算每个流域与其他4个流域的 R' ,值越小,2个流域的坡度分布越相似。

2.2.3 地形指数

地形指数反映土壤缺水量与产流过程的空间分布^[13],数学表达式为 $\ln(\alpha/\tan\beta)$,其中, α 为单宽集水面积, $\tan\beta$ 为局部地表坡度。地形指数描述了径流在流域内任意一点的累积趋势以及在重力作用下顺坡移动的趋势^[14],流域内地形指数相同的点可以认为具有相同的降雨径流响应^[15]。基于DEM数据提取各流域地形指数分布曲线,地形指数分布曲线相似的流域,可以认为在降雨发生后具有相似的产流过程。

3 结果与分析

3.1 降雨径流相关图的制作与精度评定

3.1.1 各流域降雨径流相关图

以径流深相对误差与合格率为误差指标的精度评定结果见表2(综合前)。以 R 为横坐标, $P+P_a$ 为纵坐标,根据点群分布,采用人工与计算机交互配线法制作的各流域降雨径流相关图如图1所示。从图1可以看出,当 $P+P_a$ 小于一定值时,相关图为凹向横坐标一方的曲线;当 $P+P_a$ 大于这一一定值时,相关图为与横坐标成一定角度的斜线,该角度大于45°,主要是因为半湿润半干旱流域土壤缺水量较大,降雨量少且空间分布不均,局部产流的情况较多,全流域全面产流的情况较难发生。

表2 各流域精度评定结果

Table 2 Accuracy assessment of integrated rainfall-runoff correlation diagram for selected basins %

流域	综合前		综合后	
	相对误差	合格率	相对误差	合格率
紫荆关	-8	71	-5	83
张家口	8	85	88	85
大 阁	9	95	12	93
戴 营	8	90	19	78
下 会	11	85	39	81

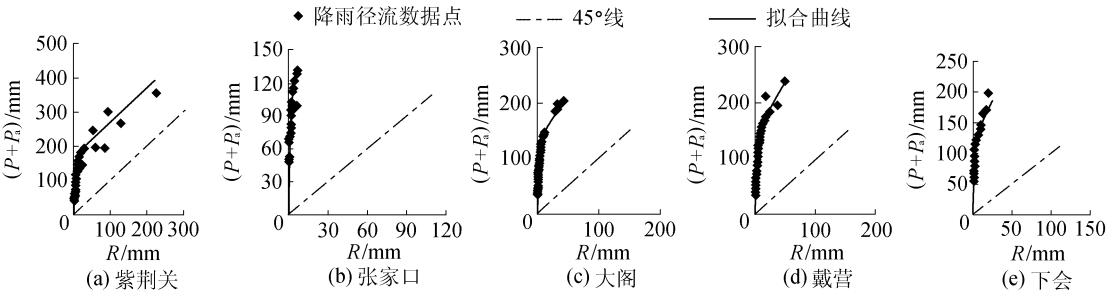


图1 各流域降雨径流相关图

Fig. 1 Rainfall-runoff correlation diagram for selected basins

3.1.2 流域综合降雨径流相关图

将5个流域所有场次洪水的数据点点绘在直角坐标系中,根据点群分布采用人工与计算机交互配线法制作的流域综合降雨径流相关图如图2所示,精度评定结果见表2(综合后)。结果显示,紫荆关、大阁和戴营流域均在许可误差范围内^[11],且精度等级在乙级以上,表明这3个流域可以用一条降雨径流关系线来综合描述。降雨发生后,流域出口断面流量过程主要与下垫面条件有关,可以推测流域的下垫面条件具有较高相似性。

3.2 流域下垫面条件分析

基于流域平均高程和平均坡度计算的相似性指标值*S*列于表3。可以看出,紫荆关、大阁和戴营流域之间的*S*值均大于0.8,即这3个流域之间在平均坡度和平均高程等下垫面特征方面具有较高的相似性。值得注意的是,一些流域(比如张家口与大阁,戴营与下会)之间虽然*S*值较大,但不能用一条共同的降雨径流关系线来描述。分析其原因,可以概括为2个方面:(a)影响降雨径流关系的主要因素不同。本文仅选用平均坡度和平均高程(且赋予相同权重)计算*S*,可能未涵盖所有影响流域降雨径流关系的主要因素。而且由于半湿润半干旱地区的下垫面条件空间异质性较大,采用平均值可能难以反映下垫面条件对降雨径流关系的影响。(b)降雨径流相关图制作的问题。数据点如果不充分,就难以反映不同雨型、雨量和下垫面条件对径流形成的综合影响。

流域坡度分布的相似度以*R'*形式列于表4,流域间*R'*最小值以粗体表示。大阁、戴营和下会这3个嵌套流域间的误差值最小,紫荆关与这3个嵌套流域间的误差值也较小。说明这3个嵌套流域自身坡度分布最为相似,与紫荆关流域的坡度分布也较为相似。坡度分布较为相似的紫荆关、大阁和戴营流域可以用一条降雨径流关系线综合描述,表明坡度分布是影响降雨径流关系的一个重要因素。

基于DEM数据提取计算的各流域地形指数分布曲线如图3所示。可以看出,张家口流域与其他4个流域的地形指数分布曲线都差别较大;紫荆关、大阁、戴营和下会流域的地形指数分布曲线很相似。结合降雨径流相关图成果,可以发现,地形指数分布曲线相似的紫荆关、大阁和戴营流域可以用一条降雨径流关系线来描述,表明这些流域在降雨径流过程上具有较大的相似性。

表4 流域坡度分布相对均方根误差计算结果

Table 4 Results of relative root mean square error based on slope distribution

流域	<i>R'</i>				
	紫荆关	张家口	大阁	戴营	下会
紫荆关	1.00	0.37	0.21	0.21	0.21
张家口	0.37	1.00	0.31	0.31	0.31
大 阁	0.21	0.31	1.00	0.00	0.00
戴 营	0.21	0.31	0.00	1.00	0.00
下 会	0.21	0.31	0.00		1.00

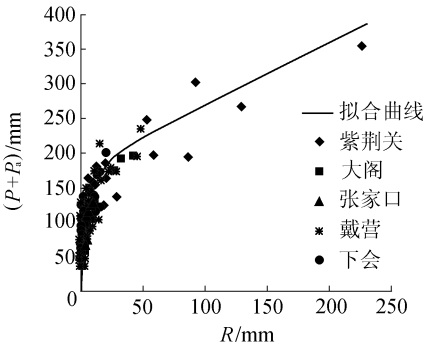


图2 流域综合降雨径流相关图

Fig. 2 Integrated rainfall-runoff correlation diagram for selected basins

表3 流域相似性指标

Table 3 Similarity index of selected basins

流域	<i>S</i>				
	紫荆关	张家口	大阁	戴营	下会
紫荆关	1.00	0.85	0.98	0.87	0.84
张家口	0.85	1.00	0.85	0.75	0.72
大 阁	0.98	0.85	1.00	0.85	0.82
戴 营	0.87	0.75	0.85	1.00	0.97
下 会	0.84	0.72	0.82	0.97	1.00

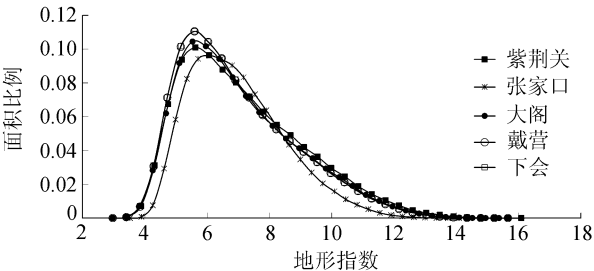


图3 地形指数分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of topography index

4 结 语

结合流域下垫面条件,探讨半湿润半干旱地区降雨径流关系的影响因素及区域规律。鉴于半湿润半干旱地区的下垫面条件空间异质性较大,采用平均值可能难以反映下垫面条件对降雨径流关系的影响。相似性指标*S*值不足以反映影响降雨径流关系的因素,因此进一步选用*R'*、地形指数分布曲线等描述下垫面空间分布的指标进行比较。结论如下:

a. 各流域的降雨径流相关图与横坐标成大于 45° 角的斜线,主要是因为全流域产流的情况在半湿润半干旱流域较难发生。通过综合5个流域的降雨径流相关图,发现紫荆关、大阁和戴营这3个流域可以采用一条共同的降雨径流关系线描述。

b. 采用 S 、 R' 和地形指数综合定量分析下垫面条件,发现紫荆关、大阁和戴营这3个流域的下垫面条件较为相似,因此尽管地理位置相距较远,仍可以用一条共同的降雨径流关系线描述。 R' 和地形指数分布曲线可以考虑下垫面的空间分布对降雨径流关系的影响,更适用于评价半湿润半干旱流域下垫面条件的相似性及其对降雨径流关系的影响。

c. 半湿润半干旱地区各种水文要素的空间变异较大,影响其流域降雨径流关系的主要因素也较复杂。在以后的研究中,需要考虑更多的下垫面因素、气候因素等的影响,建立这些因素与产流参数之间的关系,寻找影响半湿润半干旱流域降雨径流关系的主要因素,探索其区域规律,为半湿润半干旱流域以及无资料地区的径流预报提供科学支撑。此外,变化环境对降雨径流关系及其主要影响因素的作用不可忽视,在后续研究中需要进一步考虑。

参考文献:

- [1] CASTILLO V M, GO'MEZ-PIAZA A, MARTI'NEZ-MENA M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 284: 114-130.
- [2] 李致家,黄鹏年,姚成,等. 灵活架构水文模型在不同产流区的应用[J]. *水科学进展*, 2014, 25(1): 28-35. (LI Zhijia, HUANG Pengnian, YAO Cheng, et al. Application of flexible-structure hydrological models in different runoff generation regions [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(1): 28-35. (in Chinese))
- [3] RUI Xiaofang, LIU Ningning, LI Qiaoling, et al. Present and future of hydrology[J]. *Water Science and Engineering*, 2013, 6(3): 241-249.
- [4] KOHLER M A, LINSLEY R K. Predicting the runoff from storm rainfall[C] // RZICHELDERFER F W. National oceanic and atmospheric administration weather bureau research papers. Washington D C: U. S. Weather Bureau, 1951: 34.
- [5] 芮孝芳. 产流模式的发现与发展[J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33(1): 1-6. (RUI Xiaofang. The discovery and development of runoff formation models[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33(1): 1-6. (in Chinese))
- [6] 赵人俊,庄一翎. 降雨径流关系的区域规律[J]. *华东水利学院学报:水文分册*, 1963, 7(增刊2): 53-68. (ZHAO Renjun, ZHUANG Yiling. Regionalization of rainfall-runoff relationship [J]. *Journla of East China Technical University of Water Resources: Hydrology Fascicle*, 1963, 7(Sup2): 53-68. (in Chinese))
- [7] 李致家,于莎莎,李巧玲,等. 降雨-径流关系的区域规律[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2012, 40(6): 598-603. (LI Zhijia, YU Shasha, LI Qiaoling, et al. Regional pattern of rainfall-runoff relationship[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, 40(6): 598-603. (in Chinese))
- [8] 中华人民共和国水利部水文局,长江水利委员会水文局. 水文情报预报技术手册[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010: 313-320.
- [9] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:高等教育出版社, 2013: 58-61.
- [10] 包为民. 水文预报 [M]. 4版. 北京:中国水利水电出版社, 2009: 27-29.
- [11] GB/T 22482—2008 水文情报预报规范[S].
- [12] MASI H I, UHLENBROOK S, MASKEY S, et al. Regionalization of a conceptual rainfall-runoff model based on similarity of the flow duration curve: a case study from the semi-arid Karkheh Basin, Iran[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391: 188-201.
- [13] BEVEN K, KIRKBY M. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1): 43-69.
- [14] QUINN P, BEVEN K, LAMB R. The $\ln(\alpha/\tan\beta)$ index: how to calculate it and how to use it in the TOPMODEL framework[J]. *Hydrological Processes*, 1994, 9: 161-185.
- [15] 姚成,章玉霞,李致家,等. 无资料地区水文模拟及相似性分析[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2013, 41(2): 108-113. (YAO Cheng, ZHANG Yuxia, LI Zhijia, et al. Hydrological simulations and similarities in ungauged basins[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2013, 41(2): 108-113. (in Chinese))