

变动流域滞时方程*

靳 长 兴

(中国科学院 地理研究所)
国家计划委员会

提 要: 流域滞时是流域汇流计算和预报中的一个重要因素。本文尝试将流域滞时表示成流域重心长度 L_{ca} (流域重心到流域出口断面的河道长度)与汇流速度 v 之比的函数,从而使流域滞时随汇流速度的不同而不同,而不再是一个常数。长度 L_{ca} 反映了流域尺度和几何形态对滞时的影响,而汇流速度则反映流域动力条件对滞时的作用。5个小流域的实测资料检验表明结果较为满意。

主题词: 流域滞时 重心长度 汇流速度

流域滞时,定义为净雨过程的重心到流域出口流量过程线的重心之时间距。这是确定流域单位线和洪峰流量的一个重要因素。众多的研究已经建立了滞时与流域特征参数间的关系。一个常用的滞时方程是将滞时表示成干流长度与干流比降平方根之比的函数,如 Watt and Chow^[1]在全面分析了众多的关于滞时的经验公式后综合出小流域滞时的一般式:

$$t_L = 0.000326 (L/\sqrt{S})^{0.79} \quad (1)$$

式中, t_L 为流域滞时,以hr.计; L 为干流长度,以km计; S 为干流比降,以m/m计。

流域面积越大,干流长度越大,水流在流域上的滞留时间就越长。因此,干流长度反映了流域尺度对滞时的影响。流域坡度越陡,干流比降越大,其汇流速度越大,则水流在流域上的滞留时间就越短。因此,干流比降在一定程度上反映了汇流速度对滞时的作用。

众所周知,同一流域上暴雨量及其时空分布的不同将导致滞时的不同,而由(1)式一类的经验公式所确定的滞时总是一个常数,即在一个流域只有一个滞时,它与雨洪的大小无关。这显然与实际情况不符。为此,本文提出如下的既考虑地貌特征,又考虑动力条件的流域滞时关系式:

$$t_L = C L_{ca} / v \quad (2)$$

式中, C 为系数, L_{ca} 为重心长度, v 为汇流速度。

不同的雨洪径流条件下的汇流速度是不同的,即使在同一次雨洪过程中其汇流速度 v 也是一个变量。但是,已有研究表明^[2,3],这种变化并不大,可由一个特征流速来表征。这一特征流速可取用流域断面处洪峰流量相应的平均流速。

(2)式中以重心长度 L_{ca} 而不是以干流长度 L 来表征流域尺度和形态是基于以下两个原因:(1) L_{ca} 与 L 一般相关较好^[4],但 L_{ca} 能反映特殊流域形态的影响;(2) L_{ca} 的定

本文1991年3月24日收到,10月25日收到修改稿。

*作者非常感谢导师 J.E.Nash 教授(University College Galway, Ireland)、沈晋教授(陕西机械学院水电学院)对本文的指导及建议。

义与滞时的定义更为一致。

在以下的应用中, L_{ca} 的单位为 km, v 为 m/s, t_L 为 hr., C 无量纲。单位换算系数为 1000/3600。

一、流 域

本文所用的小流域为 5 个, 1 个爱尔兰流域 (Nenagh), 4 个中国浙江省小流域¹⁾ (洪家塔、牛头山、江家和扬桥头)。

Nenagh 流域位于爱尔兰中部, 面积为 295 km², 重心长度 18.5 km。流域内设 4 个日雨量站和一个自记雨量站。选用 1958—1960 年间 22 场单峰降雨径流资料进行分析, 其净雨与相应的 3 hr. 时段径流量由 T. Bree 博士整理^[5]。流速由洪峰流量除以相应的出口断面面积求得。

洪家塔流域面积为 159 km², 重心长度由 Gray 经验公式^[4] $L_{ca} = 0.74A^{0.55}$ 估算为 12.6 km (以下流域相同)。选 1960—1975 年间 8 场雨洪资料, 其峰值在 198.0—1190.0 m³/s 之间。时段长度为 1 hr., 最大时段净雨为 14.6—36.7 mm。洪峰对应流速为 1.84—3.50 m/s。以直线法切割基流 (以下流域相同), 直线的终点在消退肢的最大曲率处。

牛头山流域面积为 252 km², 重心长度为 16.5 km。选 1975—1980 年间 9 场雨洪资料, 其峰值在 273.0—1210.0 m³/s 之间。时段长度取为 1 hr.。最大时段净雨为 7.0—45.4 mm。实测洪峰对应流速为 1.48—1.98 m/s。

江家流域面积为 64 km², 重心到出口距离为 7.4 km。1963—1974 年间 11 场雨洪资料, 其峰值为 41.7—219.0 m³/s。最大 1 hr. 时段净雨为 7.6—33.0 mm。实测峰值对应流速为 2.1—2.8 m/s。

扬桥头流域面积为 91.4 km², 重心长度为 9.1 km。选 1965—1977 年间 9 场雨洪资料, 其峰值在 72.8—243.0 m³/s 之间。最大 1 hr. 时段净雨为 7.5—27.6 mm。实测洪峰对应流速为 2.23—2.9 m/s。

表 1 列出了各流域的实测滞时 t_L 、流速 v 及 L_{ca}/v 值。

二、结果分析

图 1 在直角坐标系中点绘了各流域各次洪水实测的滞时 t_L 与 L_{ca}/v 的关系。

从图中可看出, 5 个流域的滞时 t_L 与 L_{ca}/v 值之间具有一定关系, 即随 L_{ca}/v 值的增大, 滞时也增大, 且这一关系呈现正相关趋势。对 $t_L \sim L_{ca}/v$ 关系作以下两种形式的检验:

$$t_L = C_1 L_{ca}/v + D_1 \quad (3)$$

$$t_L = C_2 (L_{ca}/v)^{D_2} \quad (4)$$

1) 资料由南京水文水资源研究所文康先生提供。

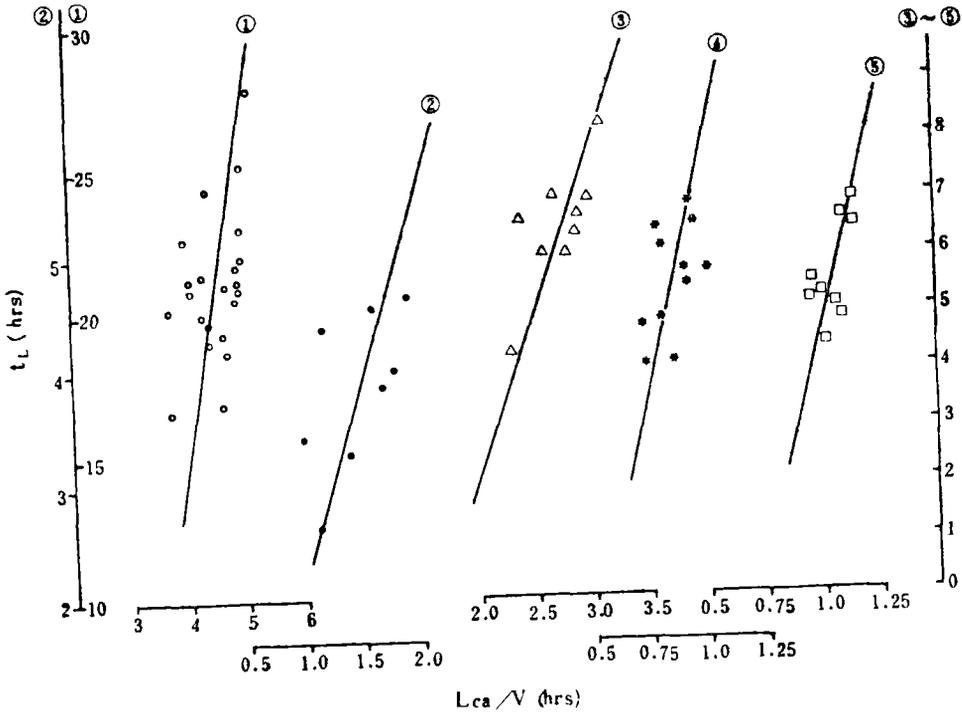
表 1. 计算滞时与实测滞时的比较
Comparing the observed and the estimated lag times

编号	洪时 (日/月/年)	Q (m ³ /s)	v (m/s)	L _{ca} /v (hr.)	滞 时 (hr.)			
					t _L	\hat{t}_L	Δ	$\bar{\Delta}$ (%)
Nenagh (A=295km ² , L _{ca} =18.5km), C=4.65								
1	24/01/58	21.18	1.032	4.98	25.2	23.4	1.8	7.1
2	28/01/58	25.61	1.092	4.71	21.0	22.1	1.1	5.3
3	23/02/58	23.10	1.058	4.86	20.5	22.8	2.3	11.4
4	18/12/58	32.27	1.171	4.39	24.4	20.6	3.8	15.5
5	31/12/58	22.92	1.056	4.87	20.8	22.9	2.1	9.9
6	6/01/59	21.18	1.032	4.98	22.3	23.4	1.1	5.0
7	12/11/59	18.84	0.997	5.15	27.9	24.2	3.7	13.1
8	6/12/59	22.05	1.044	4.92	21.3	23.1	1.8	8.6
9	9/12/59	27.74	1.118	4.60	16.9	21.6	4.7	27.8
10	23/12/59	26.53	1.103	4.66	18.7	21.9	3.2	17.1
11	25/12/59	32.27	1.171	4.39	18.7	20.6	1.9	10.3
12	26/12/59	55.25	1.387	3.71	16.7	17.4	0.7	4.2
13	29/12/59	41.60	1.267	4.06	20.9	19.1	1.8	8.8
14	31/12/59	35.29	1.204	4.27	20.0	20.1	0.1	0.5
15	20/01/60	21.18	1.032	4.98	23.0	23.4	0.4	1.7
16	22/01/60	22.92	1.056	4.86	21.7	22.9	1.2	5.4
17	25/01/60	26.53	1.103	4.66	19.3	21.9	2.6	13.5
18	14/09/60	40.52	1.257	4.09	21.2	19.2	2.0	9.4
19	17/09/60	34.48	1.195	4.30	21.4	20.2	1.2	5.6
20	19/09/60	44.33	1.293	3.97	22.7	18.7	4.0	17.7
21	1/11/60	55.25	1.387	3.71	20.2	17.4	2.8	16.0
22	10/11/60	32.27	1.171	4.39	19.1	20.6	1.5	8.0
均值							2.1	10.1
洪家塔 (A=159km ² , L _{ca} =12.6km), C=2.58								
1	24/09/60	1100.0	3.00	1.17	4.36	3.02	1.34	30.8
2	4/10/61	1190.0	3.09	1.13	2.64	2.92	0.28	10.4
3	24/06/62	250.0	1.94	1.80	4.01	4.64	0.63	15.8
4	23/07/62	418.0	2.26	1.59	4.52	4.10	0.42	9.2
5	11/09/63	1050.0	3.50	1.00	3.43	2.58	0.85	24.8
6	20/08/65	398.0	2.55	1.37	3.27	3.53	0.26	8.1
7	2/06/71	198.0	1.84	1.90	4.63	4.90	0.27	5.9
8	2/07/75	239.0	2.08	1.68	3.87	4.33	0.46	12.0
均值							0.56	14.6

续表 1

编号	洪时 (日/月/年)	Q (m ³ /s)	v (m/s)	L _{ca} /v (hr.)	滞 时 (hr.)			
					t _L	\hat{t}_L	Δ	$\bar{\Delta}$ (%)
牛头山 (A=252km ² , L _{ca} =16.5km), C=2.36								
1	10/08/75	1180.0	1.90	2.41	6.59	5.69	0.90	13.7
2	7/10/75	464.0	1.66	2.76	6.03	6.51	0.48	8.0
3	24/05/76	387.0	1.48	3.10	8.29	7.32	0.97	11.7
4	26/07/77	655.0	1.69	2.71	7.00	6.40	0.60	8.6
5	26/09/77	1210.0	1.98	2.32	4.34	5.48	1.14	26.3
6	28/05/78	559.0	1.76	2.60	6.03	6.14	0.11	1.8
7	24/08/79	273.0	1.53	3.00	7.01	7.08	0.07	1.0
8	5/08/80	321.0	1.60	2.87	6.37	6.77	0.40	6.3
9	20/08/80	439.0	1.59	2.88	6.71	6.80	0.09	1.3
均值							0.53	8.7
江家 (A=64km ² , L _{ca} =7.4km), C=6.52								
1	28/06/63	59.5	2.30	0.89	5.58	5.85	0.27	4.8
2	10/06/64	62.9	2.20	0.93	6.82	6.11	0.71	10.4
3	24/06/65	41.7	2.10	0.98	5.67	6.40	0.73	13.0
4	25/06/65	124.0	2.65	0.78	5.45	5.08	0.37	6.9
5	3/10/65	79.0	2.41	0.85	4.07	5.58	1.51	37.1
6	8/07/66	219.0	2.80	0.73	4.01	4.89	0.79	19.8
7	5/07/69	63.6	2.20	0.93	6.45	6.11	0.34	5.2
8	8/05/70	92.8	2.65	0.78	6.41	5.08	1.33	20.8
9	27/05/71	102.0	2.58	0.80	6.12	5.21	0.91	14.8
10	2/06/71	192.0	2.80	0.73	4.74	4.80	0.06	1.3
11	17/06/74	182.0	2.60	0.79	4.80	5.17	0.37	7.8
均值							0.67	12.9
扬桥头 (A=91.4km ² , L _{ca} =9.1km), C=5.36								
1	25/06/65	169.0	2.47	1.02	5.22	5.47	0.25	4.8
2	29/06/69	99.0	2.23	1.13	6.93	6.06	0.87	12.6
3	2/07/69	111.0	2.38	1.06	4.90	5.67	0.77	15.8
4	9/05/70	72.8	2.27	1.11	6.36	5.95	0.41	6.4
5	25/06/70	243.0	2.54	1.00	4.44	5.32	0.88	19.8
6	2/06/70	150.0	2.60	0.97	5.13	5.19	0.06	1.3
7	8/08/70	122.0	2.40	1.05	4.98	5.63	0.65	13.0
8	30/05/73	103.0	2.30	1.10	6.47	5.87	0.60	9.2
9	16/06/77	206.0	2.90	0.87	5.40	4.66	0.74	13.8
均值							0.58	10.7

注: 表中 Δ 为计算滞时 \hat{t}_L 与实测滞时 t_L 之误差, $\bar{\Delta}$ 为相对误差。



① Nenagh, ② 洪家塔, ③ 牛头山, ④ 江家, ⑤ 扬桥头

图 1. 实测滞时 t_L 与 Lca/v 值间的关系

The relations between the lag time t_L and the variable Lca/v on the five basins

由最小二乘法估计 (3)、(4) 式中的参数, 其结果见表 2—表 3。t 检验表明, 在置信度为 5% 下, 5 个小流域均接受 D_1 为 0, D_2 为 1 的假设。这说明在这些流域上 (2) 式的假设是成立的。

为了研究系数 C 的变化情况, 图 2 点绘了 C 值在各流域上随洪峰流量的变化关系。可以看出, 5 个小流域上 C 值基本不随流量而变化, 这为应用 (2) 式提供了方便。

表 2. 最小二乘法参数分析结果 (直角坐标)

The results of the least squares analysis on arithemetical scale

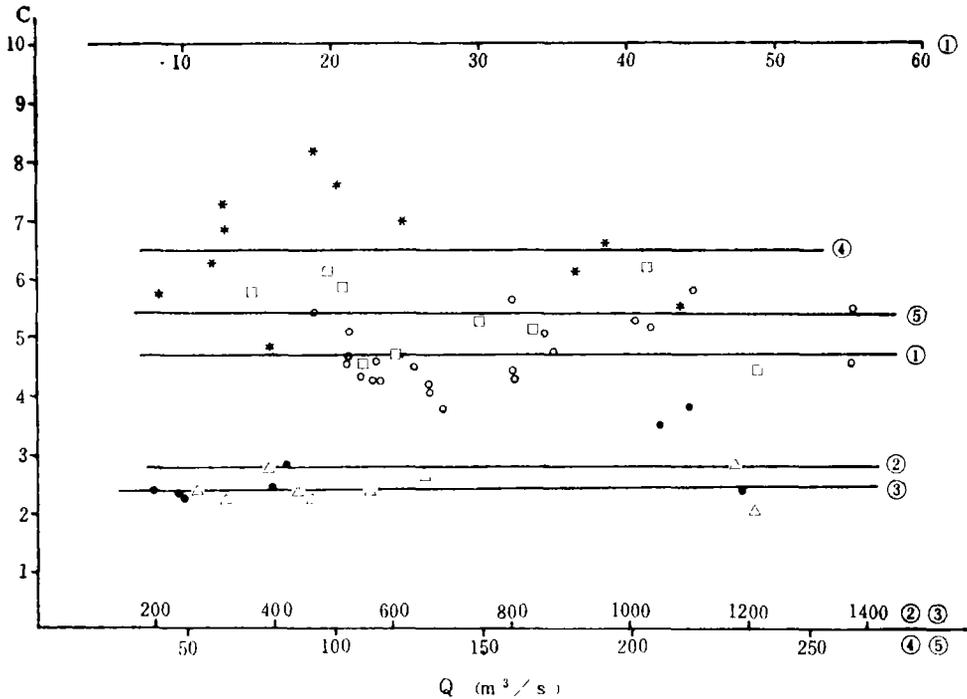
流域	A (km^2)	$t_L = C_1(Lca/v) + D_1$				t	r
		C_1	σ_{C_1}	D_1	σ_{D_1}		
Nenagh	295	2.75	1.21	8.66	5.51	1.57	0.5
洪家塔	159	1.22	0.68	2.07	1.01	2.05	0.6
牛头山	252	3.12	0.94	-2.04	2.57	0.79	0.8
江家	61	5.51	3.21	0.86	2.69	0.32	0.5
扬桥头	91.4	6.13	3.18	-0.81	3.28	0.25	0.6

注: 表中 $t = |D_1 - 0| / \sigma_{D_1}$, r 为相关系数。

表 3. 最小二乘法参数分析结果 (对数坐标)
The results of the least squares analysis on logarithmic scale

流域	A (km ²)	$t_L = C_2 (L_{Ca}/v)^{D_2}$				t	r
		C'_2	σ'_{C_2}	D_2	σ_{D_2}		
Nenagh	295	0.95	0.16	0.54	0.25	1.84	0.4
洪家塔	159	0.51	0.05	0.47	0.27	1.96	0.6
牛头山	252	0.21	0.18	1.37	0.41	0.90	0.8
江 家	64	0.80	0.05	0.88	0.52	0.23	0.5
扬桥头	91.4	0.73	0.01	0.98	0.59	0.03	0.5

注: 表中 $C'_2 = \log C_2$, $t = |D_2 - 1| / \sigma_{D_2}$, r 为相关系数。



①Nenagh (○), ②洪家塔 (·), ③牛头山 (△), ④江家 (*), ⑤扬桥头 (□)

图 2. 5个流域中参数C值随流量的变化情况
The values of parameter C in the five basins

以各流域上C的均值作为(2)式中的系数, 由此计算的滞时与实测滞时的关系见表1。

对Nenagh流域, C的均值为4.65, 以此值计算的滞时与实测滞时非常一致(表1)。22场洪水的计算滞时之差为0.1—4.7hr., 其均值为2.1hr., 相对误差为0.5—27.8%; 均值为10.1%。

洪家塔流域的计算C值为2.58, 以此值计算的滞时与实测滞时非常接近, 8场洪水的计算滞时与实测滞时之差在0.26—1.34hr. 之间, 平均误差为0.56hr.。相对误差为5.9—30.8%, 均值为14.6%。

牛头山流域的计算C值为2.36。9场洪水的计算滞时与实测滞时基本吻合, 其误差在0.07—1.14hr. 之间, 均值为0.53hr.。相对误差在1.0—26.3%之间, 均值为8.7%。

江家流域的计算C值为6.52, 以此值计算的流域滞时与实测滞时非常一致。11场洪水的计算滞时与实测滞时的误差为0.06—1.51hr., 均值为0.67hr.。相对误差为1.3—37.1%, 均值为12.9%。

扬桥头流域的计算C值为5.36。9场洪水的计算滞时与实测滞时基本吻合, 其误差在0.06—0.88hr. 之间, 均值为0.58hr.。相对误差为1.3—19.8%, 均值为10.7%。

三、与其它方法比较

由(1)式一类的经验公式计算的流域滞时对一个流域而言总是一个常数。因此, 以每个流域实测滞时的均值作为比较的对象, 其结果见表4。

表4. 由公式(2)计算滞时之误差与由均值法计算滞时之误差比较
Comparing the errors between the suggested method and the traditional method

流 域	绝对误差 (hr.)		相对误差 (%)	
	公式 (2)	均值法	公式 (2)	均值法
Nenagh	2.1	1.9	10.1	8.8
洪家塔	0.56	0.56	14.6	15.5
牛头山	0.53	0.70	8.7	12.0
江 家	0.67	0.77	12.9	15.1
扬桥头	0.58	0.70	10.7	12.6

由表4可看出, 由(2)式计算的流域滞时的平均误差比由均值法计算的流域滞时的平均误差要小。因所用流域较小, 且滞时变化不大, 所以误差减小得并不十分明显。

四、结 语

5个小流域的实测资料检验结果初步表明, 流域滞时可以表示成流域重心长度与汇流速度之比的简单函数关系。重心长度反映了流域的大小尺度及几何形态对滞时的影响, 而流速则反映了流域的动力条件对滞时的作用。因流速是随雨洪大小而变化的, 故滞时也是随雨洪大小而变化, 这一点是符合实际的。

参 考 文 献

- (1) Watt W.E. and K.C. Ander Chow, .A General Expression for Basin Lag Time. Can.J.Civ. Eng.,1985, Vol.12: 294-300
- (2) Pilgrim D.H.,Isochrones of Travel Time and Distribution of Flood Storage from a Tracer Study on a Small Watershed. Water Resour. Res. 1977, 13 (30): 587-597
- (3) Rodriguez-Iturbe I. and J.B.Valdes. The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response,Water Resour. Res., 1979, 15(6): 1409-1420.
- (4) Gray, D.M., Interrelationships of Watershed Characteristics, J. Geophys. Res. 66(4),1215-1223.
- (5) Bree T., The Stability of Parameter Estimation in the General Linear Model, J. Hydrology, 1978, Vol. 37: 44-46.

AN EXPRESSION FOR THE VARIABLE BASIN LAG TIME

Jin Changxing

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences and State Planning
Commission of the People's Republic of China)

Subject terms: basin lag time, channel length from the centroid
to the outlet of basin, flow velocity

Abstract

The basin lag time is an important factor in determining the basin hydrology. In this paper the basin lag time was expressed as a function of ratio of channel length from the centroid to the outlet of basin, divided by the velocity of flow at the gauging site at the time of passage of peak discharge. The channel length reflects the basin size and topographic characteristics, and the velocity characterizes the basin dynamic condition. The results of the test on five small basins were satisfactory.