

# 北京西山灌木林小流域暴雨径流研究\*

杨立文 石清峰 李昌哲 张理宏

**摘要** 利用北京西山次生灌木林地上6个小流域的实测降雨径流数据,采用IUH法,分析影响径流的主要因子,并对降雨径流进行预测,结果表明:IUH法在小流域上应用效果较好,对径流过程的拟合较为一致;天然次生灌木林具有良好的水源涵养功能,在森林植被覆盖率超过40%时,每增加10%,IUH洪峰可降低4.6%,洪峰滞时可延长9.3%。

**关键词** 北京西山、灌木林、小流域、产流量、汇流

研究森林与径流的关系已有近百年的历史<sup>[1]</sup>。如瑞士、美国、日本和前苏联等国,均在本世纪初就设立了森林试验流域,研究了森林对径流的影响。我国在该方面虽起步较晚,但也有一些典型<sup>[1]</sup>,如四川米亚罗林区、甘肃祁连山林区的研究,大都在雨量充沛的天然林或人工壮龄林流域进行,由于多为典型的森林土壤,因此表现出良好的水文特性。至于人工幼林,特别是半干旱地区通过封山恢复起来的灌木林试验的水文效益如何?尚未见到报道。本文利用10a的观测数据,分析探讨了北京西山6个小流域在暴雨条件下径流量的变化以及灌木林的水文作用。

## 1 试验区概况

试区设在太行山的北部——北京西山,中国林业科学研究院华北林业实验中心内,116°6'E,39°42'N。该地区属北温带亚湿润区气候,为典型的大陆型气候。年平均气温11.8℃,年平均降水量623.0mm,雨季6~9月,降雨量占全年的80%以上,7、8月为高峰期,降雨量占全年的60.4%。土壤主要是在砂页岩坡积物上发育的山地粗骨褐土和山地淋溶褐土,质地为壤土或沙壤土,厚度为15~120cm。坡积母质厚度0.5~17.5m,平均6.0m左右。山的坡度较陡,多为25~35°。植被以天然次生灌木林为主,主要有荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata* Lindl.)、蚂蚱腿子(*Myrica dioica* Bunge)、酸枣(*Zizyphus spinosus* Hu)等。还有少量油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)和侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)人工幼林。试区范围100hm<sup>2</sup>,共包括6个小流域(见表1)。

表1 各流域基本情况

流域	面积 (hm <sup>2</sup> )	长度 (m)	平均坡度 (%)	形状系数	植被覆盖率 (%)
1	26.5	767	449	0.45	85
2	11.9	601	487	0.33	78
3	0.4	63	610	0.95	50
4	0.3	60	625	0.83	45
5	0.8	135	585	0.44	90
6	1.5	191	540	0.41	90

1994—04—11 收稿。

杨立文助理研究员,石清峰、李昌哲、张理宏(中国林业科学研究院林业研究所 北京 100091)。

\* 本研究为“八五”国家科技攻关“太行山生态林业工程生态效益研究”的一部分,曾得到北京市水文总站葛大经先生的指导,谨致谢意。

## 2 观测方法

- (1)在试区范围内设 4 处降雨观测点,均为自记雨量计,取平均值作为试区雨量。
- (2)在各小流域出口设薄壁三角堰,安装自记水位计观测径流量及径流过程。
- (3)设气象站一座,观测气温、蒸发、湿度、日照等其它气象因子。
- (4)设固定样方 12 个,每年调查一次植被变化情况。

## 3 结果及分析

### 3.1 流域产流

本试区土壤层较薄,多为 60 cm 左右,孔隙量较大,下渗能力较强,据测定,试区几种主要植被类型的土壤容重、总孔隙度和渗透能力 0~25 cm 土层分别为:0.92~1.21、53.9%~62.2%和 2.9~14.7 mm/min;25~60 cm 土层分别为:1.15~1.47、43.5%~57.4%和 0.9~5.9 mm/min。由于土层薄,渗透能力强,与母质层的透水能力形成了较大差异,因此具备了饱和地面流和壤中流的产流机制。实测径流结果也说明了这一点(表 2)。

表 2 1 号小流域降雨、径流实测

时 间 (年一月一日)	产流次雨量 (mm)	前 15 d 降雨量 (mm)	前期影响雨量 (mm)	地表径流量 (mm)
1985—08—25	111.9	82.5	66.2	2.4
1985—08—27	35.8	164.4	135.4	2.4
1986—07—07	38.3	186.4	119.2	0.6
1988—08—02	208.8	194.2	165.8	13.6
1988—08—10	60.1	321.6	169.7	5.7
1988—08—14	48.3	320.8	163.5	4.6
1989—07—21	190.5	95.5	67.6	5.8
1990—08—02	59.5	150.1	123.3	2.4
1991—07—25	70.3	115.4	84.4	1.3

前期影响雨量采用下式逐日计算: $P_{a,t+1}=K(P_{a,t}+P_t)$ ;  $K=1-E_p/W_m$ 。

$P_{a,t+1}$ ——t 时 1 日后的前期影响雨量(mm);  $P_{a,t}$ ——t 时的前期影响雨量(mm);  $P_t$ ——t 日的降雨量(mm);  $K$ ——土壤水分消退系数;  $E_p$ ——流域日蒸发散能力(mm);  $W_m$ ——流域最大蓄水量。

从表 2 可以看出,流域产流都是在有较大降雨或前期有较大降雨情况下发生的。其它 5 个流域的产流情况与 1 号流域基本相同,在 10 a 的观测中,只有 1988 年 8 月 2 日 17.5 时降雨 208.8 mm 出现了局部坡面径流,因此可以认为,各流域均属于蓄满产流类型。

根据蓄满产流理论<sup>[2]</sup>,选取各流域 6~9 次降雨径流观测结果,对影响产流的两个主要因子,产流次雨量和前期影响雨量与径流量进行回归,结果见表 3。

表3 降雨—径流回归方程式及相关系数

流域	回归方程式	相关系数 $r$
1	$R=0.0561(P+P_a)-7.6537$	0.9914
2	$R=0.0573(P+P_a)-7.4490$	0.9637
3	$R=0.0637(P+P_a)-7.6440$	0.9945
4	$R=0.0682(P+P_a)-8.0476$	0.9876
5	$R=0.0424(P+P_a)-5.9784$	0.9787
6	$R=0.0399(P+P_a)-5.7855$	0.9821

从表3公式算出:(1)灌木林小流域同样具有较大田间持水量,6个小流域均超过100mm,最小的4号流域为118mm,最大的6号流域为145mm,呈现出与植被覆盖率正相关的趋势;(2)6个小流域降雨—径流相关直线的斜率均较小,说明随着雨量的增加,径流量增加缓慢。这正是由于良好的植被保护了地表,使土壤孔隙不被堵塞;根系的发育增

加了土壤孔隙度,使土层保持了较高的下渗能力,从而减少了地表径流量。6个小流域的次径流系数均不超过0.1,最大的一次为0.06~0.08(1988年8月2日)。

3.2 流域汇流

采用瞬时单位线(IUH)法,推求6个小流域历次洪水的出流过程线,并与实测出流过程线进行比较,确定较一致的线型,然后通过对瞬时单位线主要参数  $n, k$  的综合,分析森林植被对径流的影响,具体计算公式如下<sup>[3]</sup>:

$$n = [M_Q^{(1)} - M_I^{(1)}]^2 / [N_Q^{(2)} - N_I^{(2)}] \tag{1}$$

$$k = [N_Q^{(2)} - N_I^{(2)}] / [M_Q^{(1)} - M_I^{(1)}] \tag{2}$$

$$M_I^{(1)} = \sum \bar{I}_i m_i / \sum \bar{I}_i \cdot \Delta t / 2; \quad M_I^{(2)} = \sum \bar{I}_i m_i^2 / \sum \bar{I}_i \cdot (\Delta t / 2)^2$$

$$M_Q^{(1)} = \sum \bar{Q}_i m_i / \sum \bar{Q}_i \cdot \Delta t / 2; \quad M_Q^{(2)} = \sum \bar{Q}_i m_i^2 / \sum \bar{Q}_i \cdot (\Delta t / 2)^2$$

$$N_I^{(2)} = M_I^{(2)} - [M_I^{(1)}]^2; \quad N_Q^{(2)} = M_Q^{(2)} - [M_Q^{(1)}]^2$$

$M_I^{(1)}, M_Q^{(1)}$  和  $M_I^{(2)}, M_Q^{(2)}$ ——净雨量过程、出流量过程一阶和二阶原点矩,  $\bar{I}_i, \bar{Q}_i$ —— $i$  时净雨量、出流量的时段平均值,  $m_i = 1, 3, 5 \dots 2n-1, N_I^{(1)}, N_Q^{(1)}$  和  $N_I^{(2)}, N_Q^{(2)}$ ——净雨量、出流量的一阶和二阶中心矩。

现以1985年8月27日一次暴雨径流为例推求  $n, k$  值。

3.2.1 时段净雨量的推求 推求时段净雨量一般采用降雨径流经验相关图法<sup>[3]</sup>。该法在较大流域上应用有一定精度。但用于小流域、特别是本次研究这样小的流域,查算净雨偏多。因此,这里采用本次降雨径流的实测数据分析确定。按照蓄满产流的理论,当降雨满足流域最大蓄水量  $W_m$  之后开始产流,这时降雨量损失主要是稳定下渗,损失率基本为一定值,降雨与径流应呈直线相关,因此有:  $R = f[P - (W_m - W)] = f(P')$ 。

$R$ ——净雨;  $P'$ ——流域达到  $W_m$  以后的降雨量。1985年8月27日的  $P' = 35.8$  mm。按照净雨时段的划分原则,分为两个时段,  $P'_1 = 24.3$  mm、 $P'_2 = 11.5$  mm;净雨  $R = 2.4$  mm,按照上式作  $P'-R$  相关图,查算时段净雨量,  $R_1 = 1.7$  mm、 $R_2 = 0.7$  mm。

3.2.2 瞬时单位线的推求 按照上面所得时段净雨量和实测出流过程,分别计算净雨量和出流量矩值,推求时段单位线,见表4~6,由公式(1)、(2)计算  $n, k$  值,即  $n = 1.87, k = 14.77$ 。

表4 净雨量原点矩计算表

(1985—08—27)				
起止时间 (时)	$\bar{I}_i$ (mm)	$m_i$	$\bar{I}_i m_i$ (mm)	$\bar{I}_i m_i^2$ (mm)
04~08	1.7	1	1.7	1.7
08~12	0.7	3	2.1	6.3
合计	2.4		3.8	8.0

表 5 出流量原点矩计算表

(1985—08)

时 间 (日—时)	实测出流量 $Q$ (L/s)	$\bar{Q}_i$ (L/s)	$m_i$	$\bar{Q}_i m_i$ (L/s)	$\bar{Q}_i m_i^2$ (L/s)
27—04	0	1.02	1	1.02	1.02
27—08	2.04	2.59	3	7.77	23.31
27—12	3.14	3.69	5	18.45	92.25
27—16	4.25	4.53	7	31.71	221.97
27—20	4.82	4.68	9	42.12	379.08
27—24	4.55	4.32	11	47.52	522.72
28—04	4.10	3.92	13	50.96	662.48
28—08	3.74	3.54	15	53.10	796.50
28—12	3.35	3.15	17	53.55	910.35
28—16	2.95	2.78	19	52.29	1003.58
28—20	2.61	2.49	21	52.29	1098.09
28—24	2.38	2.27	23	52.21	1200.83
29—04	2.16	2.05	25	51.25	1281.25
29—08	1.95	1.82	27	49.14	1326.78
29—12	1.69	1.57	29	45.53	1320.37
29—16	1.45	1.37	31	42.47	1316.57
29—20	1.29	1.23	33	40.59	1339.47
29—24	1.18	1.15	35	40.25	1408.75
30—04	1.13	1.08	37	39.96	1478.52
30—08	1.04	1.01	39	39.39	1536.21
30—12	0.99				
合 计		52.69		813.10	17 980.10

表 6 用  $S(t)$  曲线转化时段单位线计算表

$t(h)$	0	04	08	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48
$t/k$		0.271	0.542	0.812	1.083	1.354	1.625	1.896	2.166	2.437	2.708	2.979	3.250
$S(t)$		0.035	0.125	0.217	0.330	0.425	0.515	0.596	0.562	0.726	0.773	0.817	0.851
$S(t-\Delta t)$			0.035	0.125	0.217	0.330	0.425	0.515	0.596	0.662	0.726	0.773	0.817
$\Delta S(t)$		0.035	0.090	0.092	0.113	0.095	0.090	0.081	0.066	0.064	0.047	0.044	0.034
$u_t(L/s)$	0	0.64	1.66	1.69	2.08	1.75	1.66	1.49	1.21	1.18	0.86	0.81	0.62

3.2.3 推求流量过程线与实测流量过程线比较(图 1) 从图 1 可以看出,推求流量过程线与实测流量过程线基本一致,尤其是在洪峰和洪峰滞时上拟合较好。在 10 a 的 43 次暴雨洪水中,推求流量过程线与实测流量过程线大部分拟合较好,但有少数双峰流量过程线或雨强变化较大时的流量过程线,有反复拟合效果均不理想的现象,主要表现为洪峰不一致,因此,此次只选取 39 次暴雨洪水进行综合。

3.2.4 参数  $n, k$  的综合  $n, k$  值是瞬时单位线的两个参数,决定着瞬时单位线的形状。 $n, k$  值越大,

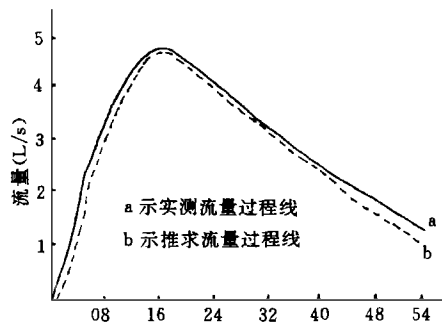


图 1 推求流量过程线与实测流量过程线比较

线形越平缓,即洪峰滞后并减低,反之,洪峰加大而提前。所以, $n$ 、 $k$ 值反映了流域的调蓄能力,它与流域特征等因子存在一定的关系,为寻求这种关系,选取流域面积 $F$ 和森林植被覆盖率 $S$ 与各流域6~9次洪水 $n$ 、 $k$ 值的平均数进行综合。

根据经验<sup>[3]</sup>,设 $F$ 、 $S$ 与 $n$ 、 $k$ 的回归方程分别为: $n=C_1F^{\alpha_1}S^{\beta_1}$ ;  $kn=C_2F^{\alpha_2}S^{\beta_2}$ 。对上式取对数化成多元回归形式,然后按照最小二乘法原理,计算 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $C$ (表7)。计算结果: $\alpha_1=0.161$ ,  $\beta_1=0.089$ ,  $C_1=1.370$ ;  $\alpha_2=0.206$ ,  $\beta_2=0.231$ ,  $C_2=1.214$ ,故  $n=1.370F^{0.161}S^{0.089}$ ;  $k=1.214F^{0.206}S^{0.231}$ 。

上式表明: $F$ 、 $S$ 与 $n$ 、 $k$ 为正相关,即流域面积越大,森林植被越好,则洪峰越低,洪峰滞时越长。根据以上综合结果,利用瞬时单位线洪峰和洪峰滞时的性质 $U(\text{IUH洪峰})=l/k\Gamma(n) \cdot (n-1)^{n-1}\exp[-(n-1)]$ 和 $t(\text{IUH洪峰滞时})=(n-1)k$ 进行计算,结果表明:森林植被覆盖率每增加10%,瞬时单位线的峰值可降低4.6%,洪峰滞时可延长9.3%。

表7 回归方程指数计算

流域	$F$ ( $\text{hm}^2$ )	$S$ (%)	$n$	$k$	$x$ ( $\ln F$ )	$y$ ( $\ln S$ )	$Z_1$ ( $\ln n$ )	$Z_2$ ( $\ln k$ )	$xy$	$yz_1$	$yz_2$	$z_1x$	$z_2x$	$x^2$	$y^2$	$z_1^2$	$z_2^2$
1	26.5	85	3.6	6.6	3.277	4.443	1.281	1.887	14.560	5.691	8.384	4.198	6.184	10.739	19.740	1.641	3.561
2	11.9	78	2.8	5.4	2.476	4.357	1.030	1.686	10.788	4.488	7.346	2.541	4.175	6.131	18.983	1.061	2.843
3	0.4	50	1.7	2.3	-0.916	3.912	0.531	0.833	-3.583	2.077	3.259	-0.486	-0.763	0.839	15.304	0.282	0.694
4	0.3	45	1.5	2.4	-1.203	3.807	0.405	0.875	-4.580	1.542	3.331	-0.487	-1.053	1.447	14.493	0.164	0.766
5	0.8	90	2.1	3.0	-0.223	4.500	0.742	1.099	-1.004	3.339	4.946	-0.165	-0.245	0.050	20.250	0.551	1.208
6	1.5	90	2.2	4.3	0.405	4.500	0.788	1.459	1.823	3.546	6.565	0.319	0.591	0.164	20.250	0.621	2.128
合计					3.816	25.519	4.777	7.839	18.004	20.680	33.831	5.920	8.888	19.370	109.021	4.319	11.20
平均					0.636	4.253	0.796	1.307	3.001	3.447	5.639	0.967	1.481	3.228	18.170	0.720	1.866

## 4 结语与讨论

(1)在北京西山砂页岩区,通过封山恢复起来的天然次生灌木林植被,不仅水土保持作用明显,而且具有良好的水源涵养功能和减少地表径流量的趋势。次径流系数不超过0.1。

(2)天然次生灌木林植被在涵养水源、调节径流方面,主要表现为消减洪峰、延长洪峰滞时和增加地下径流的功能上,在森林植被覆盖率40%以上时,瞬时单位线峰值可降低4.6%,洪峰滞时可延长9.3%。

(3)森林植被对径流的影响,是森林水文学研究的主要课题之一,也是一个复杂的问题,由于研究方法、手段的局限性和自然条件的千差万别,世界各国经过近百年的研究仍未取得一致的结论<sup>[1]</sup>。本文利用普通水文学的方法,主要从流域面积和植被两个方面对径流的影响进行了分析,结论是初步的,因为还有很多因子尚未考虑进去,有待进一步深入研究。

### 参 考 文 献

- 1 马雪华. 森林水文学. 北京:中国林业出版社,1993.
- 2 张文华. 实用暴雨洪水预报理论与方法. 北京:水利电力出版社,1990.
- 3 长江水利委员会. 水文预报方法. 北京:水利电力出版社,1993.
- 4 李昌哲. 太行山水土保持林营造技术及效益研究. 北京:中国科学技术出版社,1991.
- 5 北京林学院. 数理统计. 北京:中国林业出版社,1980.
- 6 近岗弘荣. 山地流域における増水曲線の推定に關する基础研究. 林试研报,1987,(346):1~92.

## Study on Storm Runoff in Small Scrub Watersheds on Xishan Mountain in Beijing

*Yang Liwen Shi Qingfeng Li Changzhe Zhang Lihong*

**Abstract** Making use of the actual runoff datum of 6 watersheds with vegetations of natural secondary shrubbery forest, IUH method was adopted to analyze the major factors which are influencing the amount of runoff in the Xishan Mountain, Beijing. And a prediction of the amount of runoff was made. The results showed that IUH method can well be applied for small watershed; the natural secondary shrubbery forest possesses fine water supply capacity. When the forest coverage is above 40%, each 10% increase can decrease 4.6% of IUH high discharge, and prolong 9.3% of high discharge time.

**Key words** Xishan Mountain in Beijing, shrubbery, small watershed, discharge, confluence

---

Yang Liwen, Assistant Professor, Shi Qingfeng, Li Changzhe, Zhang Lihong (The Research Institute of Forestry, CAF Beijing 100091).

---

### 欢迎订阅 1995 年《林业经济》

《林业经济》由中国林业科学研究院主办,中国林业经济学会和林业经济研究所出版。本刊宗旨:宣传我国林业方针政策,反映我国林业经济学科最新研究成果,用现代科学理论指导林业实践,为林业改革与发展服务。特点:集学术性、实践性与指导性为一体。主要栏目:综论、专论、问题讨论、区域林业发展、环境、资源、人口、森林生态经济、社会林业、复关与林业、市场问题、企业制度、企业论坛、财会研究、理论·方法·应用、学术动态、国外林业经济以及林业经济管理专题讲座。主体文章附有中英文摘要。

《林业经济》为一切林业有识之士探讨林业经济各类问题提供园地,为林业决策与制定政策提供参考,是广大林业工作者及有关院校师生的有益读物。

《林业经济》承办国内广告业务,联系人:葛琪。

《林业经济》为双月刊,每期定价 2.5 元,全年定价 15 元。在校学生订阅半价优惠。总发行:北京报刊发行局;订阅:各地邮电局或直接汇款至本刊编辑部。国内代号:82-134。

地 址:北京安外胜古南里 17 楼 邮政编码:100029 电话:4228653