

太平洋西海岸森林砍伐对洪水特征的影响*

程 根 伟

(中国科学院-水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610041)

Hetherington E

(加拿大太平洋森林中心 维多利亚 V82 1M5)

提 要 据加拿大 Carnation Creek 生态试验站 20a 的森林水文观测资料,应用回归分析和协方差检验,研究了森林砍伐以前、道路修筑、砍伐中和砍伐后各时期洪水参数的变化,统计结果表明,森林砍伐后,洪峰和洪量有显著的增大,一般增幅在 20%~30%之间,年径流量增长 15%~20%,但洪峰滞时和洪水形态变化不大。

关键词 森林水文 洪水特征 统计检验

1 引 言

森林砍伐和人工造林是一种强烈的流域改造活动,它极大地改变了地表覆盖条件,并可能导致一系列的环境影响,其中河川径流变化有重要的生态和社会意义。伐木改变了径流的形成条件,导致年径流量、洪水、洪水形态和枯水量的变化,它们又可能引起其他环境问题,如泥沙淤积、河岸冲刷、山洪危害以及水质恶化等,在这些方面已有一些初步研究结果^[1~4]。由于各类研究所涉及的流域位置、大小、气候类型、立地条件、砍伐方式及资料条件等具体情况不一样,分析的结果很不统一,甚至还会出现冲突的结论^[5],因此森林水文效应评价中存在不少疑难问题,有关研究仍很活跃,其中最关键的是找到满足代表性和可比性的森林流域,以及选择合适的分析方法。

为探索森林对河川径流的影响,对比流域分析是较好的方法,特别是有计划的砍伐林地与保留林地的对比更有意义,即在同一自然地理区域保留一二个天然流域作为对照,另选择几个相邻的小流域实行净伐。通过砍伐前、砍伐中和砍伐之后的径流平行观测,建立砍伐区与对照区各阶段的相关关系,即可分析砍伐或造林引起的径流变化。由于对照组中气象条件、降水分配都相同,流域尺度、土壤和地质条件又不随时间变化,因此径流特征的变化直接体现出森林状态的影响,这种分析的关键是发现满足以上条件的流域。

Carnation Creek 位于加拿大太平洋西海岸,区内有两个天然流域和两个净伐流域,十个雨量点、四个小流域水文站和一个总区域径流控制站。自 1971 年开始水文观测,共采集了 20a 连续水文记录,其中 1971~1975 年为砍伐前,1976~1980 年为砍伐期,1981~1990 年为砍伐后和人工林恢复期。该流域是加拿大最具代表性的森林作业生态站,它与

* 国家自然科学基金(项目号:49671019)资助的部分研究成果。

收稿日期:1997-02-26。

美国西部的 Oregon, California^[6~7]等森林观测站条件相似,而对照流域的配套设计更合理,砍伐前后几个阶段的观测系列更系统,因此其成果更具代表性。

2 流域和资料条件

Carnation Creek 位于加拿大西部的温哥华岛,流域面临太平洋,具有低山地貌特征,地面平均坡度 40%~80%,地表为粗粒冲积土和森林腐殖质覆盖,优势树种为成熟的针叶杉(林),林下灌草生长茂密,呈温带雨林的特点。本区气候由太平洋暖流控制,冬季为湿季,多雨少雪;夏季为干季。本地降水量和降水日数很大,年降水量 2 100~5 000 mm。与相当高的下渗能力相比,此地降水强度不大,以中小雨为主,极难产生地表漫流,河流主要由壤中流和地下水补给。

Carnation Creek 的出口水文站 B 以上的流域面积 9.3 km², E, C, H, J 是四个支流控制站,十个自动雨量观测点分布在流域上、中、下游,正式的水文观测始于 1971 年 7 月。本区森林砍伐开始于 1975 年,其中 H, J 站上流域是 90%净伐, B 站以上区间为部分净伐,全区总砍伐比例达到 40%。森林砍伐到 1980 年底截止,随后在砍伐迹地上人工植造杉树林,到 1990 年基本成林。因此整个观测期可分为砍伐前(1971~1975 年)、筑路(1976 年)、砍伐期(1976~1980 年)和砍伐后期(1981~1990 年),为配合当地降水特点,以 10 月至次年 9 月作为一个水文年。有关流域和测站分布及砍伐面积等自然地理特征参见表 1。

表 1 Carnation Creek 流域特征

Table 1 The watershed features of Carnation Creek

水文站	集水面积(km ²)	海拔(m)	观测时期(年)	砍伐比例(%)
B	9.30	8~884	1971~1991	40
C	1.45	46~700	1972~1991	0
E	2.64	150~884	1972~1991	5
H	0.12	152~305	1972~1991	90
J	0.24	30~300	1975~1990	90

3 分 析 方 法

研究林地与径流形成关系的方法很多,按大类可分为物理或生理模型,野外降雨径流观测,数学模型仿真,时间序列分析和配对流域对比分析方法。其中流域对比法以相邻流域的平行对照观测为特点,突出了森林单独的作用,可以消除气候条件和地理因素对评价的影响,被广泛地用于森林水文效应研究。

对 Carnation Creek, E, C 站的流量系列代表未受扰动的流域特性,可用来作为参照系列(称为参照站),而 B, H, J 站(称为研究站)的径流变化通过与 E, C 站的相关来探测森林状态变化的影响。为消除流域大小或地理条件的影响,这里采用研究站和参照站数据的回归分析法,即用这两站在伐木前的数据建立它们的相关函数(率定关系),再用协方差分析检验在筑路期、砍伐期和恢复期的相关函数的变化,以探测修路、伐木和造林对径流的影响。这里重点考虑洪水特性的变化。

洪水特征可用洪水过程的统计参数表示,选用七个参数分别描述洪峰流量 Q 、洪峰

涨幅 DQ_r 、快速径流量 V_q 、上涨时间 DT_r 、雨洪滞时 TC 、洪水径流系数 CV_r 和对称系数 CT_q 。其中参数 Q_r, DQ_r, V_q 代表洪水强度或大小, CT_q 代表洪水形态, TC 和 CV_r 代表流域对暴雨的响应特征。记 $(Q_r, T_r), (Q_p, T_p)$ 和 (Q_e, T_e) 分别是起涨、洪峰和快速径流终止的流量与时间, $H(t), Q(t), QB(t)$ 是降水、总径流和地下水过程, 则以上洪水参数可定义为

$$\begin{aligned} DQ_r &= Q_p - Q_r, \\ DT_r &= T_p - T_r, \\ V_q &= \int_{T_r}^{T_e} [Q(t) - QB(t)] dt, \\ V_r &= \int_{t_1}^{t_2} H(t) dt, \\ T_q &= T_e - T_r, \\ CV_r &= V_q / V_r, \\ CT_q &= DT_r / T_q, \\ TH &= \int_{t_1}^{t_2} [t H(t) / V_r] dt, \\ TQ &= \int_{T_r}^{T_e} \{t [Q(t) - QB(t)] / V_q\} dt, \\ TC &= TQ - TH, \end{aligned}$$

式中 t_1, t_2 是主要降水开始和结束的时间, 在实际计算中用离散求和来代替积分。

对各子流域选择若干场洪水计算以上七个参数, 再取研究站和参照站相同洪次的参数进行回归。若令 PL_i 和 PC_i 分别是砍伐区和保留区的对应参数 ($i=1 \sim N$), 则这 N 对参数用最小二乘法求得它们的相关关系

$$PL = a + b PC,$$

同时还得到回归方程的相关系数 R 和显著性水平 P_r , 系数 (a, b) 是回归方程的截距和坡度, (R, P_r) 代表方程的拟合优度和可靠性。若伐木引起研究区洪水特性改变, 则砍伐前后的回归系数 (a, b) 将不一样, 这种差异可由协方差分析识别。协方差分析是对原假设: “两组序列具有相同的回归系数 (a, b) ” 进行推断, 其信度由显著性概率 P_r 或 F 指标表示, 过大的 F 或过小的 P_r 意味着很高的可能性拒绝原假设而选择备择假设: “这两组序列的系数 (a, b) 不相同”。相关分析或协方差分析都可由标准的工程或科学统计软件 (如 SAS, CSS) 完成。

这里选择 $P_r = 0.01$ 作为回归显著性水平, $P_r = 0.05$ 为协方差检验水平。对某一数据, 若回归得到的 P_r 太大 (往往是组内的点据太少), 则这组关系太差, 不能再用于协方差分析。只有在回归方程高度显著条件下, 协方差检验才能得到有意义的成果。

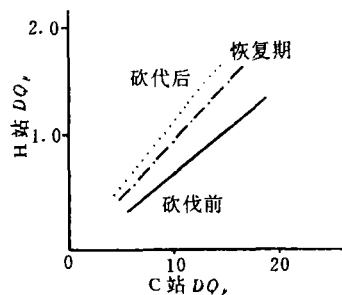


图1 C站和H站砍伐前后洪峰涨率回归
Fig. 1 The increasing rate regression of flood-peaks before and after logging for C and H watersheds

4 结 果

设计了一个多功能的系统软件,可自动完成各站洪水过程的屏幕绘图、洪次挑选、径流分割、退水延展、起止时间内插、洪水参数计算和统计列表等预处理工作,并应用统计系统软件 CSS^[8]进行数据管理和统计分析. 资料包括了 Carnation Creek 的五个水文站和十个雨量站,各自 20a 的水文数据(共计 650 场次雨洪记录),从中分割出典型的 400 余次独立洪水参加统计,即对研究站和参照站的洪水参数 DQ , DT , V_q , TC , CT_q 和 CV , 进行回归和协方差分析. 具体内容是将统计参数按时期分为砍伐前、筑路、砍伐期和砍伐后四个组(有的流域无筑路期),取砍伐前的回归方程作为率定标准,通过后期回归方程相对于率定关系的变化来检测修路、伐木和造林后洪水特性的变化.

表 2 H~C 站洪水特征的回归与协方差分析结果

Table 2 The regression and covariance analyses for flood features of watershed H to C

时期	洪水参数	回归系数		回归可靠性			均值检验		坡度检验	
		a	b	R	P_r	N	F	P_c	F	P_c
砍伐以前	DQ_p	-0.190	0.088	0.91	0.001	78				
	DT_p	2.340	0.830	0.92	0.001	78				
	V_q	-6.180	1.280	0.94	0.001	27				
	CV_p	0.019	0.960	0.69	0.001	27				
	TC	-0.620	1.050	0.90	0.001	28				
砍伐以后	DQ_p	-0.080	0.123	0.95	0.001	303	80.60	0.0005	40.70	0.001
	DT_p	1.550	0.910	0.94	0.001	287	0.41	0.5200	4.98	0.026
	V_q	-2.110	1.310	0.97	0.001	105	7.71	0.0060	0.20	0.650
	CV_p	0.046	1.100	0.84	0.001	104	10.90	0.0012	0.69	0.409
	TC	-0.970	1.020	0.86	0.001	99	2.47	0.1180	0.05	0.815

作为一个示例,这里给出 H 站与 C 站相关分析的结果. H 站以上于 1976-01-05 动工修建林业公路,道路完成于 1977-09-28;从 1977-10 至 1978-03,该区 90% 的森林被清伐,之后人工栽种了杉树苗,到 1990 年基本成林(高 3m). 因此 1976-01 前和 1978-03 后分别为砍伐前期和砍伐后期,1976-02~1977-09 为筑路期. 取砍伐前五年作为一组,砍伐后十年为一个组,1986 年以后作为恢复期,另筑路期和伐木期各为一组,每组含有 20~300 个洪次(与所含时段长度和统计参数有关). 统计结果,在 $P_c = 0.05$ 的显著性水平下,参数 DQ , V_q 和 CT ,伐木后确实发生改变,而参数

表 3 Carnation Creek 洪水径流系数变化检验

Table 3 The variation testing of flood runoff coefficient of Carnation Creek

站	时 期	时 期 起~止	径流系数 CV_p	T-检验	
				N	P
C	砍伐前	1972-1~1976-1	0.467	30	/
	砍伐后 1	1977-1~1978-3	0.560	6	0.228
	砍伐后 2	1978-4~1982-9	0.431	28	0.440
	砍伐后 3	1982-1~1986-9	0.495	52	0.500
	砍伐后 4	1986-1~1990-9	0.430	33	0.370
H	砍伐前	1972-1~1976-1	0.449	29	/
	砍伐后 1	1977-1~1978-3	0.607	7	0.075
	砍伐后 2	1978-4~1982-9	0.538	29	0.129
	砍伐后 3	1982-1~1986-9	0.507	55	0.004
	砍伐后 4	1986-1~1990-9	0.543	33	0.064
J	砍伐前	1975-1~1976-9	0.329	7	/
	砍伐后 1	1978-5~1982-9	0.520	33	0.009
	砍伐后 2	1982-1~1986-9	0.470	39	0.022
	砍伐后 3	1986-1~1990-9	0.447	25	0.064
B	砍伐前	1972-1~1976-1	0.611	33	/
	砍伐后 1	1981-2~1985-9	0.775	51	0.007
	砍伐后 2	1985-1~1990-9	0.605	45	0.910

DT , HC , CT , 则没有明显的变化. 对于 H 站砍伐后的洪峰增量 DQ , 上升 40%, 次洪量 V , 增加 10~15 mm, 洪水径流系数 CV , 增大 20%. 由于修路期很短, 可用的洪次太少, 只有 DQ , DT , 的结果有意义, 即 DQ , 在修路后有显著的增加而 DT , 没有明显的改变. H 站的回归计算和协方差统计结果(表 2 和图 1). 对 J 和 B 站的统计分析也可得到类似的结果. 分析结果表明对 Carnation Creek, 森林砍伐增大了洪峰流量、洪水总量和径流系数, 但是洪水过程形态和雨洪响应时间没有明显的改变. 关于这点可能的解释是伐木后山坡径流的汇流路径并未改变, 伐木后仍然留下基本完整的灌草丛和深厚的有机覆盖物, 壤中流仍然是快速径流的主要成分, 这一结果也与太平洋西海岸其他流域的研究结果一致^[7].

洪水的增大还可用各时期洪水径流系数 CV , 的变化来映证(表 3).

用 T 检验表明, 对照流域 C 的平均洪水径流系数 CV , 在各时期没有发生变化(在 0.1 的显著性水平下), 但对 B, H, J 三个研究站的检验得出, 伐木后 CV , 都有所上升, 一般增大 0.1~0.2, 特别是在紧接伐木后的几年中 CV , 增加最明显, 而在 5a 后的恢复期, CV , 有向伐木前回复的趋势. 这也说明伐木清除了林冠, 减小了降水截留和树木蒸散发, 增大了土壤持水量和落地雨量, 这都会使雨洪径流系数 CV , 上升. 野外地下水位的观测也可映证这一点, 在伐木后, 坡底的地下水位上升了 20~40cm, 地表土壤的含水量明显增加^[1].

对 H~C 站年径流系数的相关分析也发现(图 2), 伐木后的研究区年径流系数明显增

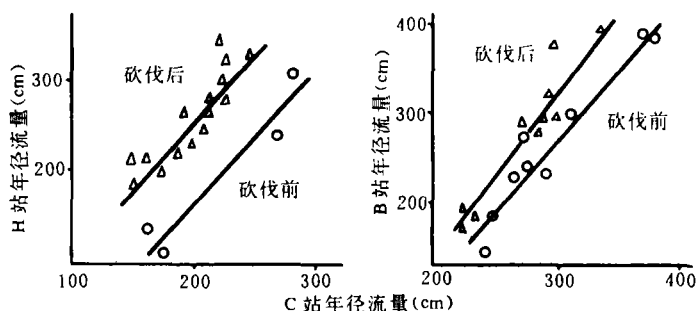


图 2 H 和 B 站相对于 C 站的年径流量关系

Fig. 2 The annual runoff relationship of watersheds H, B versus C

大, H~C 站的年径流关系线抬升达 500mm; 对 B 和 C 两站的年径流相关分析也给出类似的结果, 只是上升的幅度略小(300mm/a).

参 考 文 献

- [1] Hetherington E. A first look at logging effect on the regime of Carnation Creek Experimental watershed. In: Hartman G ed. Proceedings of the Carnation Creek workshop: A ten year review, 1983. 45~63.
- [2] Hetherington E. Carnation Creek, Canada, — review of a west coast fish /forestry watershed impact project. In: Proceedings of the Vancouver Symposium. Forest hydrology and watershed management (IASH), 1987. 531~583.
- [3] 程根伟, 四川盆地河川径流特征与森林的关系探讨, 水土保持学报, 1991, 5(1): 48~52.
- [4] 程根伟, 钟祥浩, 防护林生态效益定量指标体系, 水土保持学报, 1992, 6(3): 79~86.

- [5] Thomas R. B. Problem in the determining the return of a watershed to pretreatment condition. Technique applied to a study at Caspar Creek, California, *Water Resources Research*, 1990, 26(9): 2079~2087.
- [6] Rothather J. Increase in water yield following clear-cut logging in the Pacific Northwest, *Water Resources Research*, 1970, 6(2): 653~658.
- [7] Wright K A et. al. Logging effects on streamflow; Storm runoff at Caspar Creek in Northwestern California, *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1657~1668.
- [8] StatSoft Inc. CSS; Statistica (Volume I, Quick CSS), CSS (Complete Statistic System) user manual, 1991. 10~50.

THE EXPLORATION OF LOGGING IMPACTS ON STORMFLOW CHARACTERISTICS IN WEST PACIFIC COAST WATERSHED

Cheng Genwei

(*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences
& Ministry of Water Conservancy Chengdu 610041*)

Eugene Hetherington

(*Pacific Forestry Centre, Canada Victoria V82 1M5*)

Abstract

In the paper the regression and covariance analysis are used to assess difference in stormflow parameters for both logged and controlled watersheds. A new storm separating method is proposed to deal with multi-peak storm processes. 21 years storm data of Carnation Creek, West Pacific Coast are investigated to explore the logging influences on storm runoff features. The statistic analysis shows that the timber harvesting will significantly increase the peak and volume of stormflow, but does not obviously affect to lag time and the shape of storm hydrograph.

Key words forest-hydrology, storm parameters, statistic analysis