

尖峰岭热带山地雨林生态系统的水文生态效应

陈步峰, 林明献, 周光益, 李意德, 曾庆波

(中国林科院热带林业研究所生环室, 广州 510520)

摘要: 根据尖峰岭热带山地雨林 3 个对比集水区的研究, 天然更新 40a 山地雨林生态系统在 5~9 月份, 蓄养降水资源的 51.8%; 10~翌年 2 月份, 补枯径流量 143.5mm; 特大暴雨的径流响应从 32.7%~62.5%、随系统蓄满程度变化。集水区降雨、径流水体 COD、氨氮、酚、Zn、Cu、Pb、Cd、Ni 的浓度含量远低于地面水环境质量 I 类标准; 山地雨林系统对降雨中氨氮、酚、Pb、Cd、Zn 浓度贮滤强度分别达 23.7%、14.1%、16.3%、25.5%、32.3%、年贮滤流失强度分别为 47.2%、40.6%、42.1%、48.2%、91.8%; 特大暴雨洪峰消减时段变化中, Cu、Pb 流量贮滤达 66.4%、50.3%、Zn 浓度含量贮滤强度在 49%~77.8%、Cd 浓度含量贮滤达 92.9%。天然恢复 40a 山地雨林较人工恢复杉木幼林系统, 台风特大暴雨年的水分循环中, 山地雨林系统年减少泥沙流失量 6.01t/hm², 保存养分 241.5kg/hm², 无台风特大暴雨年, 其减少泥沙流失 0.43t/hm², 保存养分 17.3kg/hm²。显示出热带林极其显著的水文生态功能。

关键词: 热带山地雨林; 涵养水源; 保土保肥; 水质贮滤效应

Ecohydrological effect of tropical mountain rainforest in Jianfengling, Hainan, China

CHEN Bu-Feng, LIN Ming-Xian, ZHOU Guang-Yi, LI Yi-De, ZENG Qing-Bo, (The Research Institute of Tropical Forestry, CAF, Guangzhou 510520, China)

Abstract: According to the comparison research of 3 watershed of tropical mountain rain forest in Jianfengling, nature recovery rainforest ecosystem with 40 years could store 51.8% of rainfall from May to September, and could recruit runoff of 143.5 mm from October to February. At the same time, the response of runoff ranged from 32.7% to 62.5% on heavy rainstorm. Concentration of COD, NH₄⁺-N, phenol, Zn, Cu, Pb, Cd, Ni in precipitation and runoff were lower than the first standard of area water environment in virgin and nature recovering rain forest watershed. And by water cycling, the concentration of NH₄⁺-N, phenol, Pb, Cd, Zn by rainfall input could be cut down by 23.7%, 14.1%, 16.3%, 25.5%, 32.3%, respectively; and 47.2%, 40.6%, 42.1%, 48.2%, and 91.8% of that by rainfall input was effectively stored in the mountain rainforest meanwhile. In the heavy storm process, input-output of microelement has marked changes including that the input of Cu, Pb was stored by 66.4%, 50.3% respectively, and concentration of Cd was decreased by 92.9% after the peak flood; concentration of Zn was decrease range from 49% to 77.8% with all process. comparing the measurement between the nature recovering and Fir young forest system from 1996 to 1997, It has been found that the former could decrease loss of sand and nutrients with 6.01 t/hm² and 245.1 kg/hm² than that of the latter per year as influence of typhoon and super storm. Otherwise the former only decreased loss of sand and nutrients by 0.43 t/hm² and 17.1 kg/hm² respectively than that of the latter per year.

基金项目: 中国林业科学院科学发展基金(9586103)国家林业局九五重点资助项目(定位研究内容 95-36)及 ITTO No. 4 部分内容

收稿日期: 1998-10-10, 修订日期: 1999-09-27

作者简介: 陈步峰(1958~), 男, 副研究员。

Key words: tropical mountain rain forest of Jianfengling in Hainan; self-restraint headwaters; filtration of water quality; holding soil and nutrients

文章编号: 1000-0933(2000)03-0423-07 中图分类号: Q145, Q948 文献标识码: A

尖峰岭热带山地雨林区位于岛的西南部,毗邻南海,是西太平洋及南海台风的西行路径上影响频繁的区域,也是全岛雨量较大的区域。台风属灾害性天气,对陆地产生巨大破坏,它的入侵带来的暴雨与林区山地地形相接,受山体迎风面气流抬升、或因地形引起的辐合上升,加剧上升运动、暴雨加强,因而形成该区域年雨量的主要分量,尤其是高海拔的山地雨林区年雨量相对低海拔林区高近 2 倍。在此环境中,热带山地雨林生态系统成为区域生态平衡的依托,尤其是在抵御台风暴雨及特大暴雨灾害中扮演着不可替代的角色。近年来,人们十分关注热带林的生态效益,但因环境条件变化复杂,系统地量化的研究报道不多。因此,实施了热带林小集水流域对比研究,着重对其在延缓雨季洪峰、补充旱季枯水径流、减少泥沙流失及水质影响方面进行定位监测,并逐步就这方面的研究结果给予报道,以其作为天然林保护工程及热带林可持续经营的依据。

1 试验区自然概况和研究方法

1.1 研究地概况

尖峰岭热带山地雨林实验区($18^{\circ}44'N$ 、 $108^{\circ}50'E$),海拔 800~1100m。属热带季风气候,年平均气温 $19.5^{\circ}C$,临近海域,受热带风暴及台风暴雨影响频繁,年均降水量达 2668.3mm,其中大雨、暴雨量占 50%~70%,年均风速为 1.5m/s,平均相对湿度为 88%。定位观测实验集水区为:山地雨林原始林集水区($S_{面积}=220hm^2$)、天然更新林(40a)集水区($S=3.01hm^2$),植被详见文献[1],皆伐后人工恢复杉木幼林(6a)集水区($S=7.6hm^2$),林分平均高 1.63m,林地覆盖度为 60%。

1.2 研究方法

1.2.1 林外降雨 在各集水实验区,控制圈法设置 4 虹吸日记自记雨量计及 DS100D 电脑雨量记录仪常年观测,控制圈法统计。

1.2.2 总径流量测定 山地雨林原始林集水区:无喉量水槽、分两个水位高度进水(槽口宽 8.0m),测定水头高度范围 3~250cm;月记水位计和 DT-5VW-200 型电脑水位自动记录仪采集数据;天然恢复(40a)山地雨林林集水区:用巴歇尔堰(测大流量)、 90° 和 30.3° 两个镶嵌的 V 型堰(测中、小流量)三级连体测水工程测定总径流,日计水位计采集记录;皆伐人工幼林集水区:设置 $2m \times 0.6m$ 的矩形堰和 $60^{\circ}V$ 型溢流堰相嵌套组合测定工程,日计水位计采集记录。

1.2.3 水样采集 根据降雨量的雨量级分布规律,划分雨量级,分别采集降雨、穿透水、茎流、地表径流和总径流各水样,暴雨以上降雨的各水文要素采峰值前、峰值、峰值后水样的混合样品,对于大暴雨、特大暴雨的各水文要素水样则采时段水样。

1.2.4 水质现场处理 用于分析 COD 、 NH_4^+-N 水样各采 150ml、分别加 H_2SO_4 (浓)使其水样的 $pH < 2$;用于分析酚的水样采 100ml、加 H_3PO_4 使其水样的 $pH < 4$ 、再加 $CuSO_4$ (7~11g/L);用于分析 Cu 、 Zn 、 Pb 、 Cd 、 As 的水样采 1200ml、加浓 HNO_3 (1~2ml/L);水样在 2d 内送至实验室分析。

1.2.5 水样元素的分析方法 COD ,酸性高锰酸钾法; NH_4^+-N ,硼酸吸收、标准酸滴定法;酚,4-安替比琳比色法; As ,银盐比色法; Pb 、 Cd 、 Zn 、 Cu 、 N 、 P 、 K 、 Ca 、 Mg ,原子吸收光谱法(AAS 法)。

1.2.6 集水区流失泥沙量测定 天然恢复山地雨林集水区设置 $4.6m^3$ 泥沙池测定;杉木幼林集水区设置 2 个 $10m^3$ 连体泥沙池和一个 $6.34m^3$ 的梯形泥沙池测定径流输沙量。降雨量 $> 50mm$ 流失沙量每次测定,并采样分析养分含量。

1.2.7 土壤样品采集及分析 采集各集水区山麓、山坡、山谷土壤样品(0~120cm 分 5 层),每层取土 0.5kg,实验室内自然风干,剔除有机残体及石砾,混合、研细并烘干,经玛瑙研钵研细,通过 100 目尼龙筛后烘干供分析。总氮数据用硫酸-重铬酸钾硝化、碱蒸馏法测定;全 P 采用碱融硝化、钼锑抗比色法;全 K 采用碱融硝化、火焰光度计测定。

2 结果分析

2.1 山地雨林生态系统的蓄养水源效应 1995~1996 年实验区受台风暴雨和特大暴雨影响较大,1995 年中发生特大暴雨($P \geq 250\text{mm}$)2 次,雨量为 1065.9mm,占该年雨量 42.5%, $P > 100\text{mm}$ 降雨 2141.1mm/2 次、占年雨量 8.5%;1996 年 $P > 300\text{mm}$ 降雨发生 3 次,雨量为 1580.9mm、占该年降雨的 59.4%,两年中降雨大于 100mm 的雨量大平均占 55.2%,而且特大暴雨出现在 7~10 月份,根据两年降雨径流统计,图 1 给出月平均降雨、产流结果清楚地反映出,5~9 月份,山地雨林生态系统的降水量输入远高出输出 912.4mm,相当每公顷山地雨林生态系统蓄留水量 9124m^3 ,用于森林植被的蒸腾蒸发等生理过程,从 10 月份至翌年 2 月份,山地雨林系统径流输出输入高出 143.5mm 水量,相当于每公顷山地雨林产出 1435m^3 水量,前者为山地雨林生态系统的延缓洪峰、蓄养水源效应,后者则为该系统有效地补充旱季枯水径流即补枯效应;3、4 月份,降雨、径流相差为小,降雨略高于径流;显然,热带山地雨林生态系统的延缓雨季洪峰、补充旱季枯水效应极为显著。

2.2 山地雨林生态系统对降水微量元素的影响

2.2.1 山地雨林系统对降水微量元素含量影响 森林生态系统对降水水质的影响主要表现在森林生态系统的结构、组成体系在水循环的地球化学过程中,对水体化学物质产生了有效的生物化学作用;就对水体属污染元素作用,侧重研究大气降水输入森林生态系统及输出至环境的水质含量变化,从而来衡量森林生态系统的水质影响程度,图 2 是 3a 来对尖峰岭热带山地雨林原始林及 40a 天然恢复山地雨林集水区降雨、径流 46 次测定加权统计结果,其平均浓度含量结果见图 2。

参照 1988 年国家地面水环境质量标准^[2] (GB3838-88 I 类含量(mg/l): $\text{COD} < 15$ 、凯氏氮 < 0.5 、挥发酚 < 0.002 、 $\text{Pb} < 0.01$ 、 $\text{Cd} < 0.001$ 、 $\text{As} <$

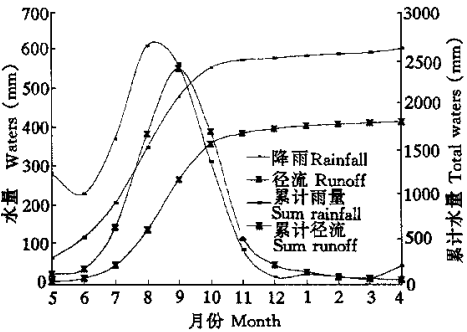


图 1 山地雨林集水区月均降雨、径流分配
Fig. 1 Monthly mean distribution of rainfall and runoff in tropical mountain rainforest (1995~1996)

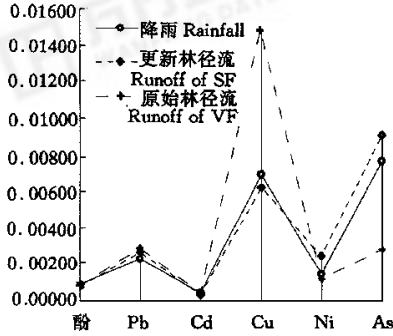
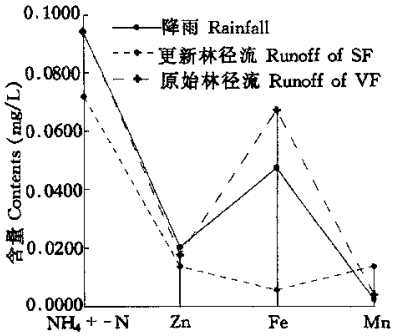


图 2 热带山地雨林小集水区降水径流微量元素含量
Fig. 2 Hydro-chemical contents with rainfall and runoff in tropical mountain rainforest

0.05、 $\text{Cu} < 0.01$ 、 $\text{Zn} < 0.05$ 、 $\text{Fe} < 0.3$ 、 $\text{Mn} < 0.1$),尖峰岭热带山地雨林区降水、径流水体中这些物质的浓度含量远低于 I 类标准含量;降雨通过山地雨林生态系统以径流输出至环境时,水体这些物质含量如图 2,给出了测定结果,天然恢复的山地雨林和原始雨林系统对降水中 COD、氨氮、酚、 Pb 、 Cd 、 Zn 的贮滤强度($C_{\text{降雨}} - C_{\text{径流}} / C_{\text{降雨}}$)分别达到 23.7%、14.1%、16.3%、25.5%、32.3%和持平、10.9%、9.4%、6.4%、12.7%;天然恢复山地雨林系统对 Cu 的贮滤强度达到 10.4%、原始林系统对降雨中 As 的贮滤强度达到

62.7%。天然恢复系统处在向原始林系统演替进展阶段,岩石风化及土壤的化学作用较强烈,对径流 Ni、Mn 和 Fe 元素的增加效应较强,而原始雨林生态系统的物化学循环过程中,降水经雨林生态系统后,水体的质量变得更为纯净,表现出净化机能。

2.2.2 水质物的地球化学变化 伴随着山地雨林系统水循环过程,水体中微量元素的输入输出有着较大的差别,进而可反映山地雨林系统对这些水体化学物质量的影响程度,更清楚的显示出山地雨林生态系统的水质贮滤功能。根据两年的降水、径流量及化学测定,表 1 给出它们数量变化。

表 1 热带山地雨林更新林集水区水循环中水体微量物质流的净变化

Table 1 Net movement of hydrochemical elements combined with water cycling (kg/hm² · a)

项 目 Item	N-NH ₄ ⁺	酚	Pb	Cd	Cu	Zn	Fe	Mn	Ni	As
降雨输入 Rainfall input	2.445	0.0239	0.0831	0.0122	0.180	0.527	1.239	0.0626	0.039	0.199
径流输出 Runoff output	1.290	0.0142	0.0481	0.0063	0.112	0.247	0.101	0.2483	0.0446	0.163
净贮强度 Net store(%)	47.2	40.6	42.1	48.2	37.8	53.1	91.8	-390.4	-110.5	18.1

表 1 反映出,山地雨林生态系统对雨水中 Zn、Cd、NH₄⁺-N、Pb、酚的输出流量有较高储留,对林区居民的水环境质量起到了净化效应,即山地雨林生态系统对水体中(属污染的)微量元素的质流量产生有效贮滤效应,对各元素的贮滤强度为:Fe>Zn>Cd>NH₄⁺-N>Pb>酚>Cu>As;而对于 Mn、Ni 元素,则由于花岗岩母质在长期湿润条下的物理化学作用、酸性土壤的影响^[3],径流输出量远高出降雨输入量,贮滤强度表现负值。热带山地雨林生态系统的这种影响,实质上对水质起到了一种自然净化效果。

2.3 山地雨林生态系统对特大暴雨的水文效应

如上述的统计分析,既然暴雨及大暴雨、特大暴雨是尖峰岭热带山地雨林区年雨量的主要输入源,那么,热带山地雨林生态系统对大暴雨尤其是特大暴雨的水文效应,是山地雨林系统水文生态功能的集中体现^[4],也是研究的关键,本文给出 1996 年 3 次特大暴雨产流分析及首次大暴雨产流微量化学物时段含量测定分析,便于了解热带山地雨林系统对特大暴雨产生的作用机制。

2.3.1 山地雨林系统对大暴雨产流的延缓和蓄贮

山地雨林生态系统抵御暴雨灾害的最大作用是延缓洪峰、减少侵蚀,也是其特有的不可替代生态机能。1996.7.22 暴雨历时 36h,最大降雨强度 55.9mm/h、相应最大产流强度 24.5mm/h,累计雨量 554.9mm,径流深 208.3mm,山地雨林生态系统涵养水源 346.6mm(见图 3 中网格区);当降雨达到 190.4mm/历 16h,产流响应 30%,即累计径流深 36.1mm,反映出系统有效蓄贮水量 154.3mm,此后降雨再达 310mm/历 10h,产流 137.1mm,蓄贮水量 172.9mm,再此后,降雨 53.6mm/历 12h、相应产流 35mm。1996.8.21 暴雨量为 355.3mm/24h,产流量占 32.7%,暴雨历时短、强度大,最大雨强度 73.0 mm/h,最大产流强度 25.2mm/h,山地雨林系统相应延洪蓄水 239.2mm,当雨强达到最大之后,产流强度即时增高。1996 年 9 月 20~23 日大暴雨雨量

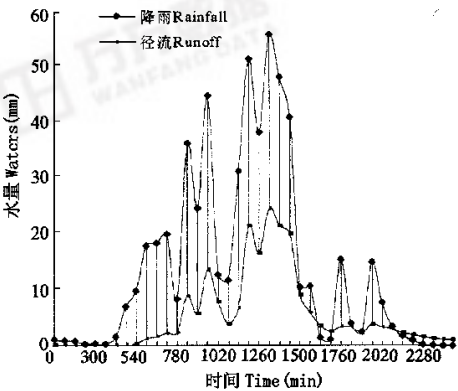


图 3 山地雨林系统对 1996-07-22 特大暴雨产流过程
Fig. 3 Stored process on runoff with heavy storm of mountain rainforest on 22, July 1996

624.1mm/31h,径流深 404.7mm,最大雨强为 27.8mm/h,相应最大产流强度 12.3mm/h,降雨累计达到 153.4mm/17h 时,产流响应达到 30%,由于大暴雨前期雨量多、大暴雨历时长、强度小,山地雨林生态系统表现为蓄满产流数据产流强度相应较小、历史长,累计产流量相对较大,总蓄水量 219.4mm(2194m³/hm²)。比较 3 次大暴雨,山地雨林系统对特大暴雨的有效蓄贮作用主要与前期雨量、暴雨历时、系统的蓄

积水量程度、降雨强度密切相关,反映出随雨季降雨量的增加,山地雨林系统对暴雨的蓄养水源功能逐渐减小(均见图 4 中网格局域)。

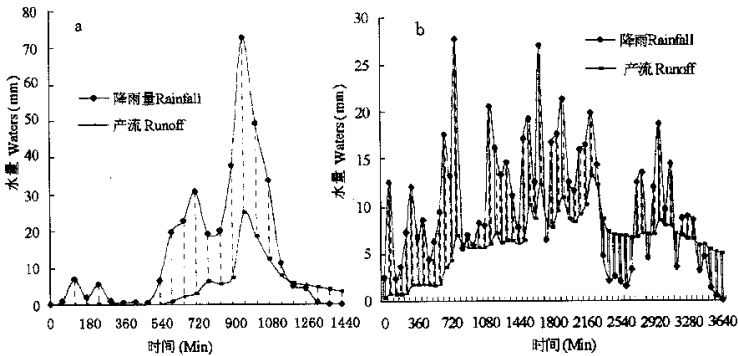


图 4 山地雨林系统对 1996-08-20(a)和 1996-09-20(b)特大暴雨产流过程

Fig. 4 Stored process on runoff with heavy storm of mountain rainforest on 21, Aug. and 20, Sep. 1996

2. 3. 2 山地雨林系统对强暴雨水质影响的时段变化 暴雨水质含量的变化是反映暴雨发生过程、降雨、径流水体化学物质的动态过程,同时也反映出热带山地雨林生态系统对暴雨水文影响的动态特征,固然,在台风暴雨尤其是特大暴雨发生时,测定极度艰难,这里给出首次完整地测定 1996-07-22 特大暴雨及产流水体微量元素含量测定结果。

暴雨、产流是山地雨林生态系统水文循环的两大因素,其微量元素瞬时含量变化也为重要内容,图 5、图 6 给出在 7 月 22 日大暴雨、径流同步时段部分元素变化动态,浓度特征为:Cu 元素在径流初增加时(2:45),雨水含量小于径流含量;初始暴雨峰值后(7:00)径流含量低于雨水;再次暴雨峰值(11:30)时,径流含量又高于雨水;暴雨峰值衰减(16:55)后,径流含量低于雨水含量,暴雨再衰减,径流含量高于雨水含量;系统贮滤在初暴雨峰、再雨峰损失,而最大暴雨径流增量峰值后(16:50)有最大贮滤效应,此时段山地雨林系统净贮滤雨水中 Cu 输入重量(kg/hm²)的 66.41%;Zn 在暴雨径流中时段检测均以径流含量远低于降雨含量,其浓度含量表现为雨林系统贮滤,瞬时贮滤强度分别为 49.0%、65.5%、65.6%、62.2%、77.8%;Pb 元素除在暴雨初峰值后降雨含量低于径流外,其余各检测时浓度含量两者相等,但就 16:55 暴雨最大峰值后,森林系统对其雨水的重量输入贮滤强度较大,达到 50.3%。Cd 在大暴雨径流时段浓度含量检测中,径流初增加时(2:45),雨水含量低于径流,7:00 和 11:30,雨水径流浓度含量相持平,最大暴雨径流峰值后,均为径流含量低与降雨含量,此时段山地雨林系统对其的浓度含量的净贮滤强度最大,均为 92.9%。Ni、Fe 元素在大暴雨径流中,均为雨水含量低于径流含量,这是由于山地雨林系统土壤中背景含量经渗透水淋溶加上岩石中背景含量经风化随径流流失^[5],使暴雨产流中俩元素含量始终大于暴雨雨水含量。上述分析结果表明,山地雨林生态系统对大暴雨水质贮滤效应是显著的,尤其是对暴雨水循环中 Zn、Cd、Pb、Cu 这些水体重金属(属污染物质)元素的贮滤净化效应,以生态系统自身的机能使水体达到净化。

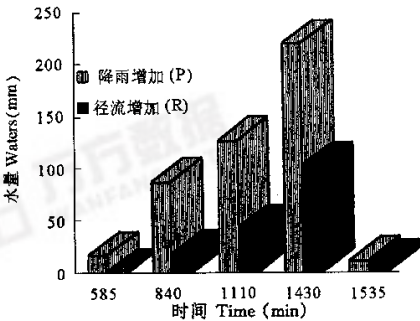


图 5 暴雨洪峰时段增量变化

Fig. 5 Incrasing change of heavy storm and flood in tropical rainforest watershed

2. 4 热带山地雨林生态系统水文过程的保土保肥效应

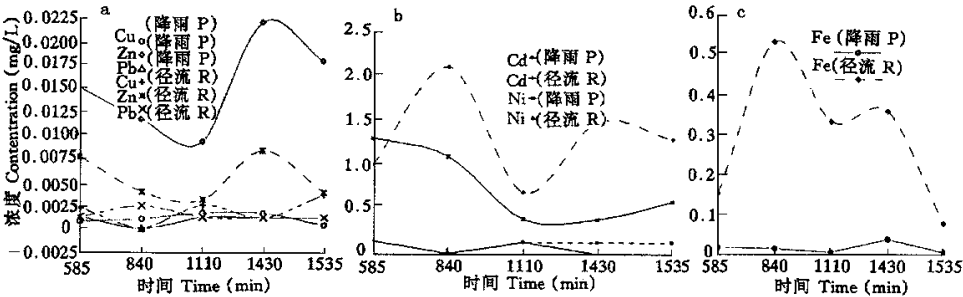


图 6a~c 山地雨林系统 1996-07-22 特大暴雨产流的水质时段变化

Fig. 6a~c Variation of water quality by the times of heavy storm and runoff in mountain rainforest on 22, July 1996

尖峰岭热带山地雨林生态系统的蓄养水源、减少水土流失及水体富养化的效应,是山区经济发展和居民生活所依赖的主要环境生态功能。有效地减少径流携带泥沙输出及土壤养分的损失,对于土地退化以及流域水质富养化,都是极为重要的^[6]。因而,山地雨林生态系统减少泥沙流失及保肥机能是其生态效益的直接监测重点,表 2 给出了热带山地雨林(皆伐后天然更新 40a)及皆伐后人工更新杉木(6a)集水区的定位观测结果。

表 2 结果反映出,伴随着生态系统的水文学过程,山地雨林生态系统在有 3 次台风特大暴雨严重影响的年份,天然恢复 40a 山地雨林系统,其每年每公顷泥沙流失量仅为皆伐后人工恢复 6a 杉木幼林(平均高 1.6m,林地覆盖度 60%)的 1/2.9,即减少泥沙流失量为 6.01t/hm²,可有效保存养分 N、P、K 为 241.5 kg/hm²·a;在无台风特大暴雨年份,山地雨林生态系统泥沙流失量仅仅是杉木幼林的 1/1.5,即年减少泥沙流失 0.43t/hm²,可保存养分元素 N、P、K 为 17.3kg/hm²·a。有与无台风特大暴雨年份的泥沙流失量比值,山地雨林为 4.18 倍、杉木幼林为 7.64 倍,减少泥沙和养分流失量的比值为 13.95 倍,显而易见,台风及导致的特大暴雨大大加大了土壤侵蚀及径流输出损失。

表 2 水文循环中天然更新(40a)山地雨林生态系统较人工恢复杉木(6a)林区的保土保肥效应

Table 2 Comparison on the keeping soil and nutrients with geological process between mountain rainforest and Fir young forest ecosystem

年份 Years	影响因子 Affect factor	集水区 Watershed		减少泥沙流失	保存养分 Stored nutrients			
		泥沙流失 Sand loss(kg/hm ²)		Decreased sand	N	P	K	Σ
		山地雨林 (40a)	杉木幼林 (6a)	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)			
1996	3 次台风特大暴雨 ¹⁾	3298.8	9312.6	6013.8	6.345	0.6615	234.5	241.5
1997	无台风特大暴雨 ²⁾	788.2	1219.1	430.9	0.455	0.0474	16.8	17.3

1) express effect on the typhoon and heavy rainstorm of 3 orders, 2) express no effect of that

3 小结

水文循环结果表明,在 5~9 月份,40a 天然更新的热带山地雨林生态系统可蓄贮降水量的 51.8%,11 月至翌年 2 月份,山地雨林系统补充枯水期径流量 143.5mm,该系统具有显著的涵养水源效应;实验集水区降雨、径流等水质微量元素测定表明,尖峰岭热带山地雨林原始林及天然更新林降雨、径流水体中微量元素的浓度为当地背景值,说明两个山地雨林系统对降水中 COD、氨氮、酚、Pb、Cd、Zn 产生有效的贮滤效应,天然更新林系统贮滤强度分别达到:23.7%、14.1%、16.3%、25.5%、

32.3%,原始林系统为:持平、10.9%、9.4%、6.4%、12.7%。而且,天然更新雨林系统对降雨中 Cu 的贮滤强度达到 10.4%、原始林系统对降雨中 As 的贮滤强度达到 62.7%。径流水 pH 值在 7.11~7.35 之间。

山地雨林生态系统对特大暴雨产流的延缓、蓄贮效应表明,系统对 3 次特大暴雨的水文响应依次为 32.7%、35.2%、62.5%;系统对雨季第一次大暴雨产流量的延缓、蓄贮效应尤为显著,随雨季山地雨林生态系统雨量的增多,降雨产流率增大,该系统的这种效益相应逐渐减小。

山地雨林生态系统对大暴雨微量物质的贮滤效应结果为:对大暴雨 Cu 贮存峰值在最大暴雨径流增量的峰值后,重量贮存 66.4%;对 Zn 的浓度时段贮滤强度在 49%~77.8%之间;对 Pb 重量流量贮滤强度在最大暴雨径流增量的峰值后,达 50.3%,对 Cd 浓度含量贮滤效应最高时段在最大暴雨径流增量的峰值后,贮滤强度均达到 92.9%。这些水体重金属(属污染物质)元素的被森林生态系统贮滤净化,是暴雨产流输出至森林生态系统外环境水质更加优质。

山地雨林生态系统伴随水文过程的保土保肥效应研究结果表明,相对于 6a 生、林地覆盖度 60%的人工杉木林系统,天然更新 40a 的山地雨林生态系统在特大暴雨年,减少泥沙输出 6.01t/hm²,保存养分 241.5kg/hm²;而在无台风特大暴雨年仅减少泥沙流失 0.43t/hm²,保存养分 17.3kg/hm²,两者相差 13.95 倍。由此可见,尖峰岭地区热带林的环境生态效益是极其显著的。

参考文献

[1] 曾庆波,李意德,陈步峰,等著. 热带林生态系统研究及管理. 北京:中国林业出版社,1997. 156~165.

[2] 樊祥熹编. 环境分析. 北京:首都师范大学出版社,1995.

[3] 陈步峰,周光益,曾庆波,等. 热带山地雨林生态系统水文化学循环规律的研究. 林业科学研究,1997,10(2):112~117.

[4] 陈步峰,周光益,曾庆波,等. 热带山地雨林生态系统水文动态特征的研究. 植物生态学报,1998,22(1):70~72.

[5] 陈步峰,周光益,曾庆波,等. 热带山地雨林生态系统的水分生态效应——冠层对暴雨势能的消减、暴雨养分贮存. 生态学报,1997,17(6):635~639.

[6] 陈步峰,周光益,李意德,等. 热带山地雨林生态系统的暴雨水文生态效益. 生态学杂志,1998,增刊:48~52.