

海南岛尖峰岭热带森林土壤水文调节及其经济效益*

卢俊培

(中国林业科学研究院热带林业研究所)

摘 要

本文研究了海南岛尖峰岭热带山地雨林-砖黄壤和半落叶季雨林-砖红壤的土壤水分时期、土壤贮水量及土层渗透水动态,分别提出了水分估算数学模型,据此探讨热带森林土壤水文动态和经济效益,阐明热带森林生态系统对水分的调节功能,是森林公益计量研究的重要组成部分。对森林生态系统研究和合理经营热带林具有重要的学术意义和参考价值。

关键词: 热带林; 土壤水分; 土层渗透水; 数学模式; 经济效益

土壤水文学是土壤学与水文学的交叉或界面学科,水分在土层中的存在形态及其动态变化,是它研究的内容之一。海南岛尖峰岭地区砖红壤和砖黄壤¹⁾的土壤水分、土层渗透水动态及地表径流等已有报道^[1-4],作为续篇,现仅对热带森林土壤水文调节功能及经济效益进行初步分析和探讨。

一、土壤水分贮量及水分时期

尖峰岭地区半落叶季雨林-砖红壤(海拔200m)和山地雨林-砖黄壤(海拔800m)的土壤水分状况,具有山区土壤水分循环属大气 \rightleftharpoons 土壤类型的特点,有明显的垂直带差异和季节波动。根据土壤水分贮量的季节变化规律(图1),大致可以划分出2,3个土壤水分时期,各时期的持续时间、湿度范围和水分形态等特点,砖红壤和砖黄壤各有不同。

砖红壤有三个水分时期:1. 雨季水分涵蓄下渗期。多出现在6—10月,100cm土层内各层的贮水量约 25.5 ± 4.4 mm,重力水下渗侧渗大于上移蒸发,土层上下的差异小,属植物吸收的易效水态,偶有滞水;2. 旱季水分强烈蒸发失水期。多在2—5月,100cm土层内各层的贮水量急剧降至 17 ± 3.9 mm,土壤湿度接近凋萎湿度,甚至上部土层常有小于凋萎湿度的现象,林木出现枯死,土层上下湿度差异明显;3. 交替季节水分上移缓慢蒸发期。多在11—1月,各层贮水量约 20.4 ± 5.3 mm,土层上下保持较低水量的动态平衡,湿度差异较小。

*参加部分观测的有刘其汉、李艳敏、周文龙、曾庆波等,吴仲民帮助电脑计算,在此一并致谢。

1)砖黄壤是按中国土壤系统分类(二稿)标准试改名,即原称的山地黄壤或砖红壤性黄壤、黄色砖红壤性土。

砖黄壤只有两个水分时期。5—11 月为水分涵蓄下渗期,100cm 土层内各层水分贮量约为 $36.2 \pm 4.6\text{mm}$, 土壤孔隙常为水分所饱和, 自由重力水深层渗漏, 转为地下迳流;

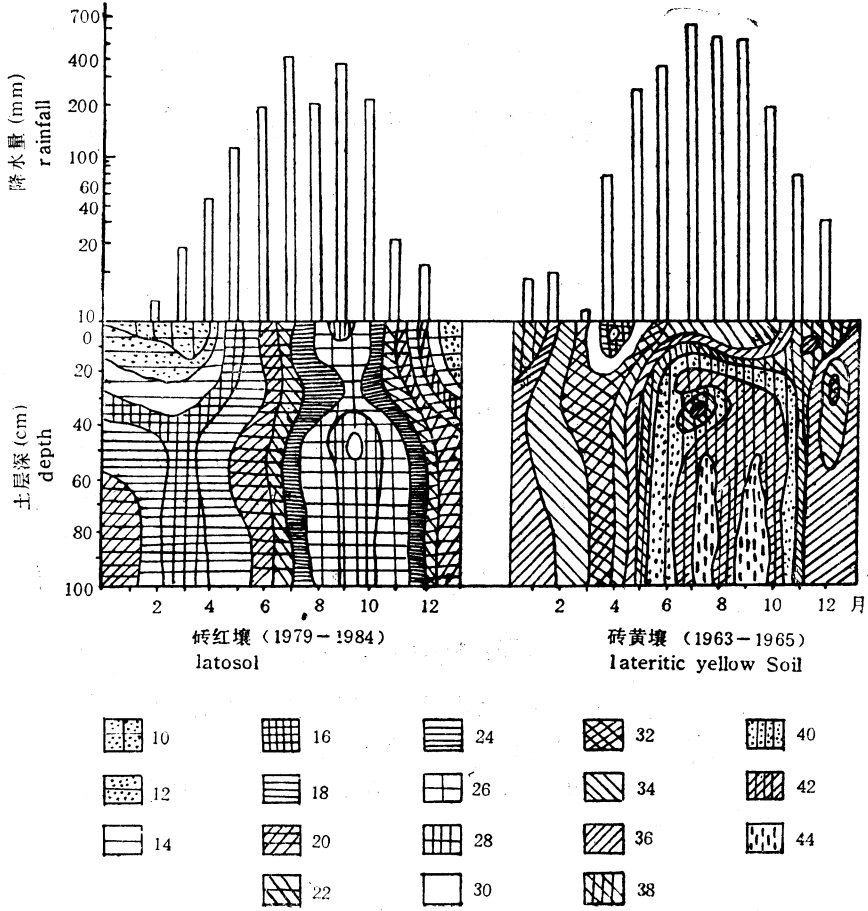


图 1 土壤水分等值线图 (mm)

Fig. 1 The curves of soil moisture(mm)

12—4 月为水分缓慢上移蒸发期,100cm 土层内各层水分贮量 $28.6 \pm 3.3\text{mm}$, 水分蒸发远不如砖红壤强烈, 不形成失水期。

从图 1 和上述水分时期可见, 砖黄壤的水分贮量下限与砖红壤的上限重叠三个级, 而有 10 个高含量级是砖红壤所缺少的, 相反, 砖红壤的水量可低至 10mm, 水分涵蓄下渗期也比砖黄壤短 2—3 个月。这说明山地雨林-砖黄壤体系较之半落叶季雨林-砖红壤体系, 具有更优良的水分涵蓄和调节能力。

二、土壤水分模式

在水分的大气⇌土壤循环中, 土壤水分状况除与植物吸收和土壤性状有关外, 主要受约于气候因子, 尤与降水量、蒸发和气温关系密切, 在不同土层深度和不同季节, 它们之间存在着不同的数学相关。如选择前述三因素, 分别取根系集中的 0—40cm 土层和

主要风化层0—100cm的贮水量,按前述土壤水分时期进行多元回归分析,结果如表1、2。

表 1 土壤水分贮量 (W) 回归分析* (mm)
Table 1 The regression analysis of soil moisture storage(mm)

深度(cm) Depth	时期 Period (Month)	方 程 Equation	R		F		F. _{0.1} F. _{0.05}
			复	偏	方程	变量	
0—40	(1) 6—10	$W=137.2547-0.2927E+0.0345P-0.1030T$	0.7892	E-0.5839 P 0.5514 T-0.0093	11.56> F.01 ^{4.88}	E 10.86 P 9.17 T 1.83	8.03 4.33
	(2) 2—5	$W=62.4885-0.0944E+0.2332P+0.2761T$	0.9493	E-0.2461 P 0.8770 T 0.0375	45.65> F.01 ^{5.43}	E 0.97 P 49.99 T 0.02	8.69 4.55
	(3) 11—1	$W=15.0390-0.4995E+0.3389P+5.2971T$	0.8949	E-0.7305 P 0.7331 T 0.8022	14.74> F.01 ^{6.25}	E 12.59 P 12.78 T 19.85	9.69 4.85
0—100	(1) 6—10	$W=441.3575-0.6287E+0.0701P-4.0628T$	0.7801	E-0.5350 P 0.4818 T-0.1492	10.89> F.01 ^{4.88}	E 8.42 P 6.35 T 0.48	8.03 4.33
	(2) 2—5	$W=133.9654-0.3648E+0.3987P+3.2452T$	0.9206	E-0.3717 P 0.7864 T 0.1772	27.78> F.01 ^{5.43}	E 2.40 P 24.31 T 0.49	8.69 4.55
	(3) 11—1	$W=98.7969-1.2905E+0.7426P+11.8706T$	0.8344	E-0.6706 P 0.6144 T 0.7016	8.40> F.01 ^{6.25}	E 8.99 P 6.57 T 10.67	9.67 4.85

* 气象资料引自曾庆波及热林所气象站。表列为砖红壤的分析结果,砖黄壤的相关不显著,未列出。

表 2 土壤水分贮量与气候因素相关阵
Table 2 Correlation matrix of soil moisture storage to climatic factors

砖 红 壤 Latosol																
	0—40cm, 6—10月				0—40cm, 2—5月				0—40cm, 11—1月							
	E	P	T	W	E	P	T	W	E	P	T	W				
E	1.000				1.000				1.000							
P	-0.052	1.000			0.143	1.000			-0.001	1.000						
T	0.725	0.061	1.000		0.929	0.419	1.000		0.193	0.111	1.000					
W	-0.675	0.444	-0.452	1.000	-0.138	0.910	0.146	1.000	-0.369	0.553	0.575	1.000				
	0—100cm, 6—10月				0—100cm, 2—5月				0—100cm, 11—1月							
	E	P	T	W	E	P	T	W	E	P	T	W				
E	1.000				1.000				1.000							
P	-0.052	1.000			0.143	1.000			-0.001	1.000						
T	0.725	0.061	1.000		0.929	0.419	1.000		0.193	0.111	1.000					
W	-0.699	0.370	-0.538	1.000	-0.225	0.849	0.064	1.000	-0.401	0.491	0.506	1.000				
砖 黄 壤 Lateritic yellow soil																
	0—40cm, 5—11月				0—40cm, 12—4月				0—100cm, 5—11月				0—100cm, 12—4月			
	E	P	T	W	E	P	T	W	E	P	T	W	E	P	T	W
E	1.000				1.000				1.000				1.000			
P	0.192	1.000			0.606	1.000			0.192	1.000			0.606	1.000		
T	0.689	0.399	1.000		0.865	0.668	1.000		0.689	0.399	1.000		0.865	0.668	1.000	
W	-0.342	0.353	-0.095	1.000	-0.168	0.270	0.078	1.000	-0.243	0.364	-0.040	1.000	-0.069	0.378	0.153	1.000

*E、P、W分别为各月蒸发量、降水量、土层贮水量,单位mm, T为月平均气温°C。

表列数据充分反映了砖红壤的水分运动规律。上部土层的水分上移缓慢蒸发期处于低温季节和雨、旱季交替时期，土壤含水量虽同时受约于三因素，相关均极显著，但气温的高低直接影响水分上移蒸发的强度，因而表现了最大的R和F值；旱季强烈蒸发失水期，气温升高，土壤含水量低，降水量的多少自然成为土壤贮水量的唯一限制因素，相关的程度最显著；及至雨季涵蓄下渗期，气温高而稳定，对水分移动的影响差异小，土壤贮水量的多少主要取决于降水与蒸发。随土层加深，各项气候因素对土壤贮水量的影响程度减弱，但相关仍很显著。水分缓慢蒸发期，气温和蒸发的作用明显，而降水的影响相对较小；强烈蒸发期仍为降水量所控制；雨季下渗期同时受降水与蒸发的影响，尤以蒸发极显著，与气温无相关。从复相关系数和相关阵可知，三因素对土壤含水量的综合作用强度，不同土层都表现为强烈蒸发失水期依次大于缓慢蒸发期和涵蓄下渗期，上部土层大于下部土层。各因素与贮水量之间相关的性质不同，降水量呈正相关，蒸发与气温呈负相关（但因相关分析的局限，气温有反常正值出现）。根据表列模式，可以预报类似条件的土壤墒情。

砖黄壤地处常湿润条件，土壤含水量常年均较高，三因素对土壤贮水量的影响与砖红壤相似，但相关均不显著（复相关系数0.5—0.6，F检验 $<F_{0.1}$ ）。这是因为变化差异较小的气候因子作用于常年湿润的土壤必然出现的滞感效应，其可变化范围比半湿润状态的砖红壤小，所产生的水势变化主要在以渗透水表示的重力水，而不是毛管吸持态的土壤吸持水，可见，不同的土壤水分条件对气候因子影响的效果是不同的。相关阵表示，降水量是影响砖黄壤含水量的主要因素，其次是蒸发，气温的作用较小，这与砖红壤的情况也有所不同。

三、土层渗透水

土层渗透水是土壤中重力水汇集的结果，是森林-土壤体系重要的水文学特征和土壤-水文地球化学的重要载体，是森林生态系统生态功能的量度之一。尖峰岭两种森林-

土壤类型的土层渗透水特征，从水文调节的角度图示（图2、3）并简述如下：

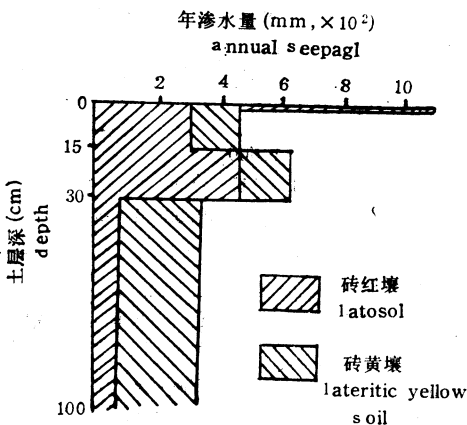


图2 渗透水纵断面图

Fig. 2 Vertical section of seepage

从图2可见，随土层加深，渗水量递减，根系集中的30cm土层，由于根系活动的挤压作用和表面接触效应，改善了土壤通透性，渗透量明显增加。砖红壤的渗透量比砖黄壤的少，土层愈深差异愈大，以100cm土层计，砖红壤的年渗透量只有30.2mm，仅占年降水量的2%，而砖黄壤却高达355.7mm，相当于降水量的16%，为前者的12倍，这与砖黄壤的质地较轻、容重较小、孔隙度较大等性状相一致（表3）。

图3反映了渗水量的动态变化，具有很大的波动性和与降水季节变化的一致性，与土壤水分时期的变化相吻合，雨季土壤水分

表 3 土壤物理性状比较
Table. 3 Soil physical property

类型 Types	深 (cm) Depth	质地 Texture	<0.01mm (%)	容重 Volume weight	孔隙度(%) Porosity
砖红壤 Latosol	0—10	重壤土 Heavy loam	51	1.19	55
	10—20	"	48	1.25	53
	20—30	粘壤土 Clay loam	60	1.31	51
	30—50	重壤土	49	1.37	48
	50—100	粘壤土	62	1.37	48
砖黄壤 Lateritic yellow soil	0—10	中壤土 Medium loam	39	0.97	60
	10—20	"	41	1.18	55
	20—30	"	40	1.25	53
	30—50	"	43	1.33	50
	50—100	"	35	1.35	50

涵蓄下渗期，也就是渗透水的汇集时期，砖红壤多上层渗透，100cm 土层的渗透期仅 4 个月，渗透水产流频度仅 15 次（2年内）。砖黄壤的渗流期可延至 9 个月，两年产流频度增至 53 次，表现了较强的渗透能力和深层渗透的特点。

根据渗透水量的纵向和季节变化规律，可将土层渗透水划分为两个渗水时期，即浅层渗浸期和深层渗流期。渗浸期的渗水特征是：较小深度范围的饱和水向四周非饱和土壤浸润扩散，受地表状况的影响较大，根系、裂隙的干扰也大；深层渗流期的饱和水活动范围大，重力水多纵向移动，但受岩层和半风化层的组成、倾斜度、裂隙等影响，也有侧向渗流，全部汇入地下径流。两类森林-土壤体系的渗水时期明显不同。半落叶季雨林-砖红壤的浅层渗浸期约在 11—6 月，相当于土壤水分的上移强烈蒸发期；深层渗流期在 7—10 月，比土壤水分涵蓄下渗期滞后一个月产流；山地雨林-砖黄壤的两个渗水时期依次在 1—3 月和 4—12 月，深层渗流期比土壤水分涵蓄下渗期延长和提前各一个月，4 月份同时存在上层土壤水分上移蒸发和深层土壤水分下渗，与半落叶季雨林-砖红壤的情况大不一样，深层渗流期多 5 个月。

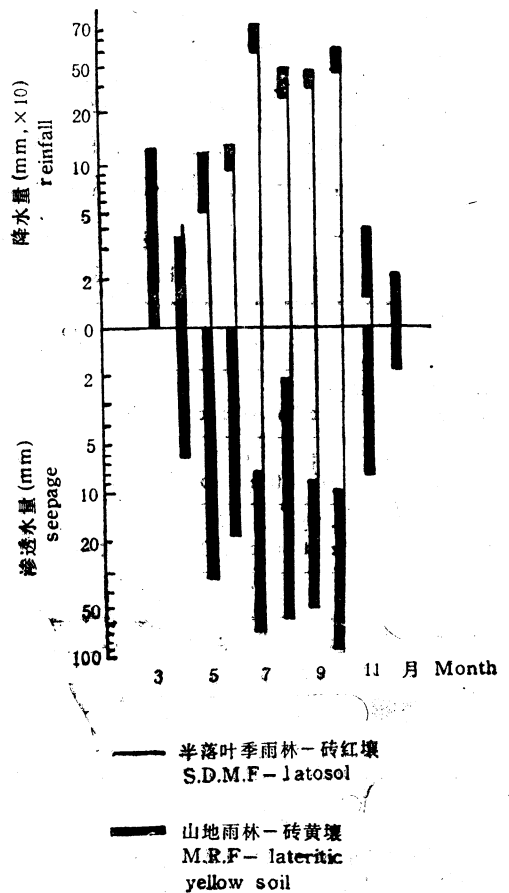


图 3 降水与100cm土层渗透水月变化
Fig. 3 Monthly changes of rainfall and seepage of 100 cm soil layer

土壤湿润状况是渗透水变化的介质基础，在这里得到了证实。

降水是渗透水的物质基础，降水量和雨强直接影响渗透水的形成、移动和数量，它们之间存在着一定的数学关系。相关分析结果说明，上部土层呈极显著的线性正相关，100cm 土层的相关程度，两类土壤有所不同，现将 100cm 土层的分析结果列如下（渗水量 S ，降水量 P ）：

半落叶季雨林-砖红壤：

$$S = 3.7076 + 0.0163P$$

$$n = 15, r = 0.3821, F = 2.22 (F_{0.05} = 4.54)$$

山地雨林-砖黄壤：

$$S = 7.7328 + 0.1192P$$

$$n = 53, r = 0.5240^{**}, F = 19.3 (F_{0.01} = 7.08)$$

根据上列模式，可以参考气象站的降水资料，估算类似条件的土层渗透水量，为评价森林水文调节功能提供参数和预报。

四、土壤水文调节效益分析

根据林地和砍伐迹地及游耕地的对比观测结果，可以从三方面探讨林地土壤水文调节的生态和经济效益。首先是截持地表径流，减少水土流失；其次是涵蓄水分；再次是深层输导水分，补充地下径流。两类土壤的这三种效益，可粗略估算如表 4。

表 4 土壤水文调节效益 ($m^3 ha^{-1} a^{-1}$)

Table 4 Regulating effect of soil hydrology

	砖红壤 Latosol	砖黄壤 Lateritic yellow soil	平均 Mean
地表径流截持效益 Interception effect of surface run-off	2 700	6 500	
100cm 土层水分涵蓄 Water storage of 100cm soil layers	106	136	
100cm 土层水分输导 Water transportation of 100cm soil layers	250	1 060	
合 计 Total	3 056	7 696	5376

注：本估算是在不计森林蒸散，以 100cm 以下土层的涵蓄增量与输导减量互补的假设下作的粗略估算，准确结论有待完善的计量研究

表 4 所列显示，由于森林-土壤体系对降水多层次多项量再分配的结果，使暴雨、洪水缓解为长流细水，提高了降水的有效利用程度和有效期，涵养了水源，为农林业用水及生活生产用水改善了水源条件，发挥了良好的生态效益和社会效益，其中，山地雨林-砖黄壤优于半落叶季雨林-砖红壤。

从经济效益分析，参照国外对森林水文调节经济效益的估算标准（日本 7 日元/ m^3 ，苏联 3—4 戈比/ m^3 ），以山场水价及其产值 0.3—0.5 元/ m^3 计，热带森林土壤水文调节经济效益平均每年约为 1600—2700 元/ha。此外，还有随径流产生的化学流失补偿效益，按营养成分计，平均每年约有 N、P、K 共 600—800kg/ha、有机质 3.6t/ha，

相当于 2 500—3 500kg 化肥和 14t 土杂肥, 约合人民币 1 500—2 000 元。以上水、肥两项总计经济效益约为 3 000—5 000 元, 按林业部门 1979 年森林资源复查的数字, 海南岛尚存热带天然林 39.3 万公顷, 又据报道, 海南岛现有刀耕火种地 300 万亩 (约 20 万公顷), 依此推算, 全海南省森林土壤水文经济总效益每年约为 12—20 亿人民币, 游耕地的年损益不少于 6 亿人民币。以上估算虽非正规计量研究结果, 只是阶段性的部份研究的粗略估算, 但对于宏观分析, 仍不失实, 对于阐明热带森林土壤水文调节经济效益, 至少可见一斑。遗憾的是, 人们对这种潜在的间接经济效益的研究和认识, 都远远不够, 亟待完善和深化。

结 语

尖峰岭砖红壤的土层含水量可分三个水分时期, 即涵蓄下渗期、强烈蒸发失水期和上移缓慢蒸发期; 砖黄壤只有涵蓄下渗和上移缓慢蒸发两个时期, 没有强烈蒸发失水期。土层渗透可分为两个时期, 即浅层渗浸及深层渗流期。砖红壤浅层渗浸为主, 深层渗流期只有 4—5 个月, 砖黄壤的深层渗流期可长达 9 个月以上。山地雨林-砖黄壤比半落叶季雨林-砖红壤具有更强的土层水分涵蓄与输导能力和更优良的水文调节效益。

土层贮水量与同期的蒸发量、降水量和气温之间存在着显著的相关, 所建立的数学模式, 可预测预报土壤墒情。渗透水量与降水量呈线性正相关, 据此可估算深层水文动态。

根据地表径流、100cm 土层水分涵蓄和输导的水量及化学流失量, 估算热带林土壤水文调节的生态效益和经济效益十分明显, 值得重视, 需进一步开展系统的计量研究。

参 考 文 献

- [1] 卢俊培等, 1987: 海南岛尖峰岭游耕农业及森林采伐的生态后果。北京林业大学学报, 9 (4): 348—354。
- [2] 卢俊培, 1988: 海南岛尖峰岭热带林土壤渗透水的初步研究。植物生态学与地植物学学报, 12 (3): 181—188。
- [3] 刘其汉等, 1988: 海南岛尖峰岭半落叶季雨林生态效应的研究, V—土壤水分状况。林业科学研究, 1 (4): 367—375。
- [4] 卢俊培等, 1984: 海南岛尖峰岭半落叶季雨林生态效应的研究 I—地表径流水的化学特征。热带林业科技, (3): 1—9。
- [5] 李云森译, 1983: 森林水文学 (日)。中国林业出版社, 79—101。
- [6] 中国林业科学研究院科技情报研究所编译, 1983: 国外森林公益效能计量研究, 27—37, 54—56。
- [7] A. A. 罗戴著, 1964: 土壤水。科学出版社, 239—285, 340—383。
- [8] 曾水泉等, 1986: 海南岛刀耕火种迹地的生物地球化学和生态环境质量的研究。中山大学学报 (自然科学版) (7): 55—67。

REGULATION OF SOIL-HYDROLOGY AND ITS
ECONOMIC EFFECTS OF THE TROPICAL FOREST
IN JIANFENGLING, HAINAN ISLAND, CHINA

Lu Junpei

(The Research Institute of Tropical Forestry, CAF)

Abstract

This paper deals with the relationship between the soil water period of both tropical mountain rain forest-lateritic yellow soil and semi-deciduous monsoon forest-latosol, storage capacity of soil water and the climatic forest in Jianfengling, Hainan Island. A model evaluated soil water and the seepage dynamics of soil layers were put forward. On the basis of experiment, study was made on the soil-hydrology dynamics of the tropical forest and its economic effect, explaining tropical forest ecosystem to regulating function of water which are an important element on study of the quantitative forest public welfare and have an important academic meaning and reference value on the study of forest ecosystem and rational management of tropical forest.

Key words: Tropical forest; Soil water; Mathematic model;
Seepage water of soil layer; Economic effect