

# 土地利用方式对红壤坡地雨水利用 和水量平衡的影响研究

宋颖帕<sup>1,2,3</sup>, 谢小立<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院 亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. CERN 桃源农田生态系统国家科学观测研究站, 湖南 桃源 415700)

**摘要:** 通过红壤坡地 5 种典型土地利用方式的长期定位观测研究, 剖析了不同利用方式对雨水利用和水量平衡的影响。(1) 荒草区常年水分消耗稳定茶园区和恢复区对土壤深层贮水利用能力强, 表明不同的土地利用类型对土壤水分利用特征随季节和深度不同而不同; (2) 土壤蒸散是各区 100 cm 耕作层中水量平衡最主要的支出项(83%以上), 农作区蒸散量最小, 地表径流量最大, 恢复区则相反; (3) 从减少水土流失和提高水分利用率两者结合考虑, 构建农林复合系统以及间作、套作、撩壕等耕作方式为红壤坡地最优的雨水资源利用模式。

**关键词:** 红壤坡地; 不同利用方式; 雨水利用; 水量平衡

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2009)03—0097—06

中图分类号: S157.2, X171.3

## Impacts of Different Landuse Patterns on Rainfall Utilization and Water Budget of Sloping Land in Red Soil Region

SONG Ying-pa<sup>1,2,3</sup>, XIE Xiao-li<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. National Observation Station of Taoyuan Agroecology System, Taoyuan, Hunan 415700, China)

**Abstract:** Based on fixed field observation for five typical landuse modes, this paper analyzed the effects of different landuses on its rainfall utilization and water balance. The main results were reported as follows. (1) The difference laws of steady soil water consumption in grassland and a higher ability in sufficient use of water stored in deep soil layer in tea garden and the restoration area showed the characteristics of soil water utilization in different landuse patterns were different with different seasons and soil layers. (2) Evapotranspiration hold more than 83% of input (rainfall), which was the most important output part of water balance in 100 cm plough layer. Evapotranspiration on cropland was the lowest and runoff on it was the highest, but those in the restoration area were reverse. (3) An optimal model of rainfall utilization on sloping land in red soil region must be constructed for reducing surface runoff and improving the utilization rate of rainfall, so the compound management of cropping-forestry-herbage and the tillage methods of broad base terracing would be the best choice.

**Keywords:** sloping land of red soil; different landuse patterns; rainfall utilization; water budget

红壤丘岗缓坡地是我国重要的后备耕地资源, 该区雨热资源丰富, 生物多样性高, 农业生产力具有很大潜力。但由于红壤物理特性不佳, 加之水热分配不均以及不合理的利用, 造成水土流失严重, 生态环境恶化。因此水资源的合理调蓄与水土协调问题是该区发展的重要制约因素<sup>[1-2]</sup>。降水是红壤坡地最主要的水源, 坡地雨水管理则是该区水资源调配的重要环节<sup>[3]</sup>。

以往众多的研究从各个角度论证红壤坡地不同利用方式的生态效应, 得出梯田和顺坡的种植对坡地土壤物理性质的较大影响<sup>[4]</sup>, 以及不同植被对坡地雨水产流、入渗及分配的影响<sup>[5-6]</sup>等, 而采用各种土地利用方式下植被与耕作方式的结合, 通过分析它们之间的雨水利用能力而剖析各利用方式下水量平衡的定量差异从而更合理解决该区的水土资源问题鲜见报道。

收稿日期: 2008-09-01

修回日期: 2008-11-12

资助项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX3-SW-441)

作者简介: 宋颖帕 (1984—), 女 (汉族), 陕西省铜川市人, 在读研究生, 研究方向为农业环境与农田生态。E-mail: muyeshmily@163.com。

通信作者: 谢小立 (1958—), 男 (汉族), 湖南省长沙市人, 研究员, 研究方向为生态系统过程管理。E-mail: xlx@isa.ac.cn。

鉴于此,本文对频现降雨条件下不同土地利用方式的雨水利用特性和水量平衡进行对比研究,以揭示各利用方式下雨水运移差异及水量均衡关系,旨在为区域制定水土保持措施和优化农业生产结构提供科学依据。

## 1 研究区概况

中国科学院桃源农业生态试验站位于湖南省桃源县漳江镇宝洞峪村,属武陵山区向洞庭湖平原过渡的丘岗地带(111°27' E, 28°55' N),海拔 92.2 m ~ 125.3 m,是红壤地区典型的低丘岗地。该区属中亚热带季风气候区,年均气温 16.5℃,年日照时数 1 520 h,地区多年平均降雨量 1 440 mm,最大降雨量为 2 276.6 mm,最少年降雨量为 902.6 mm,降雨量主要集中在 4—7 月,约占全年降雨量的 45% 以上。当地土壤类型以第四纪红土发育的红壤为主,黏粒 (< 0.002 mm) 含量 40% 左右,有效水库容较低。

植被为武陵山植被区系,主要植物种有湿地松 (*Pinus elliottii* Engelm), 马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb), 楠竹 (*Phyllostachys heterocycle*), 油茶 (*Camellia oleifera* Abel), 柑橘 (*Citrus reticulata* Banco), 杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 以及狗尾草 (*Setaria viridis* Beauv) 等。

1995 建于试验区的标准径流观测场<sup>[7]</sup>(表 1),坡度为 8°~ 11°,模拟南方 5 种典型土地利用方式,建成投影面积均为 0.1 hm<sup>2</sup> (即 20 m × 50 m) 的小区,进行南方红壤丘岗区农业生态系统的长期定位监测。作为原位土回填,坡面土层厚度大于 1.5 m,土壤总空隙度为 46.0%, 0~ 20, 20~ 40, 40~ 80, 80~ 120 cm 土壤容重分别为 1.29, 1.35, 1.41, 1.40, 1.43 g/cm<sup>3</sup>。

各小区四周用水泥板围成以防区内径流交换,并设有独立的径流测量系统,测定区内地表水径流和泥沙、有机物流失量。

表 1 红壤缓坡地不同利用方式长期定位试验设计

土地利用类型	植被类型	处理方式	灌溉方式
桉柑区	常绿灌木	梯土撩壕, 3 m × 3 m 栽种桉柑, 常规管理	雨水
茶园区	常绿灌丛	梯土撩壕, 条植茶树	雨水
农作区	轮作农作物	梯土不撩壕, 每年栽种 2 茬旱作物, 常规管理	雨水
荒草区	茅草	每年 5 月和 10 月将地表植被拔除并移出试验区	雨水
恢复区	自然植被演替	建场时清除地表植被, 停止干预, 植被自然恢复	雨水

## 2 研究方法

选取径流场内桉柑区、茶园区、农作区、荒草区以及恢复区为研究对象。

从农业或植物生理角度出发,农田水量平衡一般只是考虑耕作层的水分平衡<sup>[8-9]</sup>,可用下式表示(单位:mm)。

$$S + P + I = D + R + C + E + T + W \quad (1)$$

式中:  $P$ ——降雨量(mm),通过集水区内标准气象观测场(AMRS-1 气象幅射自动观测系统)的观测数据;  $R$ ——地表径流量,为记载降雨起止时间及每一降雨过程(间歇超过 12 h)产生径流量,周年连续监测,最后将径流流量除以小区面积换算为径流深(mm);  $W$ ——土壤储水变化量,  $W(\text{mm}) = W_2 - W_1$ 。  $W_1, W_2$  分别为具体某一时间的土壤储水量。

一般而言,  $C$  为植被截留量,仅占降雨量的 3% ~ 12.5%<sup>[10]</sup>,而对于各个林木或灌木系统,植物冠层截留没有下降到土壤就直接从冠上蒸发掉了,所以可以将土面蒸发量、植物冠层截留量和植物叶面蒸腾

量统称为蒸散量  $E_T$ <sup>[11]</sup>;又红壤地区地下水埋藏较深,则在 100 cm 的土体范围内,一般无地下水补充项  $S$ ,渗漏量  $D$  微小<sup>[11]</sup>;雨养农业不进行灌溉,灌溉量  $I = 0$ ;所以水量平衡可以简化为。

$$P = W + E_T + R \quad (2)$$

式中:  $P$ ——降雨量通过集水区内标准气象观测场(AMRS-1 气象幅射自动观测系统)的观测数据(mm)。

地表径流量  $R$  为记载降雨起止时间及每一降雨过程(间歇超过 12 h)产生径流量,周年连续监测,最后将径流流量除以小区面积换算为径流深(mm)。

各小区右侧不同坡位,(坡上 2 梯、下 2 梯和坡中梯各一根),埋设中子管,用于测定 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 100 cm 深度土壤含水量。用中子水分仪监测所得土壤体积含水量(3—10 月,每 5 d 一次,11 月到次年 2 月间隔 10 d,如遇降雨则测量增加 1 次)来计算 0—100 cm 土体贮水量:

$$W(\text{mm}) = \sum (V_i \times h_i)$$

式中:  $V_i$ ——土壤某一层体积含水量;  $h_i$ ——土

壤层次厚度 (mm);  $i$ ——土壤层次。土壤储水变化量  $W(\text{mm}) = W_2 - W_1$ 。式中:  $W_1, W_2$  分别为具体某一时间的土壤储水量。

为避免坡位对土壤水分变化的影响, 分别将 5 个径流区不同坡位测点相同深度的土壤含水量平均后进行分析。各小区蒸散量测定应用水量平衡法, 即蒸散量  $E_T = P - (R + W)$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 降水资源态势

根据站区内 1999—2007 年实地观测结果, 试验区雨水资源丰富, 8 a 平均降雨量为 1 626.72 mm, 丰沛的雨水保证了系统内年周期水分的运移及交换。由大气降水与潜在蒸发量为指标可得 (图 1), 降水集中分布于 4—7 月, 约占全年降水量的 43.1%。系统内的年大气蒸发量占年降雨量的 52%, 而 7—9 月的强蒸发时期降雨量仅占年降雨量的 28.6%, 同时年降雨量变异系数较高, 蒸发量的年际变异系数最高仅为 27.1% (1999—2007 年)。多变的单峰型降水和稳定的双峰型大气蒸发相结合, 使当地雨水资源优化利用成为亟待解决的问题。

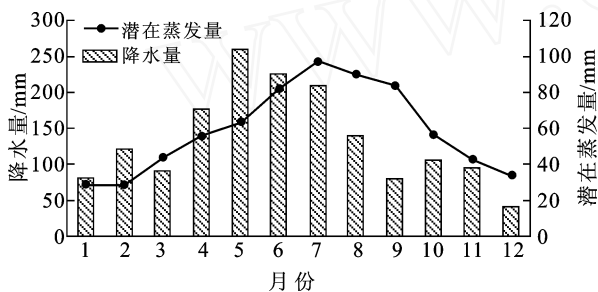


图 1 1999—2007 年研究区降雨—蒸散分配特征

依据当地年平均降水量划分的丰水年、欠水年及平水年的标准<sup>[12]</sup>可知, 在试验区长期观测的 8 a 中, 有 6 a 为平水年, 因此选择年降雨量为 1 468.1 mm 的 2003 年的各项观测资料来分析。

#### 3.2 降雨分配与土壤水分变化

降雨落到土壤表面, 会有大量的水分沿着土壤内的孔隙入渗到土壤内部形成土壤水<sup>[13]</sup>。而土壤水分动态是指土壤水势或水分含量随着时间发生的变化, 它受到气象、土壤及土地利用类型等因素的影响<sup>[14]</sup>。由以上分析可知, 地表所接收到的 1 468.1 mm 的降雨中, 各利用方式下地表径流系数分别为 6.68% (柑), 6.01% (茶), 16.5% (农), 5.42% (草), 2.50% (恢复)。可以看出, 地表径流所占雨水分配比例较小, 绝大部分的降雨入渗到土壤中, 经过再分配和转移。根据谢小立等人对该试验区坡地雨水产流的研究<sup>[5, 12]</sup>, 该 5 种土地利用方式的地表径流量随降雨量季节变化明显, 不同植被类型径流量存在统计学上的显著差异, 季节变化特征以及各土地利用类型的入渗能力与产流能力差异较大, 因此不同土地利用方式对土壤水分总量在时间和空间分配上会产生较大影响。

3.2.1 植被生长期降雨与土壤贮水量变化规律 根据土壤水分垂直变异特性<sup>[15]</sup>, 将土壤剖面划分为上层 0—50 cm 和下层 50—100 cm 两个层次。图 2 表示了生长期不同层次土壤贮水量的日变化规律。在植被生长初期 (3 月初至 5 月中旬) 100 cm 内各小区土壤水分变化幅度小, 均保持高含量的稳定状态; 在生长季节中期 (5 月中旬至 7 月下旬), 土壤贮水受到降雨影响而变化明显, 各小区土层处于失水和补水的高频波动中; 植被生长旺季 (7 月下旬至 10 月中旬), 各小区土层贮水量直线降低幅度为一年中最大时期, 虽有少量降雨补充但各区强烈的蒸腾和土壤蒸发使得土层又迅速失水。

2003 年 3—10 月降雨量 1 186.2 mm, 但降雨分配不均 (表 2), 土壤高耗水时段 8—9 月份降水极少 (137.2 mm), 导致当年整个生长期土壤水分含量大幅下降, 椴柑区和农作区土壤贮水量分别减少了 26.0 mm 和 25.7 mm, 荒草区减少了 39.7 mm 而茶园区和恢复区减少量分别为 50.7 mm 和 52.0 mm, 可见降雨量大小及其分配直接影响土壤水分消耗量。

表 2 不同土地利用方式土壤贮水量月变化

地类	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	平均
椴柑区	- 5.33	17.00	- 11.00	- 1.36	- 18.97	- 11.33	3.67	1.33	- 3.25a
茶园区	- 9.33	19.00	- 10.00	- 7.00	- 21.33	- 20.67	6.67	- 8.00	- 6.33a
农作区	- 6.67	18.00	- 11.67	- 4.00	- 22.67	- 20.00	20.33	1.00	- 3.21a
荒草区	- 5.00	14.33	- 9.33	- 5.33	- 17.33	- 19.67	8.00	- 5.33	- 4.96a
恢复区	- 4.50	16.00	- 11.00	- 1.68	- 34.32	- 18.50	5.00	- 3.00	- 6.5a
降雨量	106.10	243.10	252.30	184.10	231.90	47.10	90.10	31.50	

注: 每个处理间相同字母表示方差分析下无显著性差异。

但 4 月和 7 月,降雨量相差仅 11.2 mm,土壤贮水变化量却截然不同,7 月温度高,植被生长旺盛,蒸发蒸腾强烈,需水量大,该时期降雨多为历时短强度大的暴雨,易形成径流、入渗相对较少,导致各种利用方式下土壤失水,而 4 月情况则相反。表明土壤水分的有效利用需得到丰富降雨和高耗水时期吻合的保证。

3.2.2 不同植被土壤水分利用时空差异 不同土地利用方式土壤贮水量盈亏差异较大。虽然对 5 种利用方式下土壤贮水量变化做多重比较发现它们之间不存在显著性差异(表 2),但恢复区在 3—6 月土壤贮水量值比其它小区稍小,而 7—10 月失水量最大,因为该时段恢复区林木、灌木及草本新陈代谢快,蒸腾作用强,需消耗大量水分;其它月份恢复区植被生长放缓,其茂盛的叶片和空间交错的多种植物,减少地表土壤水分蒸发,维持了较低的失水量或高的盈水量;茶园区在 3—6 月土壤失水量最大,是由于茶树在该时段较其它植被生长速度快,加快了土壤水分的利用;荒草区的失水途径主要为土壤蒸发导致土壤贮水变化为 4 月蓄水量最小,7 月失水量最小。

不同植物种类其根系分布的范围以及延伸的深度决定了植物对于土壤水分的利用深度存在着很大差异,那么不同深度土壤水分的变化特征,将会反映出不同植被对土壤水分的利用状况。根据图 2,0—50 cm 和 50—100 cm 两个土层贮水变化虽然趋势相同,但 5 种利用方式下,上层土壤贮水量变化曲线波动剧烈,变动幅度大于下层。各小区生长期内上层失水量为下层的 2.6 倍(柑),1.6 倍(茶),3.2 倍(农),2.5 倍(草),和 1.6 倍(恢复)。

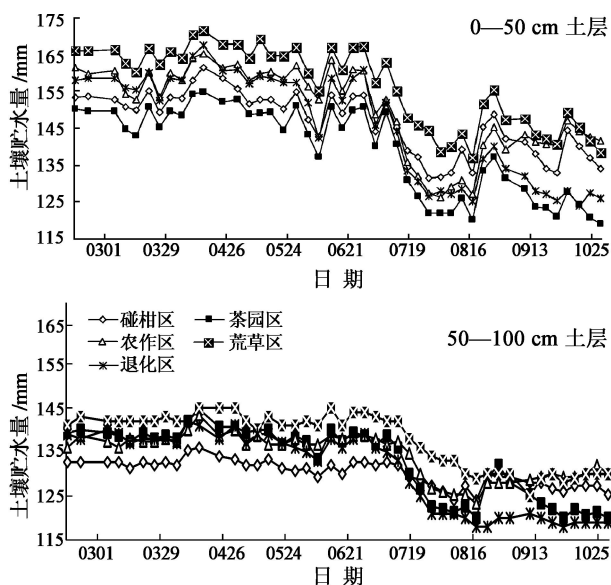


图 2 不同土地利用方式生长期土层贮水量日变化

下层恢复区和茶园区贮水量曲线变化幅度较大。结合表 2 中 0—100 cm 和土地利用方式下月土壤贮水变化量可得,茶园和恢复区的植被利用土壤水分利用深度比其它三者深,导致茶园和恢复区土壤深层耗水和整个土层耗水均最大。表明了由根系分布决定的植被利用不同深度土壤水分的能力不同:0—50 cm 深度是椪柑、农作物和荒草的主要吸水层,而茶树利用土壤水分的深度可达 100 cm;同时恢复区的幼林、灌丛及草本的良好结合,使各个层次的水分得到充分利用。

### 3.3 不同利用方式对系统蒸散的影响

降水为土壤和植被系统提供消耗所需水分,气象条件以及植被覆盖是土壤蒸散的主导因素。通过农田土壤水量平衡公式可以求出土壤—植被蒸散量(表 3)由于各月的降雨量不同,5 种土地利用方式下不同的月份系统蒸散量差异很大,呈不均匀分布。相关性分析表明,蒸散量与降雨量呈极显著正相关,相关系数分别为  $r_{柑} = 0.9737$ ,  $r_{茶} = 0.9848$ ,  $r_{农} = 0.9765$ ,  $r_{草} = 0.9924$ ,  $r_{恢复} = 0.9687$  ( $r_{0.01} = 0.708$ ,  $f = 12$ ),说明了降雨量越大,土壤蒸散耗水越多,但降雨量越少,土壤蒸散耗在系统水分收入中占的比例越大。并且各利用方式下生长期土壤蒸散量占年度总蒸散量的 83% 以上,占该时段内降雨量的 95% 以上,意味着土壤蒸散是 100 cm 耕作土层中系统水量最大输出项。

方差分析表明,5 种利用方式下,农作区蒸散量与茶园区、恢复区和荒草区蒸散量有显著性差异 ( $P = 0.05$ ,  $F = 2.233$ ),茶、柑、草和恢复各区蒸散量无统计学上显著差异,但恢复区和茶园区在 3—10 月土壤蒸散量较柑区和荒草区大,其它月份与后两者相当,茶园区 11—12 月蒸散量为最小。

由于植物的生长节律和叶面积指数会影响不同利用方式下的系统蒸散强度,并且根据 6—9 月茶园区、椪柑区和农作区土壤蒸发和植被蒸腾实测显示<sup>[16]</sup>,8—10 月生长期末茶园植被蒸腾量是茶园的 4 倍左右,而土壤蒸发仅为其 3/4,且茶园区的叶面指数约为椪柑区的 3.4 倍,因此茶园区蒸腾耗水多,土壤蒸发耗水少,而椪柑区相反,可能在一定程度上弱化了两者在系统蒸散上的差异。农作区由于农作物覆盖度很小,在生长期内系统蒸散量为最低;而恢复区林木郁闭度达到 0.8 以上,茂盛的植被在生长期需要大量水分作为生产性消耗而支出。

### 3.4 水量平衡分析

水量平衡是通过通过对水分的收入和支出项进行定量分析系统内降雨在土壤和植被中再分配状况的规

律。系统的实际输出和降雨输入并不是总相等的,输出大于降雨量或小于降雨量时的剩余或超支水量来源便是土壤系统贮水的变化。若将土壤贮水量变化看作系统的失水量或者输入量<sup>[17]</sup>可得表3的5种利用方式下土壤水量平衡关系。从表3可以看出,5种

利用方式下各时期总收入水量与总支出比例。实际支出水量与实际收入水量比例均接近1,说明各利用方式下的水量平衡是在绝大多数年份是一种补给和收支项目中可变动的动态平衡。依此可知这5种土地利用方式在红壤坡地雨水资源化利用上是可行的。

表3 不同利用方式下土壤水量平衡

月份	处理	收入/mm			支出/mm				蒸散 系数/%	径流 系数/%	贮水 变化率/%
		降雨量	土壤贮水 减量	总收入	蒸散量	地表径流	土壤贮水 增量	实际支出			
1—2	柑	191.1	—	191.1	168.90	18.20	4.00	187.10	88.38	9.52	2.09
	茶	191.1	—	191.1	170.70	14.40	6.00	185.10	89.32	7.54	3.14
	农	191.1	—	191.1	158.60	26.50	6.00	185.10	82.99	13.87	3.14
	草	191.1	—	191.1	173.23	13.20	4.67	186.43	90.65	6.91	2.44
	恢复	191.1	—	191.1	181.90	5.20	4.00	187.10	95.19	2.72	2.09
3—6	柑	785.6	0.70	786.30	731.10	55.20	—	786.30	93.06	7.03	0.09
	茶	785.6	7.33	792.93	745.03	47.90	—	792.93	94.84	6.10	0.93
	农	785.6	4.33	789.93	661.33	128.60	—	789.93	84.18	16.37	0.55
	草	785.6	5.33	790.93	746.13	44.80	—	790.93	94.98	5.70	0.68
	恢复	785.6	1.18	786.78	763.08	23.70	—	786.78	97.13	3.02	0.15
7—10	柑	400.6	25.30	425.90	404.40	21.50	—	425.90	100.95	5.37	6.32
	茶	400.6	43.33	443.93	422.43	21.50	—	443.93	105.45	5.37	10.82
	农	400.6	21.33	421.93	339.83	82.10	—	421.93	84.83	20.49	5.33
	草	400.6	34.33	434.93	415.43	19.50	—	434.93	103.70	4.87	8.57
	恢复	400.6	50.82	451.42	444.12	7.30	—	451.42	110.86	1.82	12.69
11—12	柑	90.8	—	90.8	80.27	3.20	7.33	83.47	88.40	3.52	8.08
	茶	90.8	—	90.8	69.63	4.50	16.67	74.13	76.69	4.96	18.36
	农	90.8	—	90.8	78.03	5.10	7.67	83.13	85.94	5.62	8.44
	草	90.8	—	90.8	74.70	2.10	14.00	76.80	82.27	2.31	15.42
	恢复	90.8	—	90.8	70.30	0.50	20.00	70.80	77.42	0.55	22.03
总计	柑	1 468.1	26.00	1 494.10	1 384.67	98.1	11.33	1 482.77	94.32	6.68	0.77
	茶	1 468.1	50.67	1 518.77	1 407.80	88.3	22.67	1 496.10	95.89	6.01	1.54
	农	1 468.1	25.67	1 493.77	1 237.80	242.3	13.67	1 480.10	84.31	16.50	0.93
	草	1 468.1	39.67	1 507.77	1 409.50	79.6	18.67	1 489.10	96.01	5.42	1.27
	恢复	1 468.1	52.00	1 520.10	1 459.40	36.7	24.00	1 496.10	99.41	2.50	1.63

结合表2和表3可知,不同利用方式水量平衡各分量的比例差异很大:农作区年径流量最高,径流系数最大(16.5%),恢复区最小(2.5%),径流量与降雨量变化规律同步;恢复区土壤蒸散量最大,农作区最小,土壤蒸散受到植被生长节律、温度等多重制约,表明单一的农作物蒸发蒸腾量虽小,但地表径流量大,容易造成水土流失,对雨水利用效率低,恢复区幼林、灌木及草本等的结合在大大减小地表径流的同时增加入渗量保证了植被需水高峰的大量土壤蒸散的支出;荒草区蒸散系数在年内各时期变化不大,可见荒草区土壤水分支出主要去向为土壤蒸发到达大气,同时该区径流量较小,表现草被对坡地径流的抑制作

用<sup>[15]</sup>;柑桔区由于植被植株间距大,覆盖度低,对径流的减弱作用不如条植密度大的茶园区和草被覆盖的荒草区,说明植被的条植以及密度对地表径流减少明显,可增加降雨入渗量。

## 4 结论

(1) 在频现的平雨年中,不同植被条件下,红壤坡地地表径流均较小(最大的农作区地表径流系数为5.62%~20.49%),绝大部分降雨须通过土壤水分再分配。不同的植被对100 cm土层贮水量的影响随季节和深度的不同而不同,荒草区土壤蓄水或失水年内较为稳定,茶园区和恢复区在植被生长旺季水分消耗

很快,并且茶树和自然恢复植被对深层水分利用率更高。

(2) 各利用方式下土壤蒸发和植被蒸腾以大气形式返还的水量是 100 cm 土层水量平衡中的主要支出项目,其比例高达 82% 以上;降雨量越大,土壤蒸散耗水越多,相同降雨条件下,农作区蒸散量最少,恢复区最大,桤柑区、茶园区和荒草区相近;地表径流恢复区最小,农作区最大,其余三者接近。

(3) 各土地利用方式不同的水分支出比例为红壤坡地雨水的利用配置提供依据。农作区地表径流较大,可为坡底其余系统单元的集蓄利用提供水量来源;条植撩壕的茶园是缓坡地利用的良好模式,桤柑区可在秸秆覆盖或活物覆盖下减弱土壤蒸发,增加生产性供水;林灌、林农的间套混作可使多种植物形成互补共生的群落,分层利用不同时空水分,减弱地表水土流失,缓解旱情,进一步提高系统生产力。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 张斌,张桃林. 南方东部丘陵区季节性干旱成因及其对策[J]. 生态学报, 1995, 15(4): 413-419.
- [2] Zhang Bin, Zhang Taolin, Zhao Qiguo. Soil Erosion of Varming Systems in Subtropical China [J]. Pedosphere, 1996, 6(3): 224-223.
- [3] 刘昌明,何希吾,任鸿遵. 中国水问题研究[M]. 北京:气象出版社, 1996.
- [4] 柳云龙,胡宏涛. 红壤地区地形位置和利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 22-26.
- [5] 彭娜,谢小立,王开峰,等. 红壤坡地降雨入渗、产流及土壤水分分配规律研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 17-20.
- [6] 张莉. 红壤坡地土壤水分入渗与再分布规律的研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2004.
- [7] 谢贤群,王立军. 水环境要素观测与分析[M]. 北京:中国标准出版社, 1991.
- [8] Grema A K, Hess T M Water balance and water use of pearl millet-cowpea intercrops in north east Nigeria[J]. Agric. Water Manage. 1994, 26: 169-185.
- [9] Shanboltz V O, Younos T M. A soil water balance model for no-tillage and conventional till systems[J]. Agric. Water Management. 1994, 26: 155-168.
- [10] 何园球. 红壤农业生态系统水分、养分循环特点及资源的合理利用[C]//王明珠,张桃林,何园球. 红壤农业生态系统研究(2集),南昌:江西科学技术出版社, 1993: 216-223.
- [11] 熊顺贵. 基础土壤学[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2001: 114-116
- [12] 谢小立,王凯荣. 红壤坡地雨水地表径流及其侵蚀[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 839-845.
- [13] 余新晓,赵玉涛,张志强,等. 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 15-19.
- [14] 党坤良. 秦岭火地塘林区不同林地土壤水分动态特征的研究[J]. 西北林学院学报, 1995, 10(1): 1-8.
- [15] 王晓燕,陈洪松,王克林,等. 不同利用方式下红壤坡地土壤水分时空变化规律研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 110-113.
- [16] 王晓燕,陈洪松,王克林. 红壤坡地不同土地利用方式土壤蒸发和植被蒸腾规律研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 41-45.
- [17] 申卫军,彭少麟,周国逸,等. 鹤山丘陵草坡的水文特征计水量平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2): 162-168.

(上接第 96 页)

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-421.
- [2] 朱冰冰,李鹏,李占斌,等. 子午岭林区土地退化/恢复过程中土壤水稳性团聚体的动态变化[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2008, 36(3): 124-128.
- [3] Rattan L. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century [J]. Soil Science, 2000, 165: 191-207.
- [4] 丁文峰,丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团聚体分形特征[J]. 地理研究, 2002, 21(6): 700-706.
- [5] 苏静. 宁南地区植被恢复对土壤团聚体稳定性及碳库的影响[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2005.
- [6] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85.
- [7] 李阳兵,谢德体. 不同土地利用方式对岩溶山地土壤团聚体结构的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 123-125.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京:科学出版社, 1978.