

# 三峡库区坡耕地粮经果复合垄作 对土壤水分特征的影响

廖晓勇<sup>1,2</sup>, 罗承德<sup>2</sup>, 陈治谏<sup>1</sup>, 王海明<sup>1</sup>, 田道平<sup>3</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 四川农业大学, 四川 雅安 625014;

3. 达州市土壤肥料站, 四川 达州 635000)

**摘要:** 减缓、减轻干旱的发生与危害是三峡库区坡耕地持续利用的关键。在坡度15°标准径流小区, 以聚土垄作和农林复合为基本方法, 营建坡耕地粮经果复合垄作模式, 并对模式的土壤水分状况进行了长期定位观测。2002~2005连续4年试验结果表明, 粮经果复合垄作能有效改善坡耕地土壤结构, 利于土壤保持适宜的透水性 and 持水性, 土壤有效库容扩大了145.2 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>; 同时, 增加了土壤贮水, 提高了贮水利用率, 尤其是底层贮水利用率, 比较平作对照, 贮水库容和贮水利用率分别增大了5.73%、5.32%; 此外, 垄沟拦蓄了地表径流, 减少径流损失达74.18%~95.81%, 有利于降水入渗补给及旱季底墒的保护。

**关键词:** 粮经果复合垄作; 土壤水分特征; 坡耕地; 三峡库区

**中图分类号:** S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)05-0075-05

三峡库区以山丘坡地为主, 山地丘陵约占总面积的96.2%, 现有耕地资源中65.5%为旱坡地, 坡度>25°的耕地占46.0%<sup>[1]</sup>, 土层<25 cm的坡耕地占58.0%<sup>[2]</sup>。由于坡耕地主要分布于坡度较大、灌溉不便的低、中山区, 无水源保证, 加之耕作管理比较粗放, 因而土地干旱和退化问题突出, 生产力不高, 严重制约着三峡库区旱作农业的可持续发展。减少地表水流失, 提高土壤保蓄及供给水分能力, 充分、合理利用水资源, 提高土地生产潜力, 已成为库区坡地农业研究的重要问题之一<sup>[3-4]</sup>。坡耕地粮经果复合垄作是水保效益好, 经济效益高, 且广泛适于三峡库区坡耕地的利用模式<sup>[5]</sup>。本文参考前人经验<sup>[6-11]</sup>并通过定位试验观测, 研究了粮经果复合垄作的土壤水分动态变化特征, 以期揭示其抗旱机制, 从而为有效利用土壤水资源, 合理布局种植业结构, 发展三峡库区旱作农业生产服务。

## 1 试验地概况

试验地位于中科院万州典型区生态环境监测重点站(E108°30', N30°46'), 海拔265 m, 属亚热带湿润季风气候区, 年均气温17℃, 年日照时数1400 h, 年降雨量1100 mm, 年无霜期320 d, 成土母岩为侏罗系沙溪庙组砂泥岩, 土壤为灰棕紫泥土。

## 2 试验处理与方法

2001年在2个标准径流试验场(坡度15°, 土层厚度>90 cm, 面积20 m×5 m, 边界为石砌水泥砂浆抹面)分别布设不同试验处理。①粮经果复合垄作(T): 1.5 m为垄、1.0 m为沟聚土筑垄, 沟内按株行距2.0 m×2.5 m等高密植柚树, 树下覆盖玉米秸秆, 垄上复合作小麦-花生粮经作物。②平作对照(CK): 小麦-花生粮经作物顺坡平作。

在粮经果复合垄作小区的2个垄上、2个沟内分别布设1个采样点, 同时, 在对照小区对应的坡面位置分别布设1个采样点。2002~2005年每月10日、25日采用烘干法测定一次0~15、15~30、30~60 cm层次土壤水分含量, 雨日顺延一天。2005年采用环刀浸水法测定0~15、15~30、30~60 cm层次土壤容重、孔隙度, 用湿筛法测定水稳性团聚体含量, 用渗透筒法测定土壤渗透速率和渗透系数<sup>[12]</sup>。记录并累计每次降雨产生的径流量, 计算坡耕地单位面积的地表径流量。

## 3 结果与分析

### 3.1 粮经果复合垄作对土壤基本物理性状的影响

坡耕地粮经果复合垄作改善了土壤结构, 主要体现在土壤容重、孔度、水稳性团聚体等指标的改

收稿日期: 2008-03-17

基金项目: 中科院成都山地所前沿项目(1100001007); 中科院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-07); 国务院三峡委办公室资助项目(SX2001-021)

作者简介: 廖晓勇(1971—), 男, 四川自贡人, 副研究员, 在职博士生, 主要从事土壤学、农业生态学研究。E-mail: liaoxiong@163.com。

通讯作者: 罗承德(1946—), 男, 重庆綦江人, 教授, 主要从事森林土壤学研究。E-mail: lcdya@163.com。

良。由表 1 可见,粮经果复合垄作(T)4年后,垄土 0~15、15~30、30~60 cm 土层容重分别比平作对照(CK)相应土层容重减少了 6.72%、12.08%、2.37%,孔度分别增加了 10.41%、13.24%、3.48%,尤以中层(15~30 cm)的土壤容重、孔度变化明显。据此计算,土壤有效库容每公顷扩大了 145.2 m<sup>3</sup>。粮经果复合垄作的沟土经过深耕、有机肥施入、绿肥(豌豆)种植及秸秆覆盖等土壤熟化培肥措施,土壤结构亦有了变化,特别是表层(0~15 cm)容重比平作对照下降了 2.99%,孔度增加了 6.96%。从水稳性团聚体含量来看,粮经果复合垄作垄土的中层高于表层,这是由于“中层培肥”的效

应<sup>[13]</sup>;而平作对照的中层作为犁底层,紧实度过大,结构稳定性较差,其水稳性团聚体含量低于表层,成为水分运移的障碍。

以大雨后二天排除了重力水的田间实测值表示田间持水量(表 1),结果表明以粮经果复合垄作沟土最高,平作对照次之,垄土较低;从剖面分布来看,平作表层略有滞水,与其犁底层的托水性有关,垄土则较为均匀,沟土介于其间。另一方面,干旱时田间实际的凋萎湿度因受作物根系利用率影响,以平作底层略高,垄作底层较低,说明平作底层部分贮水难于为作物利用,或者说平作土壤水库的“死库容”较垄作为大,影响其抗旱能力。

表 1 土壤物理性状

Table 1 Soil physical properties

小区 Plot	采样点 Sample point	土层 Soil layer depth (cm)	容重 Volume weight (g/cm <sup>3</sup> )	孔度 Porosity (%)	水稳性团聚体 Water-stable aggregate (%)		田间持水量 Field capacity (%)	凋萎湿度 Wilting moisture (%)
					5~2 mm	2~0.25 mm		
T	垄 Ridge	0~15	1.25	52.70	11.94	13.54	22.15	8.61
		15~30	1.31	50.72	17.45	15.24	20.97	9.47
		30~60	1.65	37.74	—	—	18.54	9.70
	沟 Furrow	0~15	1.30	51.05	10.35	15.38	25.54	8.38
		15~30	1.51	44.43	6.87	11.52	25.62	10.22
		30~60	1.61	39.25	—	—	25.51	10.37
CK	0~15	1.34	47.73	12.24	15.88	23.83	8.52	
	15~30	1.49	44.79	10.71	11.08	20.05	10.36	
	30~60	1.69	36.47	—	—	19.70	10.55	

### 3.2 粮经果复合垄作对土壤水分特征的影响

粮经果复合垄作,一是以立体的连续植被替代种收相间的断续植被,在垄上免耕留茬、沟内深耕秸秆覆盖(或种植绿肥、牧草),增强了覆盖能力,减少了水分蒸发,防止了暴雨直接冲击表土形成土壤结皮阻碍水分入渗;二是采用垄沟相间、以垄护沟,沟内筑挡的网格状体系,使坡地的斜坡集水面积划整为条块,坡长减小,变坡面汇流为垄沟分散截流,使径流缓慢入渗,补充下层贮水,减少了径流损失,增加了有效降水的比例;三是“中层培肥”改善了土壤结构进而改善了降水的人渗状况,有利于土壤保持适宜的透水性和持水性<sup>[14]</sup>。

3.2.1 粮经果复合垄作对土壤贮水库容特性的影响 参考前人研究工作<sup>[15-16]</sup>,本文采用土壤贮水库容、贮水调用率、贮水利用率等指标来表征土壤贮水库容特性。其中:

土壤贮水库容是按各年田间最大水分贮量平均计,即  $W_{\max} = \sum_i B_i P_i h_i$ ,式中,  $W_{\max}$  为最大贮水;

$B_i$  为重量含水量;  $P_i$  为容重;  $h_i$  为土层厚度,  $i$  为土层序号。

土壤贮水调用率 = (年贮水最大值 - 最小值) / 最大贮水量 × 100。

土壤贮水利用率 = (生育期贮水最大值 - 最小值) / 最大贮水量 × 100。

统计 2002~2005 年 0~60 cm 土层内土壤贮水库容(表 2),粮经果复合垄作垄土的库容平均为  $1881.91 \pm 102.98 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,变异系数 5.47%,沟土平均为  $2601.70 \pm 307.61 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,变异系数 11.82%,平作对照平均为  $2120.23 \pm 192.59 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,变异系数 9.08%,可见,粮经果复合垄作的贮水优势主要分布在沟带,其贮水库容变幅相对大,表明接受来水的机会多,吞吐量较大,与平作对照的贮水库容相比大 22.71%;而垄土贮水库容相对变幅小,最为稳定,这与其易于排除重力水的“疏水性”有关,虽然其贮水库容比对照小,但由于垄沟共同存在,因而复合垄作的贮水库容比对照大 5.73%,

平均为 $2\ 241.81 \pm 205.04\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

表2 土壤贮水库容状况

Table 2 Soil water storage capacity properties

小区 Plot	采样点 Sample point	贮水库容 Water storage capacity ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )				
		2002年	2003年	2004年	2005年	均值 Average
T	垄 Ridge	1886.40	1796.60	1926.75	1917.90	$1881.91 \pm 102.98$
	沟 Furrow	2645.35	2339.80	2723.30	2698.35	$2601.70 \pm 307.61$
	垄沟平均 Average	2265.88	2068.20	2325.03	2308.13	$2241.81 \pm 205.04$
CK		2109.65	1967.35	2213.1	2190.82	$2120.23 \pm 192.59$

比较不同年份土壤贮水库特征(表3),土壤贮水量的低值点远不如高值点稳定,其相对变幅约为50%,主要受干旱程度影响,故年际间土壤贮水的调用率主要受贮水低值点控制。早情较重的2003年土壤贮水的调用多于早情较轻的2002年、2004年、2005年,可见越是干旱的年份,土壤贮水的调用就越多,这表明土壤抗旱力的基础在于土壤贮水。而不同试验处理土壤贮水调用率则主要取决于贮水高

值点。由于平作对照最大贮水量高于粮经果复合垄作垄土,故通常平作对照调水率高于垄土(2002年、2004年、2005年),但进一步比较可知,平作对照在早情较重年份(2003年)土壤贮水调用率低于垄土,而在早情较轻年份(2002年、2004年、2005年)土壤贮水调用率却高于垄土,说明其土壤贮水利用不尽合理。

表3 土壤贮水库特征

Table 3 Soil water storage capacity properties

小区 Plot	采样点 Sample point	最大贮水量(mm) Water storage quantity Max				最小贮水量(mm) Water storage quantity Min				贮水调用率(%) Soil moisture transfer ratio			
		2002年	2003年	2004年	2005年	2002年	2003年	2004年	2005年	2002年	2003年	2004年	2005年
		T	垄 Ridge	188.64	179.66	192.68	191.79	93.01	50.48	105.22	108.51	50.69	71.90
	沟 Furrow	264.54	233.98	272.33	269.84	109.58	57.82	115.67	127.25	58.58	75.29	57.53	52.84
CK		210.97	196.74	221.31	219.08	101.26	59.67	109.38	118.82	52.00	69.67	50.58	45.76

### 3.2.2 粮经果复合垄作对土壤贮水利用的影响

粮经果复合垄作的垄土孔度大,其贮水能力低于沟土和平作对照,表现出排渍效应,但其保蓄降水的能力并不低,能提供较多的可利用水分,可调用移动较缓慢的底层贮水,因而在干旱期其水分利用率高,表现出较强的抗旱能力。垄土的含水特性可归纳为夏季较丰,而冬春干旱季较差,常低于对照,但其仍能支持强大的生物量的消耗,实质上是在垄上提高了土壤贮水的利用率。以小麦对土壤贮水的利用率为例(表4),0~60 cm 垄土为72.59%,平作对照为67.27%,垄土比平作对照高5.32%,尤其在30~60 cm 土层内小麦对垄土贮水的利用率为69.59%,比对照高8.69%。这与小麦根系分布状况密切相关。垄土小麦根系密集层分布在0~22.8 cm,根系活跃层达35.6~37.9 cm 深度,根系可下伸至45~55 cm 范围内,而平作的小麦根系密集层分布在0~16.6 cm,根系活跃层仅至18.5~21.5 cm,根系也仅下伸至30~42 cm 深度。可见垄土结构的改善,

导致了土壤中小麦根系分布层的变化,有利于小麦根系主体下伸较深,且各层界限均下展,根密度也较大,从而提高了小麦对底层贮水的利用率;而平作对照的中层作为犁底层,紧实度过大,限制了小麦根系下扎利用底层贮水。

### 3.2.3 粮经果复合垄作对土壤贮水补充的影响

土壤抗旱的基础在于土壤底层贮水,而底层贮水量的多少取决于前期降水量及降水的有效入渗。粮经果复合垄作由于网格状水保体系减少了地表径流损失而增加了有效降水的比例,由图1可见,比较平作对照,粮经果复合垄作减少地表径流损失量达74.18%~95.81%。粮经果复合垄作由于聚土筑垄措施改善了土壤的一系列物理特性,渗透速率和渗透系数均高于平作对照(表5),改善了降水的入渗状况,对土壤底层贮水具有显著的补充效应。表6列举了几次大雨后一天降水在土壤剖面的再分布情况,可以认为粮经果复合垄作的沟土是主要下渗带,其底层贮水因与垄土连通可补充垄土底层贮水,垄、

表 4 小麦对土壤贮水的利用率  
Table 4 Soil moisture utilization ratio of wheat

采样点 Sample point	土层(cm) Soil layer depth	最大贮水量(mm) Water storage quantity Max	最小贮水量(mm) Water storage quantity Min	贮水利用率(%) Soil moisture utilization ratio
T(垄 Ridge)	0~15	62.67	14.52	76.83
	15~30	60.83	17.41	71.38
	30~60	64.02	19.47	69.59
	0~60	187.52	51.40	72.59
CK	0~15	63.01	18.03	71.39
	15~30	74.36	23.09	68.95
	30~60	60.33	23.59	60.90
	0~60	197.70	64.71	67.27

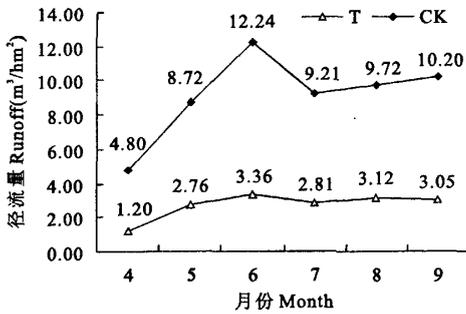


图 1 2004 年地表径流状况

Fig.1 Surface runoff properties in 2004

沟的水分剖面分布较为均匀,不存在水分入渗的障

碍层,土壤底层贮水能得到有效补充;而平作对照水  
分剖面在 30 cm 处出现一跃变层,说明其处存在犁  
底层障碍,限制了降水入渗,常导致雨季降水滞积  
于表层,既难于补充底墒,又加剧无效蒸散,还因超  
渗产流强化径流损失,造成水资源浪费。

表 5 土壤渗透状况

Table 5 Soil percolation rate and permeability coefficient

小区 Plot	采样点 Sample point	渗透速率 Permeation rate (mm/min)	渗透系数 Permeability coefficient (K 10°C)
T	垄 Ridge	14.02	12.54
	沟 Furrow	11.57	7.98
CK		11.04	6.91

表 6 雨后第一天土壤水分的剖面分布 (%)

Table 6 Soil moisture distribution in soil profile in the first day after rain

土层 Soil layer depth (cm)	2002年6月25日 June 25, 2002			2003年5月19日 May 19, 2003			2003年9月21日 September 21, 2003			2004年8月1日 August 1, 2004		
	T(垄) T(Ridge)	T(沟) T(Furrow)	CK	T(垄) T(Ridge)	T(沟) T(Furrow)	CK	T(垄) T(Ridge)	T(沟) T(Furrow)	CK	T(垄) T(Ridge)	T(沟) T(Furrow)	CK
0~15	21.80	25.24	22.53	24.32	26.81	24.97	22.14	25.03	21.98	20.05	22.38	21.11
15~30	20.11	23.12	20.12	22.18	29.04	23.06	20.98	22.54	21.22	19.40	21.69	21.02
30~60	19.56	24.67	17.44	20.70	28.11	19.55	18.84	23.67	17.76	18.83	21.05	17.24
备注	2002年6月21~24日连续降雨45.9 mm With a continuous rain of 45.9 mm from June 21~24			2003年5月14~18日连续降雨135.9 mm With a continuous rain of 135.9 mm from May 14~18			2003年9月20日降雨95.6 mm With a rain of 95.6 mm on September 20			2004年7月31日降雨33.2 mm With a rain of 33.2 mm on July 31		

### 4 结论

1) 坡耕地粮经果复合垄作有效改善了土壤结构,土壤容重比平作对照减少了 6.72%,孔度增加了 10.41%,有效库容扩大了 145.2 m³/hm²,尤其“中层培肥”效应显著,有效改善了土壤的渗透性和

贮水性。

2) 坡耕地粮经果复合垄作的垄沟网格体系拦蓄了地表径流,减少地表径流损失达 74.18%~95.81%,增加了有效降水的比例,对土壤底层贮水具有显著的补给效益。

3) 坡耕地粮经果复合垄作的垄土贮水稳定,水

分利用率高,能提供较多的可利用水分,可调用移动较缓慢的底层贮水;而沟土贮水优势明显,库容变幅大,接受来水的机会多,吞吐量大,比较于平作对照,垄沟贮水库容和贮水利用率分别增大了5.73%、5.32%。

#### 参考文献:

- [1] 席承藩,徐琪,马毅杰,等.长江流域土壤与生态环境建设[M].北京:科学出版社,1994.87—107.
- [2] 向万胜,梁称福,肖润林.三峡库区坡耕地利用与水土保持种植制[J].长江流域资源与环境,1998,7(3):254—259.
- [3] 陈国阶,徐琪,杜榕桓,等.三峡工程对生态与环境的影响及对策研究[M].北京:科学出版社,1995.15—25.
- [4] 郑度,申元村.坡地过程及退化坡地恢复整治研究——以三峡库区紫色土坡地为例[J].地理学报,1998,53(2):116—122.
- [5] 廖晓勇,陈治谏,刘邵权,等.三峡库区粮经果复合垄作技术效益评价[J].水土保持学报,2003,17(2):37—40.
- [6] 李军健,吕刚,黄建国.紫色土旱坡地土壤水分时空分布特征[J].西南农业大学学报(自然科学版),2006,28(1):161—164.
- [7] 熊亚兰,魏朝富.西南丘陵区坡地土壤水分的时空变异[J].土壤通报,2006,37(1):22—26.
- [8] 徐学选,刘文兆,高鹏,等.黄土高原丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨[J].生态环境,2003,12(1):52—55.
- [9] 彭娥,蒋定生,刘梅,等.降雨在凸—凹形坡上再分配规律探讨[J].水土保持学报,1989,3(2):36—44.
- [10] 庄季屏.四十年来的中国土壤水分研究[J].土壤学报,1989,(3):241—248.
- [11] 李同阳,张先婉.一种丘陵旱地的新耕作法——聚土免耕法[J].西南农业学报,1988,1(2):25—28.
- [12] 李映强.土壤物理学实验指导书[R].重庆:西南农业大学,1990.1—8.
- [13] 陈实,李同阳,张先婉.再论聚土免耕的中层培肥[J].山地研究,1996,14(增刊):55—58.
- [14] 张志田.旱地麦田保护性耕作对土壤水分状况的影响研究[J].土壤通报,1995,26(5):200—203.
- [15] 郭凤台.土壤水库及其调控[J].华北水利电力学院学报,1996,17(2):72—80.
- [16] 张先婉,李仲明.旱地聚土免耕耕作法研究[M].北京:科学出版社,1991.2—15.

## Soil moisture character of agro-forestry and contour ridge tillage technique of slope cropland in Three Gorges Reservoir Area

LIAO Xiao-yong<sup>1,2</sup>, LUO Cheng-de<sup>2</sup>, CHEN Zhi-jian<sup>1</sup>, WANG Hai-ming<sup>1</sup>, TIAN Dao-ping<sup>3</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China; 3. Dazhou Soil and Fertilizer Station, Dazhou, Sichuan 635000, China)

**Abstract:** Slope cropland plays an important role in the agricultural economy in the Three Gorges Reservoir Area, and its soil moisture losses and seasonal droughts bring a pressure on the sustainable development of agriculture. On the basis of contour tillage of wide ridge and furrow covering and agro-forestry, a mode is set up for compound ridge culture in slope cropland and a long-term observation is carried out on its moisture character in Wanzhou Eco-environment Station of the Chinese Academy of Sciences in 2002~2005. It was shown in the five years' experiment that this technique is effective in improving the soil physical character, reducing the soil moisture losses, increasing effective soil water content and raising the soil moisture availability coefficient.

**Keywords:** agro-forestry and contour ridge tillage technique; soil moisture character; slope cropland; Three Gorges Reservoir