

旱作农田微集水种植产流蓄墒扩渗特征研究*

李永平¹, 贾志宽², 刘世新¹, 韩清芳^{2*}

(1. 固原市农业科学研究所, 宁夏 固原 756000; 2. 西北农林科技大学干旱半干旱农业研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 在宁南不同生态区的旱作农田, 对秋作物和多年生牧草——紫花苜蓿设置不同微集水种植带型, 系统测定生长期和非生产期不同时段和不同部位的土壤蓄水增墒效应、产流效率、蓄墒效率、垄沟系统产流入渗特征等。分析结果表明: 秋作物和苜蓿牧草采用微集水种植, 能显著提高农田蓄水增墒保墒作用; 作物生长期微集水种植较露地种植方式0~2 m土层多增蓄水分78.0~136.7 mm, 其中非生产(休闲)季节同层多贮水量24.8~49.2 mm; 土壤蓄墒期微集水种植蓄墒率达到43.3%~62.4%, 提高蓄墒效率51.0%~83.7%。

关键词: 微集水种植; 产流效率; 蓄墒率; 入渗特征; 宁南山区

中图分类号: S343.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)02-0086-05

宁夏南部山区(宁南山区)包括固原地区6县及同心、盐池南部, 总面积3.11万km², 占全区总面积60%, 耕地58.5万hm², 占宁夏耕地面积的72.4%, 其中旱地占94%; 人口约190万, 占全区人口的48%, 其中回族人口占自治区回族人口的一半以上。本区属典型的农牧交错区, 农业生产的主要特点是水资源短缺, 旱灾严重, 自然灾害频发, 耕地以丘陵坡耕地为主, 广种薄收。存在的主要社会经济问题是农田单产低, 区域粮食难以自给; 水土流失严重, 生态环境脆弱; 资源掠夺利用, 经济落后, 投入强度低, 农业发展后劲严重不足。

随着我国西部大开发战略的实施及退耕还林(草)生态环境建设工程的不断开展, 宁南山区退耕还草面积不断扩大, 在旱地农业生产中如何提高退耕后剩余旱作农田生产力持续增进, 发展节水效益型农业技术, 不断探索完善提高有限降水资源水分利用效率的技术具有重要作用。我们在宁南山区系统地研究了不同集水带型比在作物生长期产流蓄墒效率、水分增渗特征与土壤水分的周期性调控效应, 为半干旱地区优化作物微集水带型比和节水增产配套技术的应用提供科学依据。

1 试验设计与方法

1.1 试验区概况

试验分别于宁南山区的海原县贾塘旱农试验基点、西吉县夏寨乡旱农试验点与彭阳县岷岷乡进行。

贾塘基点属西北黄土丘陵残原沟壑区半干旱易旱Ⅱ区^[1], 海拔1 830 m, 日照时数2 500~2 600 h。降水年际间变化大, 保证率低, 年蒸发量是降雨量的3~4倍, 年平均气温6.8℃。5℃以上有效活动积温为2 700~2 800℃, 无霜期124~150 d。2002~2004年3 a降水量分别为257.7 mm(干旱年)、343.9 mm(正常年)和247.6 mm(干旱年), 3年平均283.1 mm。西吉县夏寨乡属于半干旱类型区, 试验点海拔1 688 mm, 与同纬度地区相比具有春寒干旱, 夏短温和, 秋季多雨, 冬冷少雪, 四季分布不均, 全年日照时数为2322.3 h, 年平均气温5.3℃, 无霜期100~140 d, ≥10℃的有效积温1907~2222℃, 年平均降雨量350~470 mm, 其中2004年降雨量为464.8 mm。彭阳县岷岷乡试验点多年平均降雨量为400~500 mm, 其中2003年和2004年降雨量分别为544.9 mm和377.9 mm。

1.2 试验设计

试验作物为紫花苜蓿和谷子。紫花苜蓿设4种试验处理:(1)微集水带型DX₁; 垄: 沟为60 cm: 90 cm(沟内种植6行); (2)带型DX₂; 垄: 沟为60 cm: 60 cm(沟种植4行); (3)带型DX₃; 垄: 沟为40 cm: 40 cm(沟种植2行); (4)ck: 露地平作, 各处理平均行距分别为25 cm、30 cm、40 cm和15 cm。小区面积分别为带型DX₁ 4.5 m×5 m、带型DX₂和DX₃均为4.8 m×5 m、露地平播(ck)为4 m×5 m, 随机区组

* 收稿日期: 2005-10-15

基金项目: "863"子专题(2002AA2Z4021-2); 宁夏自治区科技攻关项目(2001-19-07); 农业科技成果转化资金项目(02EFN216901259); 西北农林科技大学推广项目"旱作农田微集水种植技术示范与推广"。

作者简介: 李永平(1965-), 男, 宁夏固原市人, 研究员, 长期从事旱作农业研究。

通讯作者: 韩清芳(1969-), 电话: 029-87080168, E-mail: hanqf88@tom.com.

排列,2次重复。谷子设3种试验处理:微集水种植带型DX₂(种植4行)、DX₃(种植2行)和CK(露地平作),平均行距分别为30 cm、40 cm和15 cm。试验小区面积为5 m×7 m,随机区组排列,3次重复。

1.3 试验品种与田间管理

试验紫花苜蓿品种为固原陶庄科研基点引进苜蓿扩繁种,谷子品种为大同14号。试验地前作为小麦茬,地力水平一致,整好后,苜蓿试验一次基施磷酸二铵(N 16%,P₂O₅ 44%) 225 kg/hm²+普通颗粒磷肥(P₂O₅ 12%) 750 kg/hm²,播种量15 kg/hm²(自然面积,下同);谷子试验施农家肥15 000 kg+尿素150 kg+磷酸二铵150 kg/hm²,留苗密度为27~30万株/hm²。起垄高度相对于种植沟为10~12 cm,采用厚度为8 cm的微膜人工覆膜。紫花苜蓿于2003年4月30日播种,谷子4月20日播种,播种前测定0~200 cm土层贮水量分别为270.5 mm和260.0 mm。各处理田间管理措施一致。

1.4 测定内容及计算方法

生长(育)期定期测定0~200 cm不同土层土壤含水量。根据地方气象站降雨预报,在降水前和降水后分别测定集水产流区的垄面中央、集流入渗区沟侧和沟中央区不同土层深度贮水量,计算不同降水量下种植沟的产流增蓄量,并在一定时间间隔内分次测定不同部位水分分布特征。对农田集水种植垄沟系统的蓄墒率、产流效率扩渗速率等特征参数值采用如下计算方法:

设 W 为降水后农田某土层内蓄水量之增量(mm), R 为前后两次测定间的降水量(mm)。

$$\text{产流效率}(\%) = \frac{W_{\text{处理}} - W_{\text{CK}}}{R} \times 100\% \quad (1)$$

指在微集水种植条件下,降水通过垄面产生径流使种植沟内土壤水分叠加后的蓄水量较对照的增加值占降水量的百分比^[2]。

$$\text{蓄墒率}(\%) = \frac{W_{\text{处理}} - W_{\text{CK}}}{R} \times 100\% \quad (2)$$

指处理间土壤蓄水增量占降水量的百分比。

$$\text{蓄墒增加率}(\%) = \frac{W_{\text{处理}} - W_{\text{CK}}}{W_{\text{CK}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{扩渗速率}(\%) = \frac{W_{h_2} - W_{h_1}}{h_2 - h_1} \times 100\% \quad (4)$$

指土壤水分在土壤水势梯度或重力作用下,单位时间内通过单位面积的水量(分水平面和垂直面)。即 W_h 为某测定时间在某一测定面的土壤含水量(mm), h 为测定时间。对集水种植技术来说,降雨过程前后,垄侧沟际侧渗速度可描述为,当测定垄下某层的土壤含水量(mm)在 $h_2 > h_1$ 时,表示发生了侧渗(沟向垄补充水分),当测定垄下某层的土壤含水量(mm)在 $h_2 < h_1$ 时,则表示土壤水分作反向运动

(消耗垄下水分)。沟内下渗速度可描述为,当测定沟内某层的土壤含水量(mm)在 $h_2 > h_1$ 时,表示发生了垂直下渗,当测定沟内某层的土壤含水量(mm)在 $h_2 < h_1$ 时,则表示土壤水分作反向运动^[3,4]。

2 结果分析

2.1 农田微集水的蓄水增墒效应

2.1.1 苜蓿生长期 微集水种植技术除了集雨、蓄水作用外,沟垄系统能够将自然降雨转化为有效水分贮存在土壤供作物利用。苜蓿采用集水种植后,在种植当年最后一茬收割后至第二年苜蓿返青期间,非生产季节的土壤贮墒量大幅度增加;两年生苜蓿其从进入休眠期(10月中旬)至返青期(4月上旬),0~200 cm土壤含水量均比露地平播种植(ck)高(表1)。种植第二年4月上旬苜蓿返青期,微集水种植区0~200 cm土壤蓄水量一般在317.4~341.8 mm,较露地平播种植同层多贮蓄水分24.8~49.2 mm。9月7日苜蓿刈割后,其集水种植区同层贮水量一般在202.8~228.7 mm,较露地平播多蓄水21.4 mm。据两年测定,苜蓿全年生长期由于产流集水效应,使集水种植带型DX₁、DX₂较露地平播(ck)多蓄雨水100 mm以上,带型DX₃较露地平播(ck)多蓄雨水78~80 mm。

2.1.2 谷子生长期 2004年分别在海原县、彭阳县、西吉县的旱台地和机修水平梯田以专用配套机具进行谷子微集水种植技术大面积示范,微集水带型DX₂在7~9月份降雨集中季节同层土壤增蓄水量为62.2~85.6 mm(表2),较露地平播(ck)谷子田同层土壤增蓄水量40.1~46.6 mm净增蓄水量21.0~39.0 mm。微集水种植土壤蓄墒率达到43.3%~62.4%,较露地平播(ck)土壤蓄墒率25.4%~34.0%降雨季节提高土壤蓄墒率51.0%~83.7%。

2.2 微集水种植农田水分贮蓄动态

在半干旱偏旱区,旱作农田秋作物和牧草采用微集水种植技术,无论干旱季节或集中降水期,其土壤水分贮存量均比露地平播高。在降水量24.8 mm情况下,测定缓坡耕地谷子采用微集水带型DX₂、露地平播和平覆膜3种植方式0~100 cm土层内的土壤含水量(图1(a)),0~60 cm土层集水沟内平均土壤含水量为22.1%,土壤含水量的绝对值分别较露地种植和平覆膜增加3.9%和1.2%;0~100 cm平均土壤含水量的绝对值分别增加1.43%和1.22%。苜蓿采用集水种植,5~10月上旬主要生长期0~100 cm土层含水量以带型DX₃>DX₂>DX₁>ck,各带型平均土壤含水量分别为12.0%、

11.7%、11.3%和10.6%(图1(b))。全年生长期微集水种植苜蓿0~200 cm土层较ck累计多增蓄水量85.2~108.6 mm。微集水种植谷子(2003~2004

年)生育期0~100 cm土层较露地种植(ck)多增蓄水量98.8~136.7 mm。

表1 苜蓿不同微集水种植带型种植区土壤蓄水量差异(0~200 cm)

Table 1 Soil water storage in the planting zone of alfalfa under different micro-catchment strip models

集水带型 Micro-catchment strip models	第一年刈割期10月1日 Cradling period in the first year (Oct, 1)		第二年4月7日返青期 Reviving period in the second year (Apr, 7)		第二年9月7日刈割期 Cradling period in the second year (Sep, 7)	
	蓄水量(mm) Water storage	±(mm)	蓄水量(mm) Water storage	±(mm)	蓄水量(mm) Water storage	±(mm)
DX ₁	360.1	23.3	325.5	32.9	202.8	6.7
DX ₂	322.9	-13.4	317.4	24.8	220.9	24.8
DX ₃	330.2	-6.1	341.8	49.2	228.7	32.6
平均值Mean	337.7	1.3	328.2	35.6	217.5	21.4
平播(ck)	336.3		292.6		196.1	
Traditional planting						

注:“+”和“-”分别表示土壤蓄水量较ck增减值,“+”未标记

Note: “+”and“-”indicates the increase value and the decrease value of water storage respectively; “+”not marked.

表2 谷子集水种植在不同生态类型区降雨季节土壤增墒效果(0~200 cm)

Table 2 Effect of soil moisture increase under micro-catchment planting of millet in different ecological regions

生态区 Ecological regions	7月 July (mm)	9月 Sep (mm)	土壤增蓄水量 Soil moisture increase (mm)	蓄墒率 Increase rate (%)	较CK增加量 Increase amount compared to CK		
					(mm)	(%)	
半干旱偏旱区 (海原) Semi-arid prone to drought (Haiyuan)	微集水种植 Micro-catchment	237.8	323.4	85.6	62.4	39.0	83.7
	露地平作 Traditional planting	212.1	258.7	46.6	34.0		
半湿润易旱区 (彭阳) Semi-humid prone to drought (Longde)	微集水种植 Micro-catchment	284.6	349.3	64.7	40.9	24.6	61.3
	露地平作 Traditional planting	258.7	289.8	40.1	25.4		
半干旱偏旱区 (西吉) Semi-arid prone to drought (Xiji)	微集水种植 Micro-catchment	305.2	367.4	62.2	43.4	21.1	51.0
	露地平作 Traditional planting	282.0	323.4	41.4	28.9		

注:2004年7月1日~9月30日降雨量海原试验点为137.2 mm、彭阳县试验点为158.1 mm、西吉县试验点为143.4 mm。微集水种植带型为DX₂(垄60 cm+沟60 cm)。

Note: The rainfall in Haiyuan, Pengyang and Xiji from July 1 to Sep 30 in 2004 was 137.2 mm, 158.1 mm and 143.4 mm respectively. The micro-catchment strip model was DX₂(ridge 60 cm + furrow 60 cm).

从图1(a)可以看出,在0~100 cm土层,随着土层向下延伸,土壤含水量逐渐下降,但微集水种植沟内土壤含水量的下降幅度明显要小于平覆膜和露地种植。从图1(b)可以看出,在8月0~100 cm土层的土壤含水量达到高峰,但微集水种植的3种带型均明显高于露地平播。

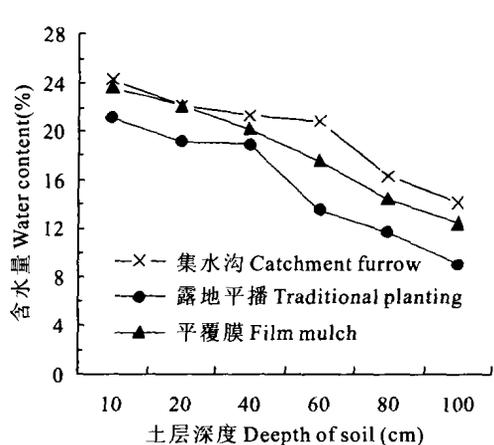
2.3 微集水种植产流效率

在紫花苜蓿生长期雨季蓄墒期,对不同微集水种植带型降雨产流入渗效率进行了测定。结果表明:苜蓿集水种植区土壤贮水量明显较露地平播(ck)高(表3),田间产流效率达到52%以上。在降雨量28.4 mm情况下,降雨后间隔6 h测定,本次降水过程使微集水带型DX₁、DX₂和DX₃较露地平播(ck)产流增蓄水量分别为14.8 mm、20.3 mm和22.0 mm、田间产流效率分别为52.11%、71.48%和77.

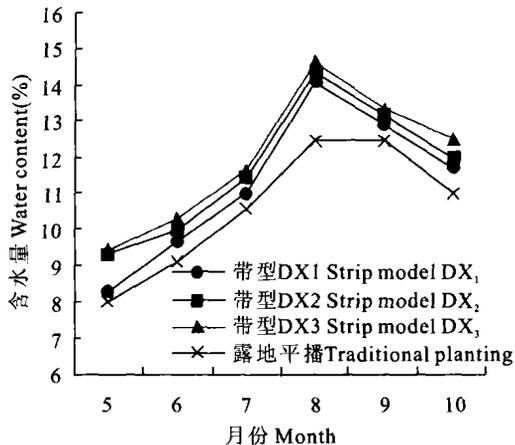
46%,蓄墒增加率分别达到55.30%、71.73%和77.74%。

2.4 微集水种植农田的产流扩渗特征

微集水种植垄面膜下土壤贮水主要依靠集水种植沟内土壤水分的侧渗作用。苜蓿集水带型DX₂在生长期降水量为13.0 mm情况下,降水结束后12 h~48 h定位测定结果表明(表4),10 mm以上的降水量,在一定时间内,沟内产流向垄下的水分侧渗速率随着扩渗时间的延长逐渐增加,并使垄下的土壤水分贮蓄量不断增加。如本次降水过程入渗12 h、24 h和48 h后,垄膜下0~30 cm土壤含水量分别为38.0 mm、42.7 mm和51.6 mm,垄膜下土壤水分侧渗速率在降雨后12 h~24 h与24 h~48 h时段分别为0.41 mm/h、0.74 mm/h。



(a) 谷子不同种植方式0-100cm土层水分状况
Soil moisture in 0~100cm profile under different planting modes of millet



(b) 苜蓿微集水种植0-100cm土层土壤水分动态
Soil moisture in 0~100cm profile under catchment planting of alfalfa

图1 农田集水种植土壤水分贮蓄动态

Fig. 1 The dynamics of soil water storage under micro-catchment planting

表3 苜蓿不同微集水带型降雨产流效率(0~40 cm)

Table 3 Runoff generation efficiency under different micro-catchment strip models of alfalfa

测定项目 Items	DX ₁		DX ₂		DX ₃		CK (露地种植 Traditional planting)		
	雨前 Before rain	雨后 After rain	雨前 Before rain	雨后 After rain	雨前 Before rain	雨后 After rain	雨前 Before rain	雨后 After rain	
含水量 Water content (%)	0~10 cm	7.51	21.13	7.78	22.86	8.20	24.63	7.62	18.93
	10~20 cm	9.55	19.39	10.30	21.97	11.49	22.15	10.26	15.08
	20~40 cm	13.16	15.07	14.25	16.10	16.25	18.74	12.00	12.50
	0~40 cm	10.07	18.53	10.78	20.31	11.98	21.84	9.96	15.50
土层贮水量 (mm) Water storage	51.3	94.4	54.9	103.5	61.0	111.3	50.7	79.0	
降雨增蓄水量 (mm) Water storage increase after rain		43.1		48.6		50.3		28.3	
产流效率 (%) Runoff generation efficiency		52.11		71.48		77.46			
蓄墒增加率 (%) Increase rate of water storage		52.30		71.73		77.74			

注:2003年8月21日、24日分别降雨23.4 mm、5.0 mm,在降雨前的20日和降雨后的24日测定土壤含水量。

Note: The rainfall amount on Aug 21 and 24 in 2003 was 23.4mm and 5.0mm respectively; The date of measuring soil moisture before and after rain was Aug 20 and 24 respectively.

微集水种植垄面集水产流的蓄墒作用还得益于由沟侧逐渐向沟中央的扩渗,进而形成水分下渗流。本次降水过程沟中央0~30 cm 土层水分在降雨后12~24 h 下渗速率为1.16 mm/h,随着时间的延长,下渗作用逐渐减慢,在24~48 h 其下渗速率下降到0.52 mm/h。露地平播(ck)在同等降水量下,降水垂直扩渗速率在12~24 h 平均为0.69 mm/h,仅占微集水种植中央下渗速率的50%左右,因而深层土壤蓄水量远低于微集水种植技术。

垄面产流到达沟侧后分别向垄下、沟中央侧渗,同时下渗,表层(0~30 cm) 土壤蓄水量的减少为三者的综合作用。沟侧的水分扩渗速率随着降雨后时间的延长,也呈减小趋势。在降雨12~24 h 间与沟

中央的下渗速率接近,在24 h~48 h 基本接近为向垄下的侧渗速率。而48 h 以后的扩渗情况需要作进一步的研究。

农田集水种植技术优化了农田土壤水分生态环境,建立的垄沟产流、集水、蓄墒系统,优化了“农田生态用水”与“生物节水”循环系统的调控作用,使作物在干旱环境通过减小在生长期由于土壤水分亏缺造成的生产损失程度,增强了作物抗御干旱的能力,提高有限降水资源的利用效率^[5]。根据土壤水动力学原理,微集水种植构建的沟垄系统,使降水通过垄面产生径流首先抵达沟侧,然后通过侧渗逐渐向沟中央汇集,并同时向垄下扩渗,同时通过重力作用向深层土壤下渗,使降雨得到有效蓄存,在农田内部实

现作物对水分在时空上的有效调控利用。

表4 集水种植农田不同部位的降水产流蓄水量变化与扩渗速率(0~30 cm) (海原试验点)

Table 4 The changes of runoff storage and seepage rate at different positions of micro-catchment field (Guyuan)

时间 Time (h)	垄膜下 Under ridge and film (mm)	侧渗速率 Side seepage rate (mm/h)	沟侧 Furrow side (mm)	扩渗速率 Seepage rate (mm/h)	沟中央 Mid-ridge (mm)	下渗速率 Down seepage rate (mm/h)	CK (mm)	下渗速率 Down seepage rate (mm/h)
12	38.0		93.5		91.9		71.8	
24	42.7	0.41	79.0	1.21	78.0	1.16	63.5	-0.69
48	51.6	0.74	70.2	0.73	71.8	0.52	57.4	-0.51

注:测定时间为2004年7月17日;0~30 cm 平均土壤容重为1.29 g/cm³。

Note: The measuring date: July 17, 2004; The bulk density of 0~30cm soil was 1.29g/cm³

3 结论与讨论

1) 农田集水种植在作物生长期集水产流增墒效果明显。在降雨量400 mm 以下的半干旱偏旱区能够显著地改善旱作农田作物生长的土壤水分条件^[6],在非生产季节土壤有效水分贮存量大幅度增加,增强了农田土壤水分的有效供给能力。宁南半干旱偏旱区2002~2004年降水量247.6~343.9 mm,秋作物和紫花苜蓿3种微集水带型全年生长期0~200 cm 土层多蓄雨水78.0~108.6 mm,谷子生育期同层土壤多增蓄土壤水分98.8~136.7 mm,蓄墒期土壤蓄墒率达到43.3%~62.4%。

2) 集水种植能够大幅度提高降水产流效率。试验3种带型在降雨28.3 mm 的条件下,田间产流效率分别为52.11%、71.48%和77.46%,蓄墒增加率分别达到55.30%、71.73%和77.74%。

3) 微集水种植构建的沟垄系统,在农田内部实

现作物对水分在时空上的有效调控利用,增强了作物抗御自然干旱的能力,能够有效提高降水资源的利用效率。

参考文献:

- [1] 信乃谕,王立祥.中国北方旱区农业[M],南京:江苏科学技术出版社,1998.
- [2] 李军,王龙昌,孙小文,等.宁南半干旱偏旱区农田沟垄径流集蓄保墒效果与增产效应研究[J].干旱地区农业研究,1999,17(2):89-93.
- [3] 王琦,张恩和,李凤民.半干旱地区膜垄和土垄的集雨效率和不同集雨时期土壤水分比较[J].生态学报,2004,24(8):1821-1823.
- [4] 韩清芳,李向拓,王俊鹏,等.微集水种植技术的农田水分调控效果模拟研究[J].农业工程学报,2004,20(2):78-82.
- [5] 李永平,秦爱红,穆兰海,等.早坡地截流蓄水种植沟耕作技术及其水肥效益研究[J].水土保持通报,1997,17(5):1-6.
- [6] 王俊鹏,马林,蒋骏,等.宁南半干旱地区农田微集水种植技术研究[J].西北农业大学学报,1999,27(3):23-27.

Characteristics of runoff generation, water storage and rainwater distribution under micro-catchment planting in dry-land

LI Yong-ping¹, JIA Zhi-kuan², LIU Sheng-xin², HAN Qing-fang^{2*}

(1. Agriculture Scientific Research Institutes of Guyuan City, Guyuan, Ningxia 756000, China;

2. Agriculture Research Center in Arid and Semi-arid Areas,

Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;)

Abstract: The experiment was conducted in different ecological regions of south Ningxia to study the characteristics of runoff generation, rainwater storage efficiency and soil moisture distribution during the growing and fallow periods of autumn crop and alfalfa under different micro-catchment planting modes. The results showed: micro-catchment planting could increase water storage and improve soil moisture condition notably; the water storage in 0~2m profile of micro-catchment planting during the growing period of crop was increased by 78.0~136.7mm compared to that of traditional planting, and during the fallow period it was increased by 24.8~49.2mm; during the water storage period, the water storage rate of micro-catchment planting reached 43.3%~62.4%, and the rainwater storage efficiency was raised by 51.0%~83.7%.

Key words: mountainous area of south Ningxia; micro-catchment planting; runoff generation efficiency; rainwater storage efficiency; rainwater distribution characters