

# 黄土高原旱作农区径流场修建与集水效率研究

唐小明

(甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 兰州 730070)

**摘要:** 讨论了目前黄土高原旱作地区的道路、混凝土、庭院、原土夯实、塑料棚膜等主要径流场处理技术及其有关材质的产流效率, 并提出了需解决的几个问题。

**关键词:** 黄土高原; 径流场; 集水效率

中图分类号: S 273.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2003)01-0137-04

## Study on Construction of Catchment Area and Runoff Efficiency in Loess Plateau

TANG Xiao-ming

(Dryland Agriculture Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The author discusses the treatment techniques and runoff efficiency of main catchment area, such as road, concrete, court yards, tamped crude soil, and plastic film, and at the same time puts forward the problems need to be solved.

**Key words:** Loess Plateau; catchment area; runoff efficiency

在完全依靠自然降水的旱农地区, 把地表上较大面积的少量径流聚集到小块耕地或贮水容器内, 以满足缺水季节农业生产的需要, 这是一种富有发展前景的抗旱增产新思路 and 新技术。为了达到这一目的, 就必须采取工程技术人工收集和贮存地表径流。过去径流集蓄的工程技术主要有旱井、塘坎或塘库、农用水池、堤坝与土堰等, 重点强调径流收集的贮水容器修建, 解决干旱山区的人畜饮水, 已有悠久的发展历史。本文着重研究总结黄土高原旱作地区的径流场构建及其集水效率问题。

### 1 径流场的构建

径流场的构建主要包括径流场的布设、径流场的类型和径流场的处理、径流场面积的确定、径流水导引管道等方面。

#### 1.1 径流场的布设

将降水径流收集形成一定规模的水体, 径流场是必不可少的工程措施和技术环节。在黄土高原丘陵区, 天然坡面的流域年产流系数为 0.06。选择和建造人工径流场、提高产流效率是径流场布设的关键。根据径流利用的目的, 径流场的选择首先考虑要有一定的坡度, 但坡面不宜太长, 也不宜太陡, 坡度基本上以 1.5~12 为宜。其次考虑下垫面性质和土壤质地, 植被覆盖少或土壤紧实的下垫面, 土壤入渗率低, 降水后易产生径流, 壤质土较沙质土易产生径流。径流场的布设应使径流产出区、径流水贮存位置与用水区接近, 避免径

流在汇集过程中的损失。

#### 1.2 主要径流场类型及下垫面的处理

按产流效率大小分, 高原旱作区径流场主要包括坡面、场面、道路、居民与工矿地、闲碎地等多种土地类型。在经济还比较落后的黄土高原, 最先利用的径流场类型必然是有较高产流效率和较易利用的居民点、工矿地和农村附近的道路。黄土高原径流量近几十年呈减少趋势, 但来自居民工矿、居民用地的径流却逐步上升。而且还会在居民生活条件和交通条件得到改善后进一步加强, 特别是交通用地比例的上升, 将为黄土高原发展径流农业提供高径流效率的径流场。黄土高原居民用地、道路和工矿等三项的面积占黄土高原土地面积的比重在 1.9%~10% 之间, 且有从西北到东南增加的趋势, 陕北黄土高原占 2.6%, 陇西黄土高原 4.7%, 陇东黄土高原 5.0%, 陕西渭北旱塬达 7.0%。同时在不同的径流集蓄地域类型中, 这个比例有较大差异, 在 250~400 mm 区占 0.5%~1%, 400~500 mm 区占 2%~5%, 大于 550 mm 区占 6%~8%。

目前黄土高原的主要径流场有道路径流场、混泥土径流场、庭院径流场、片石衬砌径流场、原土夯实径流场、塑料防渗径流场、化学防渗径流场等。

1.2.1 道路径流场 道路径流场是目前旱农地区集蓄径流的主要场所。各等级公路是径流产出的现成径流场, 沥青路面产流效率较高, 二级路面 70%, 三级路面 54%, 农村道路

\* 收稿日期: 2002-11-25

基金项目: 国家科技攻关项目(2001BA508B18)。

作者简介: 唐小明(1962-), 男, 湖南郴州人, 主要从事旱地作物栽培与耕作研究工作。

25%。据统计,甘肃定西地区境内公路占土地总面积的 0.2%,约 56.5 km<sup>2</sup>,年产流约 1 050 万 m<sup>3</sup>(平均产流效率按 45%)。不同等级路面 100 m<sup>2</sup> 产流情况如 1。根据当地降水特征测算,年平均降雨量 400 mm 左右的定西地区,二级公路路面宽度 7 m 和坡度小于 3% 时,每隔 50 m 在公路一边建 50 m<sup>3</sup> 水窖一个;农村道路路面宽 4 m 时,每隔 75 m 修 30 m<sup>3</sup> 水窖一个。因此,柏油公路上建一眼 50 m<sup>3</sup> 的水窖,控制产流面积至少要在 200 m<sup>2</sup> 以上,农村道路上修建一眼 30 m<sup>3</sup> 的水窖,控制产流面积至少要在 300 m<sup>2</sup> 以上。

表 1 等级路面(径流场)的产流量 m<sup>3</sup>/100m<sup>2</sup>

年降雨量/mm	250	300	350	400	450
二级路面	17.5	21.0	24.5	28.0	31.5
三级路面	13.5	16.2	18.9	21.6	24.3
农村道路	6.25	7.5	8.8	10.0	11.3

1.2.2 混凝土径流场 混凝土硬化径流场产流效果好(表 2,表 5),但造价高,目前主要适用于解决人畜饮水。施工前应对地基进行翻土夯实处理,翻土夯实厚度以 30 cm 为宜,夯实后的干土容重应不小于 1.5 t/m<sup>3</sup>。产流面宜采用横向坡

表 2 不同材质径流场的全年产流效率

%

年均降雨量/mm	保证率	产流效率								
		混凝土	塑膜覆沙	水泥土	水泥瓦	机瓦	青瓦	原土夯实	沥青护面	自然土坡
400~500	50	80	46	53	75	50	40	25	68	8
	75	79	45	25	74	48	38	23	67	7
	95	76	36	41	69	39	31	19	65	6
300~400	50	80	46	52	75	49	40	26	68	8
	75	78	41	46	72	42	34	21	66	7
	95	75	34	40	67	32	29	17	64	5
200~300	50	78	41	47	71	41	34	20	66	6
	75	75	34	40	66	34	28	17	64	5
	95	73	28	33	62	30	24	13	62	4

至 2000 年底,甘肃已累计建成混凝土径流场 3 991 万 m<sup>2</sup>,合计使用混凝土 140 万 m<sup>3</sup>。建成水窖 362.5 万眼,混凝土总用量 616 万 m<sup>3</sup>。但混凝土设计标号较低,防渗厚度不足,易引起集水面或水窖壁开裂,降低了水分收集效率,水窖壁漏水,甚至破裂,缩短了工程使用年限,有的甚至不能使用。这些问题的存在,不仅影响了集流面的继续使用,造成了工程的重复建设,而且影响了径流集蓄利用技术的进一步发展。针对这个问题,甘肃省水利厅提出了聚丙烯纤维混凝土径流场建设,在混凝土中掺入聚丙烯纤维,大幅度提高了混凝土的抗裂能力,径流集蓄工程的年费用平均降低了 20%~25%,以年平均降水 400 mm 计算,单位水体成本由 0.90 元降到 0.74 元。

1.2.3 庭院径流场 瓦有水泥瓦、机瓦、青瓦等种类。主要用于庭院集流,与庭院水泥硬化结合起来,形成庭院瓦屋面集流场。通过在屋檐下沿滴水线修建集流沟,收集屋面产流的办法,可使屋面集水效率达到 63% 以上。近年,甘肃省制成了水泥瓦,采用 1:3 水泥砂浆在专用模子上成型,可以就地取材,产流效率是机制瓦的 1.5 倍。用硬质材料,如水泥薄层和金属板覆盖集水区,寿命相当长,但是很贵。

度 1/10~1/50,纵向坡度 1/50~1/100。一般用 C14 混凝土分块现浇,并留有伸缩缝,厚度 3~6 cm。砂石中含泥量不大于 4%,不能用矿化度大于 2 g/L 的水拌和。分块尺寸以 1.5 m×1.5 m 或 2 m×2 m 为宜,缝宽 1~1.5 cm,缝间填塞浸油沥青沙浆牛皮纸、3 毡 2 油沥青油毡、水泥沙浆、细石混凝土或红胶泥等。

黄土高原半干旱地区,为了高效集中产流,径流场铺设混凝土,产流效率可达 75% 以上,甘肃倡导的“雨水集流工程”中径流场建设,主要是庭院的水泥砂浆硬化。也可用水泥与具有适当含水量的当地土料拌和并夯实养护而成,代替混凝土节约砂石料运输费用。庭院集流工程涉及千家万户,在布局上以农户为单元,对径流的集、贮、用三个环节进行用水量分析,以户自成体系。甘肃为实施高原“121”庭院集流工程,制定了专门的规范和标准。基本要求是:水泥集流场厚度 3.5 cm,设置在农户庭院内,表面平整光滑,无裂缝,坡度要求一般为 1/100,产流后水分无杂质沉积现象;分块浇筑,收缩裂缝为 0.8~1.0 mm,无渗水现象,径流场 100 m<sup>2</sup>,水窖容积 30~50 m<sup>3</sup>,沉淀池、拦污栅等附属建筑物配套齐全。

1.2.4 片(块)石衬砌径流场 利用片(块)石衬砌坡面作为集流场时,应根据片(块)石的大小和形状采用不同的衬砌方法。片(块)石尺寸较大,形状较规则,可以水平铺垫,铺垫时要对地基进行翻夯处理,翻夯厚度以 30 cm 为宜,夯实后的干土容重应不小于 1.5 t/m<sup>3</sup>。若尺寸较小,形状不规则,可采用竖向按次序砸入地基的方法,厚度不小于 5 cm。

1.2.5 原土夯实径流场 利用土质道路作集流面时,要进行平整,一般纵向坡度沿地形走向,横向倾向于路边排水沟。利用荒山坡做集流面时,要对原土进行洒水翻夯处理 30 cm,夯实后的干土容重应不小于 1.5 t/m<sup>3</sup>。具体作法是,将集水区原表层土壤上的石块、杂草清除,加以平整和夯实,或用红土与原土混合夯实。若土地坡度过大,侵蚀可能成为问题,必须采取措施,降低坡度和(或)坡地长度,以降低径流流速。在某些情况下,特别是当集水区大或不能以经济的办法降低坡度时,那么可在平滑的土地上建小通道。对于砂质地面,如有黏土的话,在砸实前补上一层黏土,再通过辗实,压实表土,渗透损失就能进一步降低。将地面修成道路,由于降低了水的损失,可得到更多的径流。

1.2.6 塑膜防渗径流场 塑膜防渗处理的径流场可分为裸露式和埋藏式两种。裸露式是直接将在修整完好的地面上,在塑膜四周及接缝可搭接 10 cm,烙接或搭接 30 cm 后折叠防水下渗。埋藏式可用草泥或细沙覆盖于塑膜上,厚度以 4~5 cm 为宜。草泥应抹匀压实拍光,细沙应摊铺均匀。塑膜集流面的地基要求铲除杂草、整平、拍实或夯实。表面适当部位用砖块、石块或木条等压紧。

塑料防渗径流场有二种铺设方法,一是裸露式,这种方式集流效率很高,可达 95%,但塑料易老化破损,在干旱地区当内表面形成水滴后,常被鸟啄破;二是在薄膜表面铺 3~5 cm 的沙,但影响产流效率,只有 45%。甘肃省水工研究所研制了一种绿色加厚活动式防渗膜,下雨时铺开产流,雨

停后保存起来,防渗效果虽好,但成本较高。中国科学院水土保持研究所在“九五”攻关中,采用专门防老化并有足够强度的塑料薄膜,当降雨时铺在坡面上,雨过后卷起,不影响坡面植被生长,雨季结束收回保管起来再用,方法简单实用,使产流与植被恢复结合起来。

为了进一步研究坡地的径流场建设问题,定西地区水利所提出了农坡地塑料轮歇产流模式。1997 年秋季利用 2 800.14 m<sup>2</sup> 的坡地,在秋季夏粮收获后覆盖塑料,地边修建 10 眼容器 30 m<sup>3</sup>/眼的水窖贮水,并配置一次补灌 0.467 hm<sup>2</sup> 的移动式滴灌设施,自压滴灌 0.8 hm<sup>2</sup> 梯田。据观测,1998 年、1999 年 8 月~9 月共降水 107.3 mm,塑料面产流 264.9 m<sup>3</sup>,产流效率达到 92.4%(表 1~3)。

表 3 农坡地塑料径流场的产流效率测定

年份	覆膜时间	揭膜时间	同期降雨/mm	产流量/m <sup>3</sup>	径流系数/%
1998	8月5日	8月25日	68.5	175.0	93.0
1999	9月19日	10月16日	35.2	89.0	91.2
平均	8月27日	9月25日	51.9	132.5	92.4

甘肃农科院在陇东研究提出了温室棚面径流收集模式,有效解决了旱塬日光温室蔬菜生产的水分短缺问题。建造无立柱二代日光温室,长 50 m,宽 7.5 m,在前屋面贴地处修建深 20 cm,宽 40 cm 的混凝土集水道;根据棚面面积大小修建容积 30~50 m<sup>3</sup> 的水泥薄壁水窖及沉淀池,盖上棚膜,并用棚膜在接地处铺衬径流导引道,防止水分渗漏,形成棚面产流面—防渗导引槽—水窖贮水的联体构筑。据甘肃农科院测定(表 4),1996 年 7 月 25 日至 8 月 28 日七次大小不均的降雨 156 mm,260.2 m<sup>2</sup> 的棚面产流集水 34.3 m<sup>3</sup>,集水效率 84.4%。1997 年 4 月 22 日至 8 月 14 日 11 次降雨共 163.1 mm,263 m<sup>2</sup> 的棚面共集水 37.7 m<sup>3</sup>,集水效率平均 87.9%。1998 年 5 月 28~29 日一次暴雨 104 mm,面积 160 m<sup>2</sup> 的塑料弓棚面集水 15.6 m<sup>3</sup>,集水效率 93.8%。降雨强度明显的影响集水效率,1996 年 7 月 25 日、8 月 7 日两次瞬时阵雨 4.4 mm、2.5 mm,集水效率分别 49.3%、51.0%,而 8 月 10 日、8 月 28 日两次长时间降雨 8.0 mm、3.8 mm,集水效率仅

16.7%、13.0%。1997 年利用日光温室 150 m<sup>2</sup> 后屋面产流,在 8 月 5 日至 9 月 23 日五次共 101.3 mm 降雨后,集水 13.45 m<sup>3</sup>,集水效率 88.5%。1998 年 5 月 28~29 日一次暴雨 104 mm,面积 300 m<sup>2</sup> 的日光温室棚面集水 26.8 m<sup>3</sup>,集水效率为 85.9%。

表 4 塑料大棚棚面集水效率测定结果

降雨时间 (月/日)	降雨量/ mm	集水量 /m <sup>3</sup>	集水效率 /%
7/25	4.4	0.564	49.3
7/27	44.2	9.788	85.1
7/28	76.5	19.512	98.0
8/1	16.6	3.576	82.8
8/7	2.5	0.332	51.0
8/10	8.0	0.347	16.7
8/28	3.8	0.129	13.0
平均	156.0	34.30	84.4

表 5 不同材料径流场在不同降水量及保证率下全年集流量

多年平均 降水量 /mm	保证率/%	产流量/(m <sup>3</sup> ·100m <sup>-2</sup> )						
		混凝土	水泥石	机瓦	青瓦	原土 夯实	沥青 护面	自然 土坡
400~500	50	40.0	26.5	25.0	20.0	12.4	34.0	4.0
	75	39.5	22.5	24.0	19.0	11.5	33.5	3.5
	95	38.0	20.5	19.5	15.5	9.5	32.5	3.0
300~400	50	32.0	20.8	19.6	16.0	10.4	27.2	3.2
	75	31.2	18.4	16.8	13.6	8.4	26.4	2.8
	95	30.0	16.0	14.8	11.6	6.8	25.6	2.0
200~300	50	23.4	14.1	12.3	10.2	6.0	19.8	1.8
	75	22.5	12.0	10.2	8.4	5.1	19.2	1.5
	95	21.9	9.9	9.0	7.2	3.9	18.6	1.2

1.2.7 化学防渗径流场 以化学材料封闭土壤非毛管孔隙,可以显著地增加地表径流量。较常用的化学制剂有硅酮、胶乳、沥青和石蜡。使用硅防水剂处理土壤,一年后径流效率

为 90%,4 年后降为 60%。用石蜡处理土壤,产生的径流为雨量的 90%,未处理小区只产生 30% 的径流。用乳化沥青喷涂土壤表面,产流期可持续 4~5 年。黄土高原地区采用高分

子化合物 YJG1 号、2 号、3 号地表防渗剂喷涂, 径流系数达到 70% ~ 90%。北京林业大学还筛选出较为耐旱、紧密贴生于土壤表面的低等植物石果衣, 它是一种纯生物材料, 具有较好的水保效果。

1.2.8 荒坡径流场 荒坡是近距离收集径流来源的重点区域。在 80% 保证率 400 mm 地区, 据坡面投影面积计算, 平均径流深 50 mm 左右, 是坡面细流侵蚀和沟头源侵蚀的动力来源, 用适当的工程措施把这一部分径流收集起来, 不但可以补灌农田, 还有保持水土的功效。坡面工程可分为分洪、输水两大部分, 以达到既能收集径流, 也不致形成洪害, 还能给坡面留下一定量的生态用水。方法是沿坡面垂直方向规划和修建输水渠道, 沿平行方向安排向输水渠方向形成 1.5% ~ 2% 坡度的截流渠。其产流小区面积应小于 1 000 m<sup>2</sup>, 使每个小区瞬间径流量小于 5 m<sup>3</sup>。截流区底宽 50 ~ 80 cm, 渠埂高 80 ~ 100 cm, 埂宽 100 cm 左右, 就地取材, 用土筑成, 渠埂内缘栽种灌木。沿渠底每 3 m 左右, 可修一高 10 cm 左右土埂, 以存留部分径流, 保证植物生产。输水渠用石块衬砌。

## 2 径流场面积的确定

黄土高原旱作区径流集蓄的核心问题是根据不同径流场的产流效率, 确定产流量、径流场面积及成本。产流效率 ( $\alpha$ ) 与径流场处理材料和径流场坡度、雨量、雨强等因素有关, 一般产流效率计算公式为:

$$\alpha = \frac{\sum P_j \alpha_j}{\sum P_j}$$

$$\alpha_j = 1 - c/P a i b$$

式中:  $\alpha_j$  —— 第  $j$  次降雨径流场产流效率;  $P$  —— 降水量 (mm);  $I$  —— 降水强度 (mm/min);  $a, b, c$  分别为自然地理参数, 用多元分析确定。

在实际应用的材料中, 混泥土径流场产流效率较高, 在降水 300 ~ 400 mm、保证率在 95% 以下的产流效率为 75.6%, 水泥瓦为 67%, 机瓦和青瓦分别为 37.2% 和 9.2%, 黄土夯实只有 17%。径流场面积 ( $A_i$  / m<sup>2</sup>) 可有下面公式计算:

$$A = Q / u H A_i = Q / u \alpha P_i \cos \beta$$

式中:  $Q$  —— 径流场的径流产出量,  $u$  —— 保证系数 (一般取 0.9),  $H$  —— 年均径流深 (mm),  $A_i$  —— 径流场有效产流面积

(m<sup>2</sup>),  $P_i$  —— 是年均降水量 (mm),  $\beta$  —— 是径流场坡度。

## 3 目前应研究解决的几个问题

80 年代后期以来, 由于干旱缺水问题的日益突出, 黄土高原旱作地区成功研究与应用了以集雨工程和集雨节灌为主的径流集蓄高效利用技术及配套技术, 取得了显著效果。从近年各生态区域的研究探索和生产实际应用效果来看, 目前应继续研究解决的问题主要有:

### 3.1 高效低耗集流场防渗处理材料研究与选择

在已有混泥土和水泥土等防渗材料应用的基础上, 重点研究固定式和半固定式塑料棚膜、涂油无纺布、宽幅彩条玻璃丝布、土壤凝结硬化剂、坡面固化土、无污染化学覆盖材料有机硅、高分子化合物 YJG—1 号、无机化学材料“苏易克”、沥青等防渗材料处理坡面的集水效果, 以及液体膜、渗水保水降解膜等材料的田间集雨保墒效果。将集雨场布局和处理与提高林草植被成活率紧密结合起来。综合评价各种集雨材料的经济实用性和使用效果。

### 3.2 小流域径流的网络化利用

根据黄土高原的景观结构与生态功能特点, 从防止水土流失和集蓄径流角度考虑, 可将一个小流域径流集蓄单元划分为 4 类生态经济带, 即远山荒坡径流富集植被恢复水保—经济带; 降水就地入渗基本农田带; 村庄、道路径流收集水分高效转化经济带; 沟道和川坝地高效经济带。水资源的网络化利用实质上是对降水资源在不同利用层次上的干预, 干预能力越强, 系统生产力越高。因此, 小流域降水资源网络化利用实质上是在不同生态位的生物种群之间合理规划和分配降水资源, 以持续发展为指导思想, 优化生态环境建设及农业等行业用水, 这种网络化利用模式就是降水就地利用技术、叠加利用技术及异地利用技术的优势集成与综合, 而这种综合与集成是根据技术的适应性和流域本身的特征而确定的, 其目的是发挥多种技术的综合效应。

### 3.3 非耕地径流高效利用模式

研究黄土高原主要类型区非耕地降水资源化开发潜力和集雨农业适宜发展区域, 按集水可能与社会需求及资源经济学原则, 系统研究等级路面集雨节灌果园、庭院和棚面集雨节灌设施园艺、山顶和坡面集雨节灌山腰梯田经济林果与中药材、小流域塘坝拦蓄雨洪节灌经济林果和温室设施高效农业等高效用水效果, 制定相应模式的技术规范, 并根据各农业生产区域的生态特点, 研究非耕地径流高效利用的特色农产品生产技术。

## 参考文献:

- [1] 马天恩, 高世铭. 集水高效农业[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1997.
- [2] 联合国粮食及农业组织. 径流集蓄[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [3] 朱强, 李元红. 论雨水集蓄利用技术[A]. 见: 全国雨水利用学术讨论会及国际研讨会论文集[C]. 徐州: 中国矿业出版社, 2001. 196- 201.
- [4] 吴普特. 关于雨水集蓄利用技术研究若干问题的思考[A]. 见: 农业高效用水与可持续发展研讨会论文集[C]. 徐州: 中国矿业出版社, 1999: 216- 220.