

晋西黄土残塬区人工集流场形式优化设计

段喜明^{1,2,3}, 吴普特^{2,3}, 冯浩^{2,3}

(1. 山西农业大学林学院, 太谷 030801; 2 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌, 712100; 3 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 杨凌 712100)

摘要: 在黄土残塬地区, 旱井作为解决当地农业用水的一种有效途径, 已被越来越多的人所认同。而在旱井集雨系统中, 旱井集流场所汇集的降雨径流及其含沙率的多少, 又直接关系到工程效益的发挥和寿命的长短。该文利用人工降雨试验, 并辅以天然降雨观测, 系统分析了旱井系统中人工集流场的产流量、产沙率、集流效率与下垫面材料、坡度、雨强的关系, 最终遴选出适合当地条件的最优坡度及下垫面材料。研究认为在经济、便捷与高效的原则下, 采用 5° 左右坡的裸露夯实黄土面, 可有效利用当地有限的雨水资源。

关键词: 黄土残塬区; 降雨径流; 人工集流场; 集流效率; 产沙率

中图分类号: S273.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)04-0052-04

段喜明, 吴普特, 冯浩. 晋西黄土残塬区人工集流场形式优化设计[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 52-55

Duan Ximing, Wu Pute, Feng Hao. Optimum design of artificial rainwater catchment in broken loess plateau in western Shanxi Province[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(4): 52-55 (in Chinese with English abstract)

0 引言

黄土残塬干旱地区, 降雨年内分配不均匀, 7~9 月的降雨量约占全年的 70%, 且多以暴雨形式出现, 这样不但造成雨水资源和土壤资源的大量流失; 而且严重的侵蚀产沙, 还会使大型水利工程很难发挥应有的作用^[1,2]。

从提高有限雨水资源的利用效率出发, 若能采取一项有效的措施来拦蓄雨水资源, 并加以利用, 以达到既保持水土又满足农业用水的目的, 其生态和经济效益将不容忽视。大量的研究与实践表明, 发展适合当地地形地貌、经济和农业种植结构等条件的旱井集雨系统, 具有保持水土及有效利用雨水资源的双重功能^[3]。

利用旱井集雨技术发展起来的现代“旱井(窑窖)”农业, 是继原始的“雨养农业”和传统的“径流农业”后的一大创举^[4]。它集现代蓄水、节水及高效种植技术于一体, 由雨水收集系统、贮蓄系统、水的分配与高效利用系统 3 大部分组成^[5]。

自 20 世纪 80 年代以来, 中国的雨水集蓄利用已取得较大的发展, 目前, 解决大面积雨水利用的关键, 已集中到如何选取适宜的下垫面材料及坡度, 以降低集流面的改造成本, 提高集流面的集流效率^[3,6]。

1 试验设计及方法

本文试验选在“九五”国家科技攻关项目的晋西隰县试区, 采用人工降雨与天然降雨相结合的方法进行。

收稿日期: 2004-08-17 修订日期: 2004-12-30

基金项目: 国家“九五”科技项目(96-004-05-06)第一子专题“黄土残塬区流域综合治理与有限水分高效利用技术体系的研究”

作者简介: 段喜明(1967-), 山西太谷人, 副教授, 博士生, 主要从事农业水土工程研究。山西太谷 山西农业大学林学院, 030801。

Email: duanximing0208@sina.com

人工降雨作为不同条件的划分手段, 天然降雨作为其校核与补充。

人工降雨采用针点式人工降雨机进行; 试验小区共 29 个; 小区规格 1 m × 2 m; 小区坡度分为 5°、10°、15°、20°、25°、30° 和 35° 共 7 种(在晋西黄土残塬区, 塬面平缓, 坡度在 0~5° 左右; 从分水岭至崩缘线, 坡度较缓, 一般在 10° 左右; 崩缘线到沟缘线, 坡度较陡, 多在 25°~35° 甚至更大; 坡麓为 15° 左右的堆积坡或滑塌坡。在设计集流场时, 若坡度过小, 会造成汇流不畅和入渗增加, 一般认为应不小于 3°~5°。考虑到试验设计的可操作性与系列坡度的可对照性, 将起始坡度定为 5°; 对于坡麓部位的农田, 其集流场有利用上方陡坡段的可能, 因此将最大试验坡度延至 35°^[7,8]); 小区下垫面材料, 考虑到当地经济条件较差, 从经济、合理和实用的角度出发, 初步选择裸露夯实黄土面、麦秸覆盖夯实黄土面(麦秸刚好遮盖坡面)、水泥面、裸露夯实红土面、裸露夯实灰土面(灰、土体积比 1:3)和粗砂覆盖塑面(砂厚 0.5 cm)6 种, 进行对比筛选。

试验前首先测定各小区坡面相应的初始含水率和初始干容重^[9]。为确保小区可比性和坡面的夯实效果, 上覆土层应保持 8%~15% 的初始含水率(根据土力学试验, 此时夯实土壤可达到最大密实度^[10]), 土坡面的初始干容重达到 1.40~1.60 g/cm³(35° 土坡面因坡度较陡, 夯实效果较差, 相应的初始干容重略低于 1.40 g/cm³), 见表 1。

试验分人工降雨和天然降雨两种方法, 可同时交叉进行。在人工降雨条件下, 先按等雨强 ($I = 0.77$ mm/min, 基本与当地多年平均暴雨雨强相当), 测出各种下垫面材料在 5°~35° 的产流量和产沙率, 并结合当地的具体条件, 选出最优坡度下的最优下垫面材料(即具有较大的产流量和较小的产沙率), 作为人工集流场的优化形式; 再给定系列变雨强(根据当地多年平均降

雨特点, 从小到大取 6~ 7 种不同的雨强), 得出优化集流场的产流量和产沙率随雨强的变化规律。

在天然降雨条件下, 观测各场次降雨雨强, 记录 29

个小区在相应坡度及下垫面材料下的产流量和产沙率, 以作为对人工降雨试验的校核与补充^[11]。

表 1 不同坡度与下垫面材料对应的坡面初始含水率 ω 和初始干容重 γ_d

Table 1 Initial moisture content and dry soil density at different slopes and on the surfaces of different materials

坡度 / (°)	裸露夯实黄土面		麦秸覆盖夯实黄土面		水泥面		裸露夯实红土面		裸露夯实灰土面		粗砂覆盖塑面	
	ω / %	γ_d / g · cm ⁻³	ω / %	γ_d / g · cm ⁻³	ω / %	γ_d / g · cm ⁻³	ω / %	γ_d / g · cm ⁻³	ω / %	γ_d / g · cm ⁻³	ω / %	γ_d / g · cm ⁻³
5	15.30	1.57	7.06	1.39	—	—	10.39	1.56	8.16	1.39	5.39	—
10	15.40	1.54	7.31	1.48	—	—	6.72	1.45	8.83	1.40	6.31	—
15	10.16	1.58	8.70	1.44	—	—	10.03	1.47	8.80	1.32	5.73	—
20	10.33	1.57	4.69	1.49	—	—	11.59	1.47	14.18	1.46	7.11	—
25	14.40	1.51	8.64	1.38	—	—	10.74	1.58	8.18	1.34	6.59	—
30	11.45	1.47	6.94	1.40	—	—	7.07	1.54	8.16	1.48	7.34	—
35	9.14	1.32	6.39	1.39	—	—	9.60	1.46	6.45	1.34	4.58	—

2 试验结果与分析

试验共进行人工降雨 50 场(次), 记录有效天然降雨 5 场(次)。

2.1 等雨强条件下, 人工集流场的优化形式

1) 试验结果的计算与分析

人工降雨条件下, 令雨强 $I = 0.77 \text{ mm/min}$, 总降雨量 $P = 38.5 \text{ mm}$, 求得各下垫面材料在 5~35 坡度下相应的产流量和产沙率^[12](见表 2)。

由表 2 可知, 水泥面与粗砂覆盖塑面的产沙, 基本源于对应下垫面(水泥和粗砂)的初始附着物(如尘土、杂质等), 产沙率的大小与其表面洁度有关; 麦秸覆盖夯实黄土面的产沙来源则有所不同, 是由麦秸及麦秸下黄土共同产生^[13]。

同裸露夯实黄土面相比, 麦秸覆盖黄土面的产沙率明显降低。

同麦秸覆盖夯实黄土面相比, 因塑面的完全阻隔, 粗砂覆盖塑面的产沙率, 只与覆砂本身洁度有关, 与其下黄土面无关, 因而产沙率比较稳定。

对于 3 种裸露夯实土面, 从本试验的结果来看, 随着坡度的增大, 产流量有所减小, 但并不明显; 而产沙率则呈明显的上升趋势。从作用机理分析: 当降雨相同时, 单位坡面的受雨量随坡度增大而减少, 密实度也随坡度的增大而减小, 因此产流量会减小; 但另一方面, 随着坡度的增大, 径流在坡面上停留的时间变短, 入渗减小, 产流量增大。可见, 产流量随坡度变化的正负效应同时存在。

对于裸露夯实土面(干容重达 1.32~1.58 g/cm³), 其入渗能力已很差, 在很短的时间差内(本试验中的最大时间差仅 4 s), 各坡度下入渗量的差别基本显现不出。因此, 产流量随坡度的增大应有所减小。从试验结果来看, 也大致有此变化趋势, 但因差别很小, 在本试验可提供的精度范围内, 难以为证。

与产流量不同, 坡度与坡面冲刷(产沙率)的关系非常密切。F. G. Renner 通过研究证明, 当坡面坡度约在 40°以下时, 坡面侵蚀量与坡度呈正相关^[14]。本试验中, 3 种裸露夯实土面的产沙率, 也与对应坡度呈正相关。

表 2 不同坡度与下垫面材料对应的产流量 R_s 和产沙率 V_s 计算结果

Table 2 Runoff yield and silt concentration at different slopes and on the surfaces of different materials

坡度 / (°)	裸露夯实黄土面		麦秸覆盖夯实黄土面		水泥面		裸露夯实红土面		裸露夯实灰土面		粗砂覆盖塑面	
	R_s / mm · min ⁻¹	V_s / kg · m ⁻³	R_s / mm · min ⁻¹	V_s / kg · m ⁻³	R_s / mm · min ⁻¹	V_s / kg · m ⁻³	R_s / mm · min ⁻¹	V_s / kg · m ⁻³	R_s / mm · min ⁻¹	V_s / kg · m ⁻³	R_s / mm · min ⁻¹	V_s / kg · m ⁻³
5	0.60	14.52	0.55	5.77	0.63	2.71	0.55	26.42	0.61	8.01	0.57	3.08
10	0.57	17.13	0.54	5.24	0.64	3.08	0.56	46.91	0.56	7.39	0.57	3.26
15	0.55	21.58	0.52	4.46	0.64	1.52	0.53	50.08	0.55	8.46	0.56	3.41
20	0.53	19.60	0.52	1.52	0.63	4.27	0.46	53.13	0.54	13.62	0.58	3.63
25	0.55	25.17	0.52	2.48	0.64	2.13	0.42	52.55	0.52	13.80	0.54	3.57
30	0.50	29.33	0.49	3.81	0.62	1.92	0.47	59.32	0.49	11.47	0.54	3.82
35	0.51	28.25	0.51	2.48	0.63	2.24	0.41	64.04	0.51	18.73	0.53	4.07

2) 最优坡度及下垫面材料的选取

通过上述试验结果的计算与分析, 并同时考虑各种下垫面材料的制作成本、难度及其适宜性后发现, 对于旱井集流场, 当有经常维护的条件和可能时, 麦秸覆盖

夯实黄土面和粗砂覆盖塑面不失为两种优选下垫面材料。但实际上, 高质量的维护保养不大可能(应保证每次集流前, 覆盖物处于薄、均、净的状态)。因此, 满足经济、实用与简便要求的下垫面材料, 就集中到了裸露夯实黄

土面上。

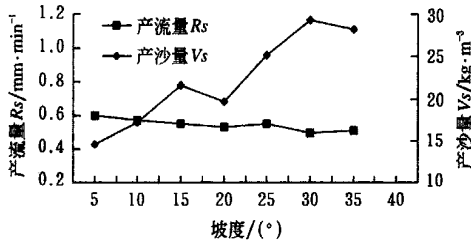


图1 裸露夯实黄土面的坡度~产流量与坡度~产沙率关系
Fig 1 Relationships between the loess surface runoff yield and silt concentration at different slopes

对于裸露夯实黄土面,当坡度改变后,其产流量和产沙率亦会随之发生变化。作为旱井集流场,应尽可能有较大的产流量和较小的产沙率,以确保旱井中能多蓄雨水而少淤泥沙。据此,5°的裸露夯实黄土面,即为最优坡度下的最优下垫面材料,也就成为人工集流场的优化形式。

2.2 变雨强条件下,优化集流场产流量和产沙率的变化规律

选定人工集流场的优化形式后,为研究其产流量和产沙率随雨强的变化规律,给定系列变雨强,相应的试验结果见表3。

表3 变雨强条件下的产流量与产沙率计算结果

Table 3 Results of the surface runoff yield and silt concentration at different rainfall intensities

下垫面材料	坡度/(°)	雨强 I /mm·m in ⁻¹	降雨量 P /mm	初始含水率 ω /%	初始干容重 γ_d /g·cm ⁻³	产流量 R_s /mm·m in ⁻¹	产沙率 V_s /kg·m ⁻³
裸露夯实黄土面	5	0.33	16.5	5.47	1.50	0.22	6.63
		0.55	27.5	4.62	1.55	0.41	9.87
		0.77	38.5	15.30	1.57	0.60	14.52
		0.99	49.5	6.25	1.54	0.78	28.81
		1.10	55.0	9.87	1.52	0.89	51.13
		1.21	60.5	10.53	1.54	0.99	58.38

对于5°的裸露夯实黄土面,运用人工模拟降雨的方法,采用多元回归分析,求得其集流效率与降雨特性的关系。相关关系呈双曲线型,相应的计算公式为

$$E = 1 - cP^{-a}I^{-b}$$

式中 E ——集流效率; P ——总降雨量,mm; I ——雨强,mm/m in; a, b, c ——试验常数,取 $a = 0.154, b = 0.247, c = 0.363$ 。

得出在表3的6种雨强条件下,相应集流效率 E 分别为:0.690, 0.747, 0.779, 0.800, 0.808, 0.815。

由此可看出,对于5°的裸露夯实黄土面,随着雨强的增大,坡面的产流量、产沙率及集流效率均增大。

3 结论

在晋西黄土残塬干旱山区,考虑到当地降雨量少、雨量集中,黄土深厚,水土流失严重,以及耕地破碎、分散的特点,修建旱井用于满足农业用水要求,是一个上好的选择。而在旱井集雨系统的集流场设计中,考虑到当地农村现有的经济水平,应尽可能以利用当地材料,降低修建成本为出发点,以确保其实用性与可行性。

为提高旱井集水场的产流量和集流效率,降低产沙率,在经济、便捷与高效的原则下,通过对旱井集流场在坡度、下垫面材料等方面的优化研究,得出采用5°左右坡的裸露夯实黄土面(保持土面初始含水率8%~15%,干容重1.40~1.60 g/cm³),在当地多年平均暴雨雨强($I = 0.77$ mm/m in)下,产流量可达0.60 mm/m in,集流效率77.93%,产沙率14.52 kg/m³,是一种较优的人工集水场实用形式。同时也为干旱山区塬(坡)面的集雨研究,以及大面积示范推广,提供了一定的理论基础和科学依据。

[参考文献]

- [1] 王文龙, 穆兴民. 黄土高原雨水人工汇集研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 77-81.
- [2] 陈国良, 徐学选, 程积民, 等. 宁南山区发展窑窖节水农业的依据与潜力[J]. 水土保持研究, 1996, 3(1): 2-7.
- [3] 吴普特, 黄占斌, 高建恩, 等. 人工汇集雨水利用技术研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 25-33.
- [4] 陈国良, 徐学选, 程积民, 等. 窑窖农业是干旱山区发展高效农业的一条新路[J]. 水土保持研究, 1996, 3(1): 45-46.
- [5] 李克煌. 论降雨径流的集存. 水土保持学报[J], 1994, 8(1): 73-77.
- [6] 水利部农村水利司. 节水灌溉技术标准选编[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 1-8.
- [7] 姚文艺, 汤立群. 水力侵蚀产沙过程及模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001: 214-215.
- [8] 张汉雄, 邵明安. 黄土高原生态环境建设[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2001: 1-5.
- [9] 王百田, 王斌瑞. 黄土坡面地表处理与产流过程研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(2): 18-24.
- [10] 钱家欢. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1995: 29-32.
- [11] 李小雁, 龚家栋. 人工集水面降雨径流观测实验研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 1-4.
- [12] 徐为群, 倪仁晋, 徐海鹏, 等. 黄土坡面侵蚀过程实验研究——I. 产流产沙过程[J]. 水土保持学报, 1995, 9(3): 9-18.
- [13] 李占斌, 符素华, 范荣生. 干旱半干旱地区雨水利用实验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(5): 73-78.
- [14] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1997: 45-51.

Optimum design of artificial rainwater catchment in broken loess plateau in western Shanxi Province

Duan Ximing^{1,2,3}, Wu Pute^{2,3}, Feng Hao^{2,3}

(1. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030801, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 3. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation, Yangling, 712100, China)

Abstract In the broken loess plateau, it has been approved that storing rainwater in wells is an effective way of meeting agricultural water demand. And in the system of storing rainwater in wells, the amounts of the surface runoff yield and silt concentration are related to the benefit and its lifespan. In order to solve the key problem, based on the experiments of artificially simulated rainfall, and assistance with the measures of natural rainfall, the relationships among the surface runoff yield, silt concentration, catching runoff efficiency and the material of surface, slope gradient, rainfall intensity were analyzed systematically. Then, the best slope gradient and material of surface are chosen. Following the principle of economy, convenience and high efficiency, the artificial rainwater catchment of uncovered and tamped loess at a slope of about 5° is an effective way to utilize the limited local rainwater resources.

Key words: broken loess plateau; rainfall-runoff; artificial rainwater catchment; catching runoff efficiency; silt concentration