

不同耕作管理措施对坡耕地降雨入渗的影响^{*}

赵西宁¹, 王万忠¹, 吴发启²

(¹ 中国科学院 水利部 水土保持研究所; ² 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 利用人工模拟降雨试验, 研究了不同耕作管理措施对坡耕地降雨入渗的影响, 并采用有限差分法对入渗过程进行了数值模拟。结果表明, 土壤入渗速率的计算值与实测值吻合较好, 且耕作管理措施可明显增加坡面土壤的水分入渗, 在相同入渗时间情况下, 土壤稳渗速率大小排序为等高耕作> 人工掏挖> 人工锄耕> 直线坡, 在中小坡度和中小雨强条件下, 这种特征表现更为显著。

[关键词] 坡耕地; 降雨入渗; 耕作管理措施; 数值模拟

[中图分类号] S343.3; S152.7⁺2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)02-0069-04

黄土高原地区, 坡耕地面积占到耕地总面积的60%~70%, 水土流失非常严重, 其治理核心是降雨的就地拦蓄入渗^[1,2]。为了实现这一目标, 目前主要采用改变下垫面条件的水土保持工程措施、生物措施和耕作管理措施。由于耕作管理措施改变了坡面微地形, 增加了糙度, 使土壤水分入渗性能发生了变化。许多学者都纷纷进行这方面的研究, 并取得了一系列研究成果^[3~6], 但总体来看, 还缺乏系统性, 特别是对等高耕作、人工掏挖、人工锄耕等常用管理措施的研究几乎未见报道。同时, 由于天然降雨过程的不确定性, 使得对土壤入渗规律的研究存在着时间跨度长、工作量大、数据不够准确等问题。因此, 本研究以陕西淳化泥河沟流域坡耕地为例, 采用人工模拟降雨的方法, 分析不同耕作管理措施对降雨入渗的影响, 以期减少坡面径流, 提高降水利用效率, 发挥土壤生产潜力和改善生态环境提供科学的理论依据。

1 研究区概况

淳化泥河沟流域位于黄土高原沟壑区, 面积9.48 km², 流域北高南低, 海拔从1 193 m降至712 m, 呈长条状。坡塬占59.2%, 平均坡度在5°以上; 沟壑占40.8%, 坡度多在25°以上。流域多年平均气温9.8℃, 1月均温4.3℃, 7月均温23.1℃, 无霜期183 d, ≥10℃活动积温3 281℃, 太阳年辐射总量504.35 kJ/cm²。多年平均降水量600.6

mm, 最多878.9 mm, 最少为409.5 mm, 干糙度为1.1~1.3, 7~9月降水量占全年的50%以上, 暴雨频率高, 强度大, 常引发强烈的水土流失, 侵蚀模数为4 000~5 000 t/(km²·年)。土壤为黄土母质上发育的幼年侵蚀土壤黄壤土和呈点状分布的地带性黑垆土, 自然植被多存在于沟坡, 主要为草本、灌木, 塬面基本为人工植被。

2 研究内容与方法

采用有压给水针头式模拟人工降雨装置^[7]进行降雨入渗试验。降雨量的观测、径流和泥沙的收集均按《水土保持技术规范》要求进行; 土壤含水量和容重采用烘干法进行测定。按照当地农耕习惯, 设计等高耕作、人工掏挖和人工锄耕等常见耕作管理措施。措施地具体设计为, 等高耕作是在坡面上沿等高线, 垂直于坡面走向, 进行横向耕作, 形成沟和垄, 垄高10 cm, 垄距33 cm; 人工掏挖是在选定的样地上, 用锄头挖地, 并使地面保持掏挖后的原始状态; 人工锄耕是用锄头以常规方式对坡耕地进行锄挖。试验中, 均以耙平的直线坡地为对照。坡度参数设计为5°、10°、15°、20°和25°; 降雨强度设计为0.5~3.0 mm/min。各种试验均重复2次。

3 结果与分析

3.1 入渗模型的建立

由达西定律和质量守恒原理推导的土壤水分运

* [收稿日期] 2003-01-13

[基金项目] 中科院知识创新工程项目(KZCX1-06-01); 黄河基金(2001-0303)

[作者简介] 赵西宁(1976-), 男, 陕西渭南人, 在读博士, 主要从事水土资源高效利用及其效益评价研究。

动方程反映了土壤水分运动的基本规律,以含水量 θ 为因变量的垂直一维流动基本方程为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z}] - \frac{\partial k(\theta)}{\partial z}$$

式中, θ 为土壤含水量; t 为入渗时间; z 为垂向坐标 (土壤水分入渗深度); $D(\theta)$ 为土壤水分扩散率; $k(\theta)$ 为非饱和导水率。式中等式右边第一项表示吸力梯度作用,第二项表示重力作用。

在土壤水分入渗的初期阶段,土壤基质吸力起主要作用,在后期重力作用逐渐占优势,当累计入渗量逐渐加大,即表层土壤的含水率 $\theta(0, t)$ 很快由初始值 θ_0 增大到最大值 θ (θ 值接近于饱和含水率 θ_s , $\theta = 0.95\theta_s$),土壤的基质吸力作用往往可以不计,只认为入渗在重力作用下进行。因此,入渗方程的定解条件为:

初始条件: $\theta(z, t) = \theta_0, t = 0, z \geq 0$;

上边界条件: $\theta(0, t) = \theta_s, t = 0, z = 0$;

下边界条件: $\theta(z, t) = \theta_s, t = 0, z = L$ 。

式中, L 为入渗深度,试验中取值 $L = 30 \text{ cm}$; t 为入渗时间,试验中取值 $t = 80 \text{ min}$ 。

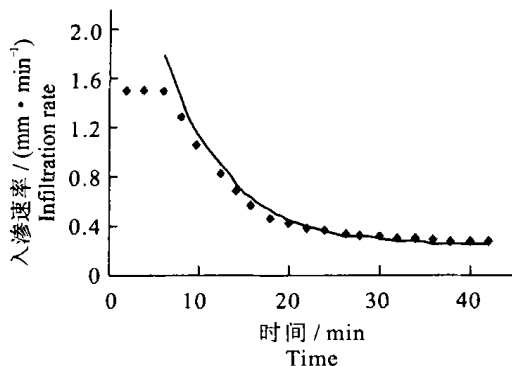


图 1 土壤入渗速率实测值与计算值的比较

·····, 实测入渗速率; —, 计算入渗速率

Fig 1 Comparison of real data and calculated

data on soil water infiltration rate

·····, Real data of infiltration rate;

—, Calculated data of infiltration rate

根据数值模拟结果,以降雨强度为 1.5 mm/min 、坡度为 10 的坡耕地为例,将不同耕作管理措施下的土壤入渗速率点绘成图 2。由图 2 可以看出,不同耕作管理措施对土壤入渗速率的影响效用不同,在相同入渗时间下,等高耕作入渗速率 > 人工掏挖 > 人工锄耕 > 直线坡,直线坡达到稳渗速率

3.2 模拟结果检验与分析

上述模型是一个二阶非线性偏微分方程, $D(\theta)$ 和 $k(\theta)$ 都是 θ 的函数,采用有限差分法求解该方程,将偏微分方程变成差分方程,把入渗时间和入渗深度离散化,用 VB 语言编写计算程序进行数值分析。程序输入的参数中,土壤水分扩散率 $D(\theta)$ 可由公式 $D(\theta) = aC^{b[8]}$ 求出,其中 $C = \theta/\theta_s$, θ_s 为饱和含水量。非饱和导水率 $k(\theta)$ 可由 $k(\theta) = C_w(\theta)D(\theta)^{[8]}$ 求出,其中 $C_w(\theta)$ 为比水容量。边界含水量 θ_0 和 θ_s 采用实测值。时间步长和深度步长分别为 $\Delta t = 0.05$ 和 $\Delta z = 1$,迭代计算允许误差为 0.05。以坡度为 10°;降雨强度为 1.5 mm/min 的直线坡地为例,将土壤入渗速率的实测结果和计算结果点绘成图 1。从图 1 可以看出,土壤入渗速率计算值与实测值随入渗时间的变化趋势除前 8 min 吻合程度较差以外,其余时段变化趋势基本一致,相关性较好。这主要是由于在降雨开始阶段,降雨强度小于土壤的入渗能力,入渗速率随降雨强度的大小而变化。从总体来看,模拟结果正确可靠。

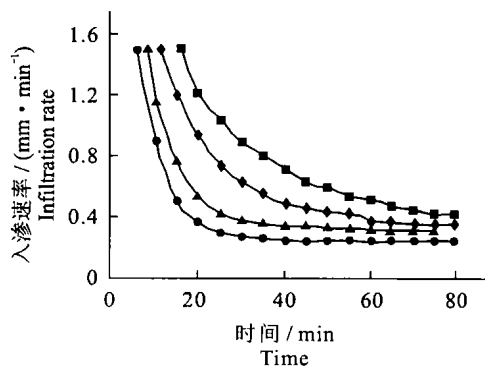


图 2 不同耕作管理措施下入渗速率随入渗时间的变化

- □ - . 等高耕作; - ◆ - . 人工掏挖;

- ▲ - . 人工锄耕; - ● - . 直线坡

Fig 2 Change of infiltration rates with infiltration time under different tillage management measures

- □ - . Control tillage; - ◆ - . Artificial digging;

- ▲ - . Artificial hoeing; - ● - . Linear slope

的时间最短,等高耕作达到稳渗速率的时间最长。

将不同坡度和不同降雨强度条件下,利用模拟计算所求出的不同耕作管理措施下的土壤稳渗速率结果分别点绘成图 3 和图 4。由图 3 可知,随着坡度增大,不同耕作管理措施下的土壤稳渗速率随之减小,当坡度由 5 增加到 25 时,等高耕作土壤稳渗速

率由 0.52 减小到 0.25 mm/m in, 直线坡由 0.30 减小到 0.20 mm/m in, 减大幅度为等高耕作> 人工掏挖> 人工锄耕> 直线坡。由图 4 可以看出, 随降雨强度增大, 不同耕作管理措施下的土壤稳渗速率也呈

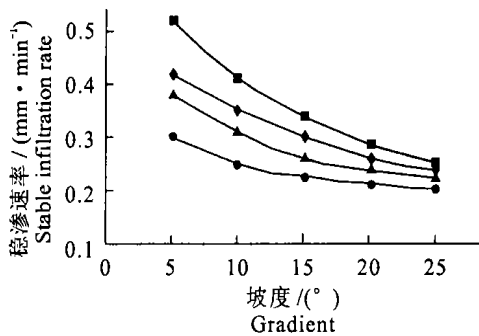


图 3 不同耕作管理措施下
稳渗速率随坡度的变化

- □ - . 等高耕作; - ♦ - . 人工掏挖;
- ▲ - . 人工锄耕; - ● - . 直线坡

Fig 3 Change of stable infiltration
rates with slope gradient under different
tillage management measures

- □ - . Control tillage; - ♦ - . A rtificial digging;
- ▲ - . A rtificial hoeing; - ● - . L inear slope

从上述分析可知, 在中小坡度和中小降雨强度条件下, 不同耕作管理措施对降雨入渗均有显著影响, 这可能与侵蚀过程中黄土“点棱接触侧斜支架式多孔结构”的坍塌^[2]和雨滴击溅所造成的表土密闭及坡面上水层的受力情况有关。这一结果也表明在坡耕地上, 尤其在缓坡耕地上, 合理采用不同的耕作管理措施, 可以减缓坡面径流, 提高土壤入渗能力, 是控制水土流失和改善生态环境的有效措施。以坡

现出减少趋势, 等高耕作的土壤稳渗速率由 0.58 减小到 0.32 mm/m in, 直线坡的土壤稳渗速率由 0.29 减小到 0.21 mm/m in, 其减大幅度也是等高耕作> 人工掏挖> 人工锄耕> 直线坡。

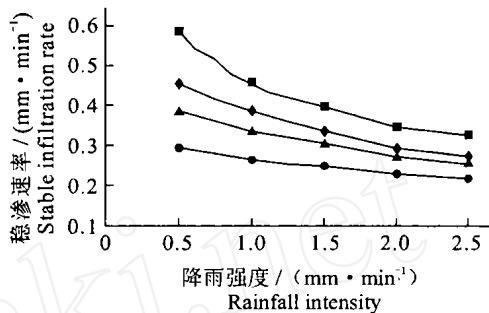


图 4 不同耕作管理措施下
稳渗速率随雨强的变化

- □ - . 等高耕作; - ♦ - . 人工掏挖;
- ▲ - . 人工锄耕; - ● - . 直线坡

Fig 4 Change of stable infiltration
rates with rainfall intensity under different
tillage management measures

- □ - . Control tillage; - ♦ - . A rtificial digging;
- ▲ - . A rtificial hoeing; - ● - . L inear slope

度 10 的坡耕地为例, 对不同降雨强度条件下的 24 组试验数据进行数值模拟 (见表 1), 并对其模拟结果求算术平均值得出, 与直线坡相比, 等高耕作、人工掏挖和人工锄耕分别可提高土壤入渗 63%, 38% 和 25%。这主要是由于等高耕作、人工掏挖和人工锄耕较直线坡地耕作要精细, 土壤结构较为疏松, 容重较小, 地面糙度较大, 因此, 其土壤稳渗速率较直线坡的大。

表 1 不同耕作管理措施对土壤稳渗速率的影响

Table 1 Effect of the different tillage management measures on soil stable infiltration rates

耕作类型 M anagement measure	降雨强度/ (mm · m in ⁻¹) Rain intensity	稳渗速率/ (mm · m in ⁻¹) Stable infiltration rate	耕作类型 M anagement measure	降雨强度/ (mm · m in ⁻¹) Rain intensity	稳渗速率/ (mm · m in ⁻¹) Stable infiltration rate
等高耕作 Control tillage	0.5	0.32	人工锄耕 A rtificial hoeing	0.5	0.24
等高耕作 Control tillage	1.0	0.35	人工锄耕 A rtificial hoeing	1.0	0.28
等高耕作 Control tillage	1.5	0.42	人工锄耕 A rtificial hoeing	1.5	0.33
等高耕作 Control tillage	2.0	0.50	人工锄耕 A rtificial hoeing	2.0	0.37
等高耕作 Control tillage	2.5	0.54	人工锄耕 A rtificial hoeing	2.5	0.38
等高耕作 Control tillage	3.0	0.55	人工锄耕 A rtificial hoeing	3.0	0.39
人工掏挖 A rtificial digging	0.5	0.28	直线坡 L inear slope	0.5	0.21
人工掏挖 A rtificial digging	1.0	0.33	直线坡 L inear slope	1.0	0.24
人工掏挖 A rtificial digging	1.5	0.35	直线坡 L inear slope	1.5	0.26
人工掏挖 A rtificial digging	2.0	0.38	直线坡 L inear slope	2.0	0.28
人工掏挖 A rtificial digging	2.5	0.39	直线坡 L inear slope	2.5	0.29
人工掏挖 A rtificial digging	3.0	0.40	直线坡 L inear slope	3.0	0.30

4 结 论

1) 土壤水分入渗模型的推导具有一定的理论基础, 各个参数物理意义明确, 结合试验的具体条件, 利用有限差分法对不同耕作管理措施下的降雨入渗过程进行数值模拟发现, 土壤入渗速率的计算结果与实测结果吻合较好, 精度较高。

2) 不同耕作管理措施对土壤入渗速率的影响效

用不同, 等高耕作最为显著, 其次是人工掏挖和人工锄耕, 在中小坡度和中小雨强条件下, 这种效用表现更为显著。在 10 坡耕地条件下, 与直线坡相比, 等高耕作、人工掏挖和人工锄耕分别可提高土壤入渗 63%, 38% 和 25%。在坡耕地上, 尤其在缓坡耕地上, 合理布置不同的耕作管理措施, 是减缓坡面径流, 提高土壤入渗能力, 控制水土流失和改善生态环境的有效措施。

[参考文献]

- [1] 范兴科, 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原水土保持措施效益评价试验研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 1- 6
- [2] 朱显谟, 田积莹. 强化黄土高原土壤渗透性及抗冲性的研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 1- 9
- [3] 李汝莘, 高焕文, 苏元升. 小四轮拖拉机播前压地对土壤物理特性及作物生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3(2): 65- 68
- [4] 王晓燕, 高焕文, 李玉霞, 等. 拖拉机轮胎压实对土壤水分入渗与地表径流的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(4): 57- 60
- [5] 王晓燕, 高焕文, 杜 兵, 等. 用人工模拟降雨研究保护性耕作下的地表径流与水分入渗[J]. 水土保持通报, 2000, 20(3): 23- 25
- [6] 王 千, 曾德超. 不同耕作措施对降雨入渗的影响[J]. 北京农业工程大学学报, 1991, 11(3): 32- 40
- [7] 袁建平, 蒋定生, 文妙霞. 坡地降雨入渗试验装置研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 24- 27.
- [8] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988 223- 257.

Effect of different tillage management measures on rainfall infiltration of slope farmland

ZHAO Xin-ling¹, WANG Wan-zhong¹, WU Fa-qiang²

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources,

Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry;

2 College of Resources and Environment, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A rainfall simulation experiment was carried out to assess the effects of different tillage management measures on rainfall infiltration of slope farmland, and the process of soil infiltration was simulated by using finite differential method. The results showed that soil infiltration rates by calculated is consistent with the experimental results for soil infiltration rates, and tillage management measures could remarkably improve soil infiltration rates. Under the experimental situation with same infiltration time, soil stable infiltration rate for contour tillage > artificial digging > artificial hoeing > linear slope. The effect of different tillage management measures on infiltration rate is more efficient for the condition of the less slope gradient and rainfall intensity.

Key words: slope farmland; infiltration; tillage management measure; numerical simulation