

基于Green-Ampt模型分析坡地种植玉米对降水的促渗作用

王健¹, 马璠^{1,2}, 孟秦倩^{1*}, 马玉红³, 吴发启¹

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 宁夏农林科学院, 银川 750000;
3. 西安市水利水土保持工作站, 西安 710000)

摘要:【目的】探究坡耕地玉米种植对降水入渗的影响,提高对降雨利用率。【方法】以玉米为对象,在3°~15°的坡地径流小区上,人工模拟降雨,测定降雨径流过程,采用水量平衡方法,分析了玉米对降水入渗的影响,利用修正的Green-Ampt模型对入渗过程进行了模拟,利用降雨后期入渗速率确定土壤表征导水率,根据产流时间及降雨强度,确定根系层土壤含水量参数,推求出了水分入渗过程。【结果】在玉米生长过程中,除抽雄后期外,伴随着玉米生长,坡面产流时间延迟,以抽雄期最为显著,平均产流时间由裸地的4.69 min推迟到17.98 min;玉米生长各阶段产流前累积入渗量较裸地明显增大,苗期、拔节期、抽雄期和抽雄后期分别较裸地提高了20.46%、130.91%、272.54%和235.93%;降雨期玉米地累积入渗量高于裸地,苗期、拔节期、抽雄期和抽雄后期分别较裸地增加了2.44%、6.33%、31.01%和24.13%;种植玉米可提高土壤表征导水率,提高土壤入渗能力,土壤含水量参数较裸地有一定提高。【结论】应用Green-Ampt模型的计算值与实测值密切相关,但由于Green-Ampt模型未考虑雨滴对地面打击压实作用,致使计算的土壤入渗能力比实测值偏大。

关键词:降雨入渗;坡耕地;玉米;黄土高原

中图分类号:TV121

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20170018

王健,马璠,孟秦倩,等. 基于Green-Ampt模型分析坡地种植玉米对降水的促渗作用[J]. 灌溉排水学报,2018,37(11):99-105,120.

0 引言

土壤水分入渗是降水、冰雪融水、灌溉水等进入土壤的一种复杂过程 and 水分转化的重要环节,也是水土保持学、农学等交叉学科的主要研究内容之一^[1-3]。黄土高原是旱地农业的发祥地,但水土流失强烈,如何有效利用有限的降水资源,发展当地农业生产并减少水土流失是重要的研究内容,因此,该区土壤入渗规律研究受到普遍重视。土壤入渗研究内容广泛,涉及不同土地利用类型、影响因素分析与模型模拟等^[4-8]。入渗速率受坡度、坡长、土壤、降雨及作物等因素影响^[9],而作物对降雨入渗的影响主要表现在2方面:1)通过影响土壤理化性质,间接作用于土壤入渗能力。作物根系在土体中分解可以增加溶质的扩散,即提高了土壤的渗透性^[10-11]。伴随着作物生长,土壤中生物性大孔隙的形成,促使入渗能力增加,作物根系在土壤中穿插,在其萎缩和分解之后会在土壤中遗留下许多根系通道^[12-13],增加了土壤孔隙度,改变了表层土壤结构,有利于水分的入渗^[14]。玉米植株周边区域的土壤入渗速率较田间其他区域高,且随着玉米生长不断增加,说明玉米根系对土壤入渗具有促进作用^[15]。与此类似,苜蓿根系分解后对土壤入渗能力也有较大的促进作用^[16]。作物对土壤入渗的影响主要源自于根系对土壤物理性质的改变。2)通过改变降雨在到达地表前的运移和分布来实现对入渗的影响^[17]。冠层截留改变了降雨的分配^[18],冠层可同时降低雨滴动能,有效防止溅蚀引起的孔隙堵塞,增加土壤入渗率^[19-22]。Dolan等^[23]研究表明冠层覆盖较大的作物影响行间渗透速率。Green和Ampt基于毛管理论,认为土壤含水量剖面存在陡的湿润锋面,提出了Green-Ampt模型^[24]。随后,许多学者通过对Green-Ampt模型中特征参数的对比分析,建立模型参数间的关系,补充与发展了Green-Ampt入渗模

收稿日期:2017-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41771308,41371273)

作者简介:王健(1973-),男,副教授,主要从事土壤侵蚀与流域管理方面的研究。E-mail: wangjian@nwsuaf.edu.cn

通讯作者:孟秦倩(1971-),女,副教授,主要从事农业水土研究。E-mail: W184388610@126.com

型,使其成为模拟坡面降雨入渗过程常用的手段^[24-27]。兹采用人工降雨,基于 Green-Ampt 模型,对黄土高原坡耕地上的玉米地入渗规律进行模拟,系统地探寻玉米在整个生长季内对降雨入渗的作用,明确其对入渗的影响程度,研究种植作物条件下黄土高原坡耕地坡面产流的机理,以期为黄土高原坡地农田水分管理、提高降水转化效率提供一定理论指导。

1 材料与方法

1.1 人工降雨入渗试验

1) 试验区概况

试验在西北农林科技大学水土保持与荒漠化防治教学实验基地的径流小区上进行。径流小区建于 2005 年,坡度分别为 3°、5°、10°和 15°,每个坡度有 4 个小区,共 16 个小区,规格为长 4 m、宽 1 m。小区内装填土壤为杨凌 0~20 cm 耕层壤土,填土干体积质量为 1.35 g/cm³。土壤颗粒组成:砂粒质量分数(>0.05 mm)为 3.97%,粉粒质量分数(0.005~0.05 mm)为 65.74%,黏粒质量分数(<0.005 mm)为 30.29%。土壤质地为粉质壤土,较为黏重。田间质量持水率为 23.01%。试验前,经测定各小区肥力基本一致,有机质质量分数为 0.50%~1.50%,全氮质量分数为 0.05%~0.13%。

2) 玉米种植情况

供试玉米为郑单 958。玉米株行距分别为 25、60 cm,种植密度 6.67 万株/hm²。种植方式为穴播,2014 年 6 月 20 日播种,相同坡度设置 3 个重复。为消除土壤表面和土质影响,裸地和玉米小区采用相同的水肥管理,每次试验前,采用钉耙对土壤表层进行松土,以 1 个裸地的 4 个时段入渗过程平均值作为对照。作物播种前,玉米地和裸地均按 2 500 kg/hm²和 400 kg/hm²一次性施入有机肥(腐熟鸡粪)和磷酸二铵。试验地施肥之后再行人工翻耕和播种。作物播种时间及后续田间管理均参考黄土高原大田实际情况进行。

3) 模拟降雨设计

模拟降雨设备采用中国科学院水土保持研究所水保实验设备工厂设计制造的侧喷式降雨机,降雨高度 7.5 m,有效降雨面积 5 m×7 m,率定后雨滴均匀度达 90%以上。

试验前 5 d,如遇降雨,采用简易棚遮挡,伴随土壤蒸发,土壤含水率降低,每天采用 TDR 测定土壤含水率,当 0~40 cm 土层平均含水率达到田间持水率的 65%时,进行人工降雨,雨强为 40 mm/h,降雨历时 1 h。同时针对裸地小区也进行人工降雨试验,降雨的同时,在小区的 4 个边角上放置自记雨量计,测定降雨强度及降雨量。

1.2 入渗量计算

入渗可分解为水分从垂直方向和水平方向进入土壤的过程,在试验中整个小区均匀降雨,各方向上水平运动相互抵消,试验中忽略水平方向的水分运动,仅考虑垂直方向上水分的入渗。坡面水量平衡,采用坡面水平投影面积进行计算。各小区用小桶每 3 min 收集 1 次坡面径流。入渗量按水量平衡原理进行推算,坡面入渗过程可表示为:

$$f = i - i_n - e - S_d - r(t), \quad (1)$$

式中: f 为入渗强度(mm/min); i 为降雨强度(mm/min); i_n 为植物截留率(mm/min); e 为蒸散发率(mm/min); S_d 为填注量(mm/min); $r(t)$ 为径流强度(mm/min),采用差分形式表示, $r(t) = \frac{dR(t)}{dt} = \frac{\Delta R}{\Delta t}$,其中 ΔR 为 Δt 时段径流深,即单位径流小区投影面积上在 Δt 时段的坡面径流量(mm)。玉米全生育期平均冠层截留量为 0.16 mm,其最大值为 0.331 mm^[24],通常在人工降雨不足 1 min 即可达到,因此,均衡计算过程中假定 i_n 在开始的 1 min 内呈线性变化;降雨过程中 e 可忽略不计; S_d 受制于人为管理,为消除填注影响,人为将小区坡面整平,地表坑洼蓄水量可忽略不计。故有:

$$\begin{cases} f = i - i_n - \frac{\Delta R}{\Delta t} & t \leq 1 \\ f = i - \frac{\Delta R}{\Delta t} & t > 1 \end{cases} \quad (2)$$

1.3 Green-Ampt 模型

Green-Ampt 模型是积水入渗模型^[25],其基本形式为:

$$f = K_s + \sqrt{0.5K_s A} t^{-1/2} = K_s + \sqrt{0.5S_f(\theta_n - \theta_i)A} t^{-1/2}, \quad (3)$$

$$F = \frac{K_s A}{f - K_s} = \frac{K_s S_f(\theta_n - \theta_i)}{f - K_s}, \quad (4)$$

$$K_s t = F - S_f(\theta_n - \theta_i) \ln \left[1 + \frac{F}{S_f(\theta_n - \theta_i)} \right], \quad (5)$$

式中: f 为入渗速率(mm/min); F 为累积入渗量(mm); K_s 为表征导水率(mm/min); A 为与土壤含水率有关的参数(mm), $A = S_f(\theta_n - \theta_i)$; S_f 为湿润锋土壤吸力(mm); θ_n 为饱和土壤含水率(m^3/m^3); θ_i 为初始土壤含水率(m^3/m^3)。

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $f = K_s$ 。Bouwer 建议采用稳定入渗率代替表征导水率^[33], 由此可以估算出 K_s 。

由式(4)可得:

$$A = S_f(\theta_n - \theta_i) = \frac{F(f - K_s)}{K_s}. \quad (6)$$

在降雨过程中, 开始时段土壤入渗能力大于降雨强度, 全部降雨渗入土壤中, 随着水分不断入渗, 湿润锋下移, 入渗速率递减。在坡面产生径流前, 所有水分渗入土壤, 其入渗过程为:

$$\begin{cases} F = \int_0^t (i - i_n) dt & t \leq t_1 \\ f(t) = i - i_n & t \leq 1 \\ f(t) = i & 1 < t \leq t_1 \end{cases} \quad (7)$$

当降雨强度超过入渗能力时, 地表形成积水, 局部开始产流, 产生坡面径流的时间即为地表开始积水的时间 t_1 , 亦即降雨强度大于土壤入渗强度的时间。积水后的入渗过程即可用 Green-Ampt 模型来表述, 在地表开始积水的时间 t_1 时($t = t_1$):

$$\begin{cases} F = it_1 - I_n & t = t_1 \\ f(t) = i & t = t_1 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: I_n 表示植物冠层截留量(mm)。将式(8)代入式(6), 则有:

$$A = S_f(\theta_n - \theta_i) = \frac{F(f - K_s)}{K_s} = \frac{(it_1 - I_n)(i - K_s)}{K_s}. \quad (9)$$

用式(9)即可求得 A 。

Green-Ampt 模型是积水入渗模型, 但降雨开始时, 地面并无积水。由于不是由 $t=0$ 开始积水, 所以无法直接用式(3)来表示入渗速率的变化。用 t' 来表示由开始就积水, 累积入渗量达到 F_1 时所需的时间。根据式(5)可得:

$$t' = \frac{F_1}{K_s} - \frac{A}{K_s} \ln \left(1 + \frac{F_1}{A} \right). \quad (10)$$

当 $t > t_1$ 时, 降雨强度大于土壤入渗能力, 地表形成积水, 可用积水入渗来描述, 对式(3)进行平移, 则其入渗速率可表示为:

$$f = K_s + \sqrt{0.5K_s A} [t - (t_1 - t')]^{1/2}. \quad (11)$$

在降雨入渗趋向于稳定时即可求得表征导水率 K_s , 试验中通过数据分析, 在 40 min 后, 入渗趋向于稳定, 由此采用 40 min 后入渗过程计算表征导水率 K_s 。根据产流时间和降雨强度, 可计算出 Green-Ampt 模型参数 A 。对于降雨过程土壤入渗, 在产流前, 通过式(7)表述, 产流后, 通过式(11)表述。

2 结果与分析

2.1 玉米不同生长阶段对土壤入渗作用

2.1.1 玉米不同生长阶段土壤入渗过程

在模拟降雨强度为 40 mm/h 条件下, 3°、5°、10° 和 15° 坡面在玉米不同生育阶段实测入渗过程见图 1。从图 1 可以看出, 在各坡度和各生育阶段, 坡面入渗速率均随时间推移而递减, 在产流开始时, 入渗速率递减较快, 随后缓慢递减, 在 40 min 后, 玉米生长各阶段坡面土壤入渗速率趋于稳定。同一坡度上, 玉米生长各生育阶段, 入渗速率均大于裸地, 抽雄期最大, 入渗速率表现为抽雄期 > 抽雄后期 > 拔节期 > 苗期 > 裸地。同一生

育期在各坡度间,随坡度增大,稳定入渗速率总体略有减小。随坡度增大水蚀造成的土壤细颗粒流失增大,团聚体数量减少及结构破坏,土壤颗粒间的通透性变差,进而影响到水分入渗^[30]。

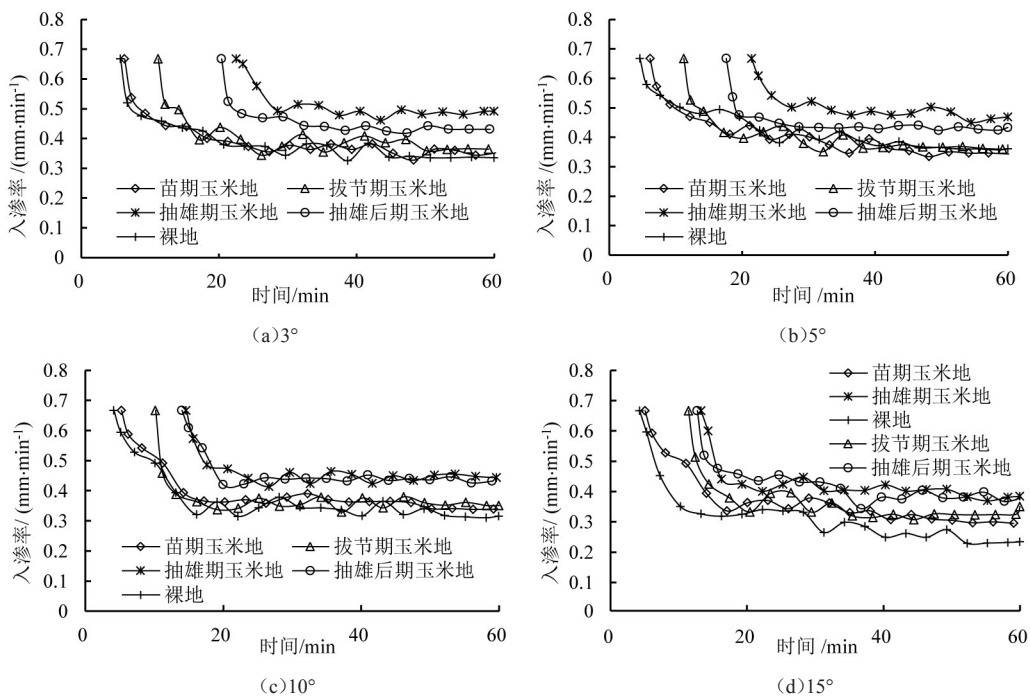


图1 玉米不同生育期水分入渗过程

2.1.2 玉米对产流时间的延迟作用

根据超渗产流的理论,当降雨强度大于等于土壤的入渗能力,地表积水后开始产流。故地表产流时间反映初期土壤的入渗能力,表1为坡地实测产流时间。由表1可知,在玉米生长各阶段,总体表现为产流时间随坡度增大而提前,坡度越大,产流时间越短。主要原因为:随坡度增大,超渗降雨在地表形成径流流速增大,水分在地表停留时间缩短,初始入渗率降低;另外,坡度越大,雨滴与坡面的接触点越小,夯实作用越大,溅起的土粒向下坡移动的量也越大,堵塞土壤孔隙的概率就越大,从而产流增强,而入渗能力减弱。

表1 玉米不同生育期坡地产流时间 min

土地类别	坡度/(°)				平均
	3	5	10	15	
裸地	5.72	4.62	4.17	4.27	4.69
苗期—玉米地	6.32	6.13	5.26	5.07	5.69
拔节期—玉米地	11.20	11.22	10.22	11.27	10.98
抽雄期—玉米地	22.53	21.43	14.67	13.27	17.98
抽雄后期—玉米地	20.40	17.60	14.03	12.72	16.19

玉米生长过程中,苗期、拔节期、抽雄期和抽雄后期,4个坡度平均产流时间分别为5.69、10.95、17.98和16.19 min。除抽雄后期略有降低外,均随玉米生长而逐渐增大,各阶段产流时间均长于裸地4.69 min。随着玉米生长,使得坡面产流时间明显推迟。

总体来看,随着玉米生长,土壤入渗能力增强,产流时间推迟,到达土壤稳定入渗的时间也推后。

2.1.3 累积入渗量

玉米不同生育期对产流前累积入渗量和降雨期累计入渗量具有不同影响。选择裸地作为对照,在此基础上计算了玉米地的入渗量增强效应(表2)。

玉米种植各生育期,其产流前累积入渗量均高于裸地。在各坡度不同生育期产流前累积入渗量在2.78~14.69 mm之间,4个坡度平均以抽雄期最大,为11.65 mm,苗期最小为3.77 mm,均高于裸地的(3.13 mm)。苗期、拔节期、抽雄期和抽雄后期玉米地入渗量分别较裸地增加了20.46%、130.91%、272.54%和235.93%。

同样,与裸地相比,玉米地降雨过程中的累积入渗量也明显增大,苗期、拔节期、抽雄期和抽雄后期,4个坡度小区的平均累积入渗量分别为25.80、26.77、32.99和31.26 mm,均高于裸地的25.18 mm;平均累积入渗

量分别增加了2.44%、6.33%、31.01%和24.13%。

各阶段玉米地入渗速率均大于裸地。因此,在同一坡度下,除抽雄后期外,产流前和降雨期的累积入渗量均随玉米生长而逐渐增加。坡度一定程度上减少了产流前入渗量和降雨时入渗量,随坡度增大累积入渗量均略有降低。

表2 产流前累积入渗量和降雨期累积入渗量

土地类别	参数	产流前累积入渗量					降雨期累积入渗量				
		坡度/(°)				平均值	坡度/(°)				平均值
		3	5	10	15		3	5	10	15	
裸地	入渗量/mm	3.81	3.08	2.78	2.84	3.13	26.71	27.37	25.25	21.39	25.18
苗期—玉米地	入渗量/mm	4.18	4.06	3.48	3.35	3.77	26.33	26.87	25.75	24.23	25.80
	较裸地增加/%	9.79	31.87	25.23	17.79	20.46	-1.42	-1.81	1.97	13.28	2.44
拔节期—玉米地	入渗量/mm	7.37	7.38	6.72	7.42	7.22	27.63	27.61	26.36	25.49	26.77
	较裸地增加/%	93.47	139.90	141.79	160.79	130.91	3.44	0.89	4.42	19.14	6.33
抽雄期—玉米地	入渗量/mm	14.69	13.96	9.45	8.51	11.65	35.99	34.81	31.33	29.82	32.99
	较裸地增加/%	285.52	353.48	240.06	199.37	272.54	34.75	27.20	24.10	39.40	31.01
抽雄后期—玉米地	入渗量/mm	13.32	11.45	9.07	8.20	10.51	32.15	32.77	30.83	29.27	31.26
	较裸地增加/%	249.44	272.03	226.53	188.15	235.93	20.35	19.74	22.12	36.83	24.13

2.2 玉米不同生长阶段的Green-Ampt模型参数

2.2.1 表征导水率 K_s

结合Green-Ampt模型,确定玉米不同生长阶段的稳定入渗速率,即为表征导水率(K_s)。依据前人的研究成果,可用降雨产流达到近似稳定后数分钟的平均入渗速率来反映稳定入渗速率^[29]。由表3可知,在试验雨强条件下,各坡度在玉米的各生育期,其表征导水率均高于裸地,最大为玉米抽雄期3°坡面,其表征民水率为0.49 mm/min,最小为裸地15°坡面,其表征导水率为0.30 mm/min。在玉米生长过程中,苗期、拔节期、抽雄期和抽雄后期,4种坡度小区的平均稳定入渗速率分别为0.34、0.35、0.44和0.42 mm/min。除抽雄后期略有降低外,均随玉米生长而逐渐增大,各阶段稳定入渗速率均大于裸地的稳定入渗速率(0.33 mm/min)。苗期、拔节期、抽雄期和抽雄后期其表征导水率与裸地相比,平均增强率分别为0.60%、5.09%、32.63%和25.75%。

表3 玉米不同生育阶段对土壤表征导水率

土地类别	参数	坡度/(°)				平均值
		3	5	10	15	
裸地	$K_s/(mm \cdot min^{-1})$	0.36	0.36	0.32	0.30	0.33
苗期—玉米地	$K_s/(mm \cdot min^{-1})$	0.36	0.35	0.34	0.31	0.34
	较裸地增加/%	-2.47	-2.54	7.26	1.67	0.60
拔节期—玉米地	$K_s/(mm \cdot min^{-1})$	0.36	0.36	0.35	0.32	0.35
	较裸地增加/%	0.00	2.25	11.67	8.00	5.09
抽雄期—玉米地	$K_s/(mm \cdot min^{-1})$	0.49	0.46	0.45	0.38	0.44
	较裸地增加/%	33.79	29.58	40.69	26.33	32.63
抽雄后期—玉米地	$K_s/(mm \cdot min^{-1})$	0.43	0.43	0.44	0.38	0.42
	较裸地增加/%	18.41	21.13	37.54	27.33	25.75

2.2.2 土壤含水率参数 A

利用Green-Ampt模型,对玉米不同生育阶段土壤含水率参数 A 进行计算拟合,结果见表4。从表4可以看出,玉米各生育期参数 A 大于裸地,而在玉米生长各阶段和各坡度间无明显规律。其原因为湿润锋处土壤基质吸力与土壤含水率高度敏感,基质吸力与土壤含水率间呈指数函数关系^[33],微小的土壤含水率波动将导致土壤基质吸力较大变化,致使入渗参数变化较大。

表4 玉米不同生育阶段参数 A mm

土地类别	坡度/(°)				平均值
	3	5	10	15	
裸地	3.19	2.70	3.07	5.28	3.56
苗期—玉米地	3.67	3.76	3.35	3.97	3.69
拔节期—玉米地	6.13	6.18	5.94	7.85	6.52
抽雄期—玉米地	5.40	6.25	4.66	6.45	5.69
抽雄后期—玉米地	7.28	6.32	4.80	6.09	6.12

2.3 入渗模型计算结果对比分析

在获取参数 K_s 和 A 的基础上,应用式(11)计算降雨过程中各时刻水分入渗速率。图2为不同坡度下,玉

米生长不同阶段水分入渗速率实测值与计算值。从图2可以看出,模型模拟值与实测值呈现较好的线性关系,绝大多数点均位于1:1线上侧,说明模型计算值与实测值相比偏大。其原因为:在降雨过程中,雨滴对地表的打击使得地表土壤产生压实作用,地表团聚体遭到破坏,使地表产生结皮,随着结皮的发生,水分的入渗受到一定阻滞,降低了土壤渗透速率,土壤的入渗主要由表层结皮控制,这是因为表层结皮的导水阻力远大于下面的渗透层的导水阻力^[35]。而在应用Green-Ampt模型模拟过程中,未考虑结皮的作用,致使计算入渗速率偏大。

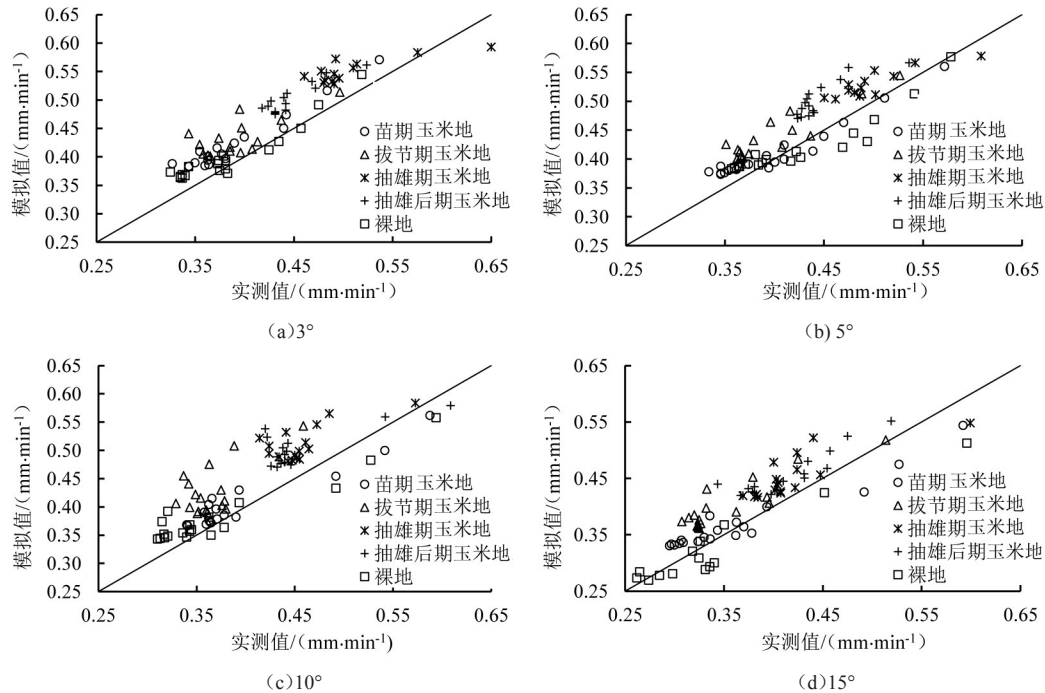


图2 不同降雨入渗速率实测值与计算模拟值对比

3 讨 论

种植玉米延迟了地表径流的形成,增加了土壤前期入渗量。伴随作物生长发育,叶面积指数不断增大,对地表的覆盖作用越来越明显,雨滴对地表的打击作用减少,地表板结减弱,水分入渗增加。在裸地表面,有明显结皮产生,裸地受雨滴打击相对强烈,地表土壤结构易遭破坏,致使分散的细小颗粒阻塞地表孔隙,形成板结,土壤渗透性下降,结皮作用较大地削弱土壤入渗能力^[31]。通过Green-Ampt模型模拟降水入渗规律,模拟值略大于实测值,主要是由于地表结皮的影响,结皮改变了地表土壤结构,形成一层阻水层,限制了水分的入渗,结皮的阻渗作用已得到研究证实^[35]。

玉米生长过程中,表层土壤结构发生改变,根系在土壤中穿插、分解等作用使得土壤中形成较大孔隙,促使入渗能力增加,Prieksat等^[15]通过田间试验证明了玉米植株周边区域的土壤入渗速率较田间其他区域高,Meek等^[16]也发现了苜蓿对土壤入渗能力的促进作用。

Green-Ampt模型用于描述积水入渗过程,而在坡面降雨情况下,地表无法形成积水,通过对模型平移,构建非积水条件下入渗模拟,并通过坡面玉米地人工降雨试验实测结果进行验证,平移后的Green-Ampt模型可用来较好地描述降雨入渗过程,与董艳慧等^[30]的研究结果相同。

4 结 论

1)玉米能有效延迟坡面产流时间,抽雄期玉米地各坡度产流时间平均为17.98 min,与裸地产流时间(4.69 min)相比,有效推迟坡面产流时间。

2)降雨产流前玉米地累积入渗量和降雨过程中累积入渗量均高于裸地,除抽雄后期外,伴随玉米生长,降雨产流前累积入渗量和降雨过程中累积入渗量逐渐增大,产流前累积入渗量最大为抽雄期玉米地,较裸地提高了272.54%。

3)玉米生长改变了降雨对地面的作用,应用Green-Ampt模型所得土壤表征导水率随玉米生长呈现一定

增大趋势,3°坡面土壤表征导水率最大,为0.49 mm/min,大于同坡度裸地。玉米各生育期土壤参数 A 大于裸地,但在各生育期和坡度间无明显规律。

4)应用Green-Ampt进行计算水分入渗过程,计算值与实测值呈现较好的相关关系,Green-Ampt模型可描述水分入渗过程,但由于模型未考虑降雨对地表作用,计算值略大于实测值。

参考文献:

- [1] 王艳萍,王力,韩雪,等.黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征[J].生态学报,2015,35(22):7 571-7 579.
- [2] BERNARD T N, RICHARD W, PATRICK E, et al. Factors influencing ground-water recharge in the eastern united states[J]. Journal of Hydrology, 2007, 332(1/2):187-205.
- [3] SALLY D L, THOMAS J S, GUILLERMO H, et al. Effect of corn or soybean row position on soil water[J]. Soil Science, 2010, 175(11): 530-534.
- [4] 张杰,韩同春,豆红强,等.探讨变雨强条件下的入渗过程及影响因素[J].岩土力学,2014,35(S1):451-456.
- [5] 刘利华,费良军,朱红艳,等.含沙率对浑水膜孔灌单孔自由入渗特性的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(12):62-67.
- [6] BABACAR Ndiaye, MICHEL Esteves, JEAN Pierre Vandervaere, et al. Effect of rainfall and tillage direction on the evolution of surface crusts, soil hydraulic properties and runoff generation for a sandy loam soil[J]. Journal of Hydrology, 2005, 307(1/4): 294-311.
- [7] 朱磊,尤今,陈玖泓.裂隙网络对坡面流及土壤水分入渗影响[J].灌溉排水学报,2017,36(12):95-100.
- [8] 胡彬,程东娟,张洁.秸秆条施对土壤水分运移分布的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(1):29-32.
- [9] 黄俊,金平伟,李敏,等.径流小区尺度土壤入渗率影响因子与估算模型研究[J].农业机械学报,2016,47(8): 171-178.
- [10] 李涛龙,胡笑涛,王平,等.基于茎秆直径微变化的拔节期玉米水分亏缺诊断指标研究[J].灌溉排水学报,2017,36(7): 18-21, 37.
- [11] GISH J T, JURY A W. Estimating solute travel times through a crop root zone[J]. Soil Science, 1982, 133(2): 124-130.
- [12] 高朝侠,徐学选,字苗子,等.黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响[J].应用生态学报,2014,25(6): 1 578-1 584.
- [13] BARLEY K P. Effects of root growth and decay on the permeability of a synthetic sandy loam[J]. Soil Science, 1954, 78(3): 205-210.
- [14] 卜囡,尚松浩,毛晓敏,等.层状土入渗试验中指流发育的分形特征及入渗规律[J].水动力学研究与进展,2012,27(2): 183-189.
- [15] PRIEKSAT M A, KASPAR T C, ANKENY M D. Positional and temporal changes in ponded infiltration in a corn field[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(1): 181-184.
- [16] MEEK B D, DETAR W R, ROLPH D, et al. Infiltration rate as affected by an alfalfa and no-till cotton cropping system[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(2): 505-508.
- [17] 傅斌,王玉宽,朱波,等.紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J].农业工程学报,2008,24(7): 39-43.
- [18] LAMM F R, MANGES H L. Partitioning of sprinkler irrigation water by a corn canopy[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2000, 43(4): 909-918.
- [19] 马波,马璠,李占斌,等.模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响[J].农业工程学报,2014,30(16): 136-146.
- [20] 张仁陟,罗珠珠,蔡立群,等.长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤物理质量的影响[J].草业学报,2011,20(4): 1-10.
- [21] KOHL R A, SCHUMACH T E. Infiltration with porous and nonporous simulated residue[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 54(54): 574-577.
- [22] 吴秋菊,吴佳,王林华,等.黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响[J].土壤学报,2015,52(2): 303-311.
- [23] 戴佳信,李就好,史海滨,等.河套灌区套种模式下综合作物系数的试验研究[J].灌溉排水学报,2017,36(1): 9-15.
- [24] 马波,马璠,李占斌,等.模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响[J].农业工程学报,2014,30(16): 136-146.
- [25] GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil physics: 1. Flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911, 4(1): 1-24.
- [26] 史晓楠,王全九,巨龙.微咸水入渗条件下Philip模型与Green-Ampt模型参数的对比分析[J].土壤学报,2007,44(2): 360-363.
- [27] 彭振阳,黄介生,伍靖伟,等.基于分层假设的Green-Ampt模型改进[J].水科学进展,2012,23(1): 59-66.
- [28] SHU Tungchu. Infiltration during an unsteady rain[J]. Water Resources Research, 1978, 14(3): 461-466.
- [29] 郭向红,孙西欢,马娟娟,等.不同入渗水头条件下的Green-Ampt模型[J].农业工程学报,2010,26(3): 64-68.
- [30] 赵晓光,吴发启,姚军.人工模拟坡耕地入渗率研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(5): 39-43.
- [31] WANG J, WATTS D, MENG Q, et al. Influence of surface crusting on infiltration of a Loess Plateau Soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(3): 683-692.
- [32] 许登科,杨泽元,郑志伟,等.陕北风沙草滩区包气带含水率、地下水埋深与降雨量的关系研究[J].灌溉排水学报,2017,36(1): 22-28.
- [33] FRASER A, HARROD T, HAYGARTH P. The effect of rainfall intensity on soil erosion and particulate phosphorus transfer from arable soils[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(12): 41-45.
- [34] 时荣超,佟玲,何柳月,等.种植密度对制种玉米耗水量的影响及模型验证[J].灌溉排水学报,2017,36(4): 66-71.
- [35] 张凌一,李波,魏新光,等.辽宁棕壤土区不同滴灌施氮模式对玉米光合特性、产量及品质的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(3): 26-31.
- [36] 董艳慧,杨路华,卜卿,等.Green-Ampt两阶段模型的平移及衔接[J].中国农村水利水电,2007(12): 5-8.

(下转第120页)

crease rate, investment, land saving rate and water saving level. Through refining each index score, we obtained the assignment criteria. Using the Delphi method, we constructed the weight of each index calculated its final score. 【Result】 The overall performance of micro-irrigation was the best with the scores of drip irrigation and micro-sprinkler irrigation being 2.42 and 2.77 respectively, followed by conventional sprinkler irrigation, water saving border-irrigation, surge irrigation and water-saving furrow irrigation. Small border irrigation was the worst, with a score of 5.14. The scores of economic efficiency and adaptability of all irrigation methods had strong competition. The development of those irrigation methods showed that the future irrigation would have good adaptability and economic efficiency. 【Conclusion】 From the perspective of macro scale, irrigation technology has been developing in the direction of good adaptability and economic efficiency. Improving the adaptability of instrument-based irrigation and the economics of non-instrumental irrigation is hence the future in developing water-saving irrigation technology.

Key words: water-saving irrigation; comprehensive performance; evaluation; Delphi method

责任编辑:陆红飞

(上接第 105 页)

Using the Green-Ampt Model to Analyze Enhanced Infiltration in Slope Corn Field in the Loess Plateau

WANG Jian¹, MA Fan^{1,2}, MENG Qinqian^{1*}, MA Yuhong³, WU Faqi¹

(1.Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750000, China; 3. Xi'an Water and Soil Conservation Station, Xi'an 710000, China)

Abstract: 【Objective】 Cropping alters soil structure and hence hydrological cycle. This paper aimed to study the influence of corns planted in slope on water infiltration and the water use efficiency. 【Method】 The experiment was conducted on a slope with slope angle of 3° to 15°; the infiltration of an artificial rainfall was measured. The infiltration process was simulated using the Green-Ampt model, and the steady infiltration rate was determined based on the infiltration rate measured at the late stage of the experiment. We also calculated water deficit parameter of the root zone soil and derived soil water infiltration processes based on the surface-runoff time and the precipitation intensity. 【Result】 The corn field intercepted precipitation and thus delayed the occurrence of surface runoff. The capacity of the interception increased gradually as the corn grew. The efficacy of the tasseling period in reducing surface runoff was most notable, with the average runoff time delayed from 4.69 min to 17.98 min. The cumulative infiltration before runoff occurred was higher than that on a bare surface, increasing by 20.46%, 130.91%, 272.54%, and 235.93% respectively on the seedling, jointing, tasseling and late tasseling stages. The cumulative infiltration in the corn field was also higher than that on a bare surface, increasing by 2.44%, 6.33%, 31.01% and 24.13% respectively on the above four growth stages. Planting corn increased soil hydraulic conductivity, thus improving its infiltration capacity and soil water content, compared to bare soil surface. 【Conclusion】 The Green-Ampt model is able to simulate water infiltration in the slope planted with corn and the calculated infiltration rate can match with the measured date despite a slight overestimation because the model does not consider the surface compaction induced by raindrops.

Key words: rainfall infiltration; sloping land; corn; Loess Plateau

责任编辑:陆红飞