模拟沟灌条件下辽西褐土产流起始时间的影响因素

武 敏，范昊明，杨晓珍，周丽丽，贾燕锋，王铁良

（沈阳农业大学 水利学院，辽宁 沈阳 110866）

摘 要：[目的] 明确不同坡度、容重、含水率、灌水量对辽西褐土沟灌侵蚀产流起始时间的影响，以减少褐土沟灌侵蚀，指导农田灌溉。[方法] 采用正交设计进行了室内模拟垄沟冲刷试验，采用 4 因素 3 水平的响应曲面分析法建立产流起始时间、侵蚀量的二次多项式数学模型。[结果] 产流时间都在 20.05 s 之内，最小的为 3.03 s；产流起始时间、侵蚀量的二次多项式数学模型决定系数 R^2 分别为 0.998 9 和 0.999 2。[结论] 坡度、灌水量、土壤容重、土壤含水率与产流时间呈负相关关系，对产流时间有着显著影响，且灌水量＞坡度＞土壤含水率＞土壤容重；试验中建立的二次多项式数学模型拟合效果良好。通过数值计算，提出不同坡度下满足侵蚀量最小时的灌溉模式。

关键词：模拟沟灌；产流起始时间；褐土；响应曲面法

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2015)03-0034-05 **中图分类号**：S152.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.002

Factors Affecting Initial Time of Runoff Under Simulated Furrow Irrigation in Western Liaoning Cinnamon Soil

WU Min, FAN Haoming, YANG Xiaozhen, ZHOU Lili, JIA Yanfeng, WANG Tieliang

(*College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang, Liaoning* 110866, *China*)

Abstract: [Objective] To analyze the influence of different slope, soil bulk density, soil moisture content, and irrigation water amount on initial time of runoff during furrow irrigation erosion of cinnamon soil in Western Liaoning Province, in order to reduce the furrow irrigation erosion and guide the irrigation further. [Methods] The scouring experiment was conducted by orthogonal design. The method of response surface analysis with 4 factors and 3 levels was adopted to build a quadratic equation for initial time of runoff and soil erosion amount. [Results] The initial time of runoff was within 20.05 s and the smallest was 3.03 s. The determination coefficient of the quadratic equation was 0.998 9 and 0.999 2, respectively. [Conclusion] Slope, irrigation amount, soil bulk density and soil moisture content were negatively correlated with initial time of runoff, and had a significant effect on it. The influence order was as following: irrigation amount＞slope＞soil bulk density＞soil moisture content. The quadratic equation build in the experiment was well fitted. Irrigation mode of minimal erosion amount under different slope was obtained by numerical calculation.

Keywords: **simulated furrow irrigation; initial time of runoff; cinnamon soil; response surface methodology**

中国及世界上广泛存在的土壤侵蚀、非点源污染、水质恶化等问题都与灌溉侵蚀有着密切的关系[1-2]。Berg 和 Carter[3]在美国 Idaho 州南部进行的沟灌研究表明，每年由灌溉引起的侵蚀量为 98～15 483 t/km^2。Koluvek 等[4]在美国 Washington 州的研究表明，每季节由灌溉引起的侵蚀量为 49～12 288 t/km^2，在 Wyoming 州的研究表明，单次灌溉引起的侵蚀量为 246～5 407 t/km^2。国内外众多学者围绕坡面降雨入渗、产流机理、降雨—入渗—产流过程的影响因素做了大量研究[5-12]。产流时间的影响因素有地表糙度、砾石覆盖、降雨强度、坡度、坡长、土壤初始含水量、作物覆盖等。郭建华等[13]指出地表糙度越大，产流时间越靠后；王小燕等[14]提出不同降雨强度下，壤中流产流时间与砾石覆盖度呈负相关关系；卫喜国

收稿日期：2014-01-20 修回日期：2014-02-28

资助项目：国家自然科学基金项目“东北黑土低山丘陵区融雪侵蚀机理与过程研究”(41371272)；国家自然科学基金项目“辽西褐土旱作农田区沟灌侵蚀机理与侵蚀过程研究”(41071183)

第一作者：武敏(1977—)，男(汉族)，山西省大同市人，硕士，讲师，主要从事土壤侵蚀过程与水土环境效应评价研究。E-mail：wumin7711@163.com。

通信作者：王铁良(1965—)，男(汉族)，辽宁省黑山县人，博士，教授，主要从事农业水土环境、设施环境与结构研究。E-mail：tieliangwang@126.com。

等[15]研究发现坡面产流历时与降雨强度呈指数函数关系,与坡度呈对数函数关系;辛伟等[16]指出地表径流初始产流时间随着雨强和坡度的增加而加快;张赫斯等[17]研究表明,随坡度的增大,产流时刻提前,泥沙起动和产沙突增的雨强临界减小;陈俊杰等[18]利用人工降雨试验研究指出产流时间随坡度的变化并没有显著的规律性,坡长增长对产流时间的提前有促进作用;王晓燕等[19]指出产流时间主要受土壤含水量的影响,并与土壤含水量呈正相关;吴发启等[20]发现坡面产流历时与土壤容重、初始含水率、坡度、降雨强度、耕作管理措施呈负相关;王荚文等[21]研究了谷子地不同留茬高度及不同坡度的水土保持效应,指出谷子地 5,10 及 15 cm 留茬高度对产流时间没有显著影响,坡度的变化对产流时间无显著影响。关于降雨产流时间与上述影响因素之间的函数关系,不同研究者所得结论不尽相同。

沟灌侵蚀与自然降雨侵蚀比较而言,在侵蚀水流特征、侵蚀作用时土壤的性质、侵蚀作用方式、侵蚀作用时间、空间、侵蚀系统组成等方面都有所不同。国内外关于沟灌时灌水量、坡度、土壤容重、土壤含水量等诸多因子对开始产流时间影响的研究报道还很罕见。有研究表明沟灌引起耕地水土流失严重[3-4],故本文以辽西褐土为研究对象,采用模拟灌溉装置,选择不同灌水量、坡度、土壤容重、土壤含水量进行 4 因素 3 水平正交灌溉试验,探究沟灌产流起始时间同其他影响因子之间的关系,以期为研究褐土沟灌侵蚀、指导农田灌溉提供前提条件。

1　材料和方法

1.1　试验用土

试验用土于 2010 年 9 月取自辽宁省西部朝阳市旱作农田表层,深 0—20 cm,地理坐标为东经 120°27′29″,北纬 41°32′13″,属于褐土中的典型褐土亚类、钙镁质褐土土属,有黏粒和钙的积聚,具有明显的黏化作用和钙化作用,其成土母质为二元基岩风化物,上部为砂岩坡积物,下部为白云质灰岩残积物,适宜农作物生长。试验用土的机械组成和理化性质如表 1 和表 2 所示。

表 1　试验用土机械组成

土壤名称	石砾/(g·kg^{-1})	颗粒组成/(g·kg^{-1})				黏化率	
	>20 mm	2.0～0.2 mm	0.2～0.02 mm	0.02～0.002 mm	<0.002 mm	B/C	B/A
褐土	111.1	73.3	489.8	198.6	238.3	1.00	1.05

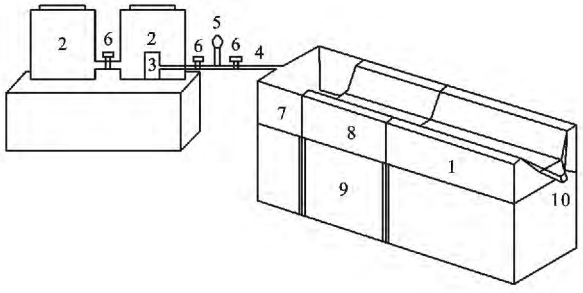
注:A 表示表土层;B 表示黏化层;C 表示母质层。

表 2　试验用土理化性质

pH 值	碳酸盐含量/(g·kg^{-1})			有机质/(g·kg^{-1})	全氮(N)/(g·kg^{-1})	全磷(P_2O_5)/(g·kg^{-1})	全钾(K_2O)/(g·kg^{-1})
	总量	$CaCO_3$	$MgCO_3$				
7.6	23.0	17.4	5.6	39.3	2.08	0.85	25.3

1.2　试验装置

试验在沈阳农业大学土工实验室进行,试验装置主要由试验土槽和供水装置两部分构成(图 1)。二者通过连接装置使供水装置的水输入到试验土槽。试验土槽和连接装置放置于同一具有调节坡度功能的试验铁架上。试验土槽为长 1.5 m,宽 0.7 m,深 0.5 m 的矩形防锈铁板槽,为了模拟野外农田灌溉垄沟,在试验土槽填土时中间留有上底宽 0.6 m,下底宽 0.3 m,深 0.3 m 的梯形断面,与实际农田保持一致。供水设备包括供水容器、水泵、1 寸 PVC 水管、压力表、控制阀。供水容器是容积为 2 m^3 的塑质水桶。连接装置由稳流槽和导流槽组成,导流槽断面为长 1 m,上底宽 0.6 m,下底宽 0.3 m、深 0.3 m 的梯形断面,试验土槽装土后与导流槽下端齐平,供水通过稳流后可平稳。



1 试验土槽;2 供水容器;3 水泵;4 PVC 管;5 压力表;6 控水阀;7 稳流槽;8 导流槽;9 试验铁架;10 集流槽

图 1　试验装置示意图

试验时供水容器中的水由水泵传输到连接装置,通过稳流槽、导流槽传输到试验土槽,达到稳流的目的。试验所需流量通过控制阀控制,同时通过压力表

监测流量(试验前,通过率定所需供水量,记下此时压力表读数)。土槽末端连接集流槽,用于收集径流泥沙样品。

1.3 试验设计

根据灌溉定额和辽西旱田实际情况,试验选用坡度、含水率(反映土壤干燥程度)、灌水量、容重(反映犁底层不同容重)4个影响因子,每个因子采用3个水平,采用国内外广泛使用的正交科研设计方法,各因素间不考虑交互作用影响,选用不含交互作用的$L_9(3^4)$正交试验表位本次试验设计用表,试验共做9组沟灌侵蚀模拟试验,每次试验灌溉时间为20 min,详见表3。

表3 产流时间直观分析结果

试验号	坡度 S/%	容重 D/(g·cm^{-3})	含水率 M/%	灌水量 G/(l·s^{-1})	产流时间 T/s	侵蚀量 E/kg
1	1	1.2	8	0.3	20.05	0.01
2	1	1.3	18	0.9	7.80	1.21
3	1	1.4	28	1.5	5.64	2.36
4	3	1.2	18	1.5	4.37	4.89
5	3	1.3	28	0.3	10.45	0.03
6	3	1.4	8	0.9	6.74	12.23
7	5	1.2	28	0.9	4.11	9.02
8	5	1.3	8	1.5	3.13	15.91
9	5	1.4	18	0.3	9.05	4.79
M_{T1}	11.16	9.51	9.97	13.18		
M_{T2}	7.19	7.13	7.07	6.22		
M_{T3}	5.43	7.14	6.73	4.38		
RT	5.73	2.38	3.24	8.80		

注:M_{T1}—M_{T3}表示产流时间各因素1—3水平的均值;RT表示水平极差。

2 结果与分析

2.1 产流影响因素分析

产流时间直观分析和方差分析结果(表3和表4)看出,9次试验的产流时间都在20.05 s之内,最小的为3.03 s,灌水量R值为8.80,F值为378.42,在4个因素中均是最大;其次坡度R值为5.73;F值为153.88,仅次于灌水量;而土壤含水量与土壤容重的R值与F值分别为3.24,2.38,54.67,39.68,与灌水量、坡度相比其值明显较小,对产流时间的影响不如坡度、灌水量显著,可见坡度、灌水量、土壤容重、土壤含水率都对产流时间有着显著影响并且灌水量>坡度>土壤含水率>土壤容重。

表4 产流时间方差分析结果

方差来源	Ⅲ型平方和	df	均方	F	sig.
校正模型	415.32①	8	51.92	156.66	0.00
截距	1 148.32	1	1 148.32	3 465.20	0.00
灌水量	250.80	2	125.40	378.42	0.00
坡度	101.99	2	50.99	153.88	0.00
容重	26.30	2	13.15	39.68	0.00
含水率	36.23	2	18.12	54.67	0.00
误差	2.98	9	0.33		
总计	1 566.63	18			
校正的总计	418.30	17			

注:①R^2=0.993(调整R^2=0.987)。

以上分析试验中灌水量对产流时间影响最显著,通过回归分析可知不同影响因素与产流时间呈幂函数关系($y=ax^b$,其中a,b为常数),其回归参数见表5。从表5可以看出,灌水量与产流时间呈负相关关系;即灌水量越大,产流时间越短。这是因为当坡度、容重、含水率一定时,灌水量的大小将影响土壤达到饱和的时间,灌水量越大,土壤达到饱和的时间就越快,因此产流时间就越短。从表2中可以看到,当流量为0.3 l/s时,产流时间为13.18 s;而当流量增到1.5 l/s时,产流时间仅为4.38 s,流量的增大使沟灌侵蚀过程中产流时间明显缩短。

坡度是影响沟灌侵蚀过程中产流时间的另一重要因素,从表5中可以看出,坡度与产流时间也呈现负相关的关系;即随着坡度的增加产流时间缩短。表2中不同坡度下,产流时间变化明显;当垄沟坡度在1°时,产流时间为11.16 s;而当坡度增加到5°时,产流时间缩短到4.66 s。这是因为当土壤容重、含水率、灌水量一致时,坡度的增大会使水流的流速增大,产流时间缩短。因此,随着坡面的增大,产流时间呈现逐渐减小的趋势。

而土壤含水率与土壤容重虽对产流时间的影响不如坡度、灌水量大,但也对产流时间有一定的影响,从表5中可以看出含水率、容重与产流时间均呈负相关关系。当土壤含水率为8%时,产流时间9.97 s;土

壤含水率增大到 18%时,产流时间缩短到 7.07 s;当含水率增大到 28%时,产流时间为6.73 s。可以看出随着含水率的增大,产流时间的变化不是很大。含水率的增大使水流的入渗减少,因而径流的产生时间随之缩短;而土壤容重影响土壤的入渗速率,容重越大,土壤的入渗越小,因此也使径流的产生时间减小。从表 3 中可看到当容重为 1.2 g/cm^3 时产流时间为 9.51 s,容重增大到 1.3 g/cm^3 产流时间缩小至到 7.13 s,随着容重的增大,产流时间逐渐减小。

以上分析可知坡度、灌水量、容重、含水率都不同程度的影响着沟灌侵蚀的产流时间,各因素与产流时间均呈现负相关的关系。

表 5　不同影响因素与产流时间回归参数

影响因素	a	b	R^2
灌水量	13.005	−1.011 8	0.996 7
坡 度	11.202	−0.653 8	0.999 5
含水率	9.746 3	−0.372 5	0.934 8
容 重	9.266 2	−0.277 2	0.862 0

2.2　响应曲面设计分析

根据试验 4 因素 3 水平正交设计,利用 SAS 软件进行响应曲面分析[22],获得坡度、灌水量、土壤容重、土壤含水率对产流时间、侵蚀量的二次多项式回归方程分别为:

$$T=902.38+21.28\ S-1\ 362.01\ D+0.88\ M-16.21\ G+0.28\ S^2-13.37\ \mathrm{DS}+519.33\ D^2-0.39\ \mathrm{MS}\quad(R^2=0.998\ 9)$$

$$E=-122.75+41.12\ S+105.50D-0.53M-0.069\ G-0.039\ 674S^2-29.59\mathrm{DS}-3.49D^2-0.01\mathrm{MS}\quad(R^2=0.999\ 2)$$

式中:T——产流时间(s);S——坡度(%);D——容重(g/cm^3);M——含水率(%);G——灌水量(l/s)。回归方程的方差分析、各项的方差分析和参数估计及显著性分析的结果如表 6 所示。

表 6　二次项响应面的回归分析及决定系数

回归方差来源	自由度	平方和		R^2 值		F 值		p 值
		产流时间	侵蚀量	产流时间	侵蚀量	产流时间	侵蚀量	
一次项	4	589.16	664.51	0.894 5	0.868 5	3 554.25	1.41 E+07	<0.000 1
二次项	2	17.38	0.33	0.026 4	0.000 4	209.73	4 904 617	<0.000 1
交叉项	2	51.38	100.24	0.078	0.131	619.97	1.48 E+07	<0.000 1
总回归	8	657.93	765.08	0.998 9	0.999 2	1 984.55	247.33	<0.000 1

从表 6 可以看出产流时间的二次回归模型的 F 值为 1 984.55,$P<0.000\ 1$,且一次项、二次项及交叉项 p 值均小于 0.000 1,说明该模型拟合效果很好。模型的校正决定系数 $R^2=0.998\ 9$,表明模型能解释褐土沟灌产流起始时间响应值的变化,因而该模型与实际情况拟合很好。

由回归方程各项的方差分析表明,各因素对产流起始时间线性效应皆显著;且其对产流起始时间的曲面效应也显著;S 与 D,M 的交互作用显著,而剩余的交互影响不显著。

同理,侵蚀量模型拟合很好。通过已建立的侵蚀量、产流时间回归模型数值计算求得不同坡度下侵蚀量最小时的灌溉模式分别为:坡度为 1%,容重为 1.2 g/cm^3,含水率为 8%,灌水量为 0.3 l/s,此时侵蚀量最小为 0.010 kg,产流时间为 20.37 s;坡度为 3%,容重为 1.3 g/cm^3,含水率为 28%,灌水量为 0.3 l/s,此时侵蚀量最小为 0.027 kg,产流时间为 10.69 s;坡度为 5%,容重为 1.3 g/cm^3,含水率为 28%,灌水量为 0.3 l/s,此时侵蚀量最小为 3.951 kg,产流时间为1.11 s。

3　讨论与结论

(1) 沟灌侵蚀过程不同影响影响因素条件下产流时间的直观分析与方差结果均显示,坡度、灌水量、土壤容重、土壤含水率都对产流时间有着显著影响。

(2) 坡度、灌水量、土壤容重、土壤含水率与产流时间均呈负相关关系,灌水量是对产流时间影响最显著的因素,其次为坡度;土壤含水率与土壤容重虽对产流时间的影响不如坡度、灌水量大,但也对产流时间有一定的影响。

(3) 运用响应曲面法分别建立坡度、灌水量、土壤容重、土壤含水率与产流时间、侵蚀量二次多项式数学模型,决定系数 R^2 分别为 0.998 9 和 0.999 2,模型拟合效果很好;通过数值计算分别求得试验条件下不同坡度土壤流失量最小时的灌溉模式。

[参 考 文 献]

[1] 张玉斌,郑粉莉,武敏. 土壤侵蚀引起的农业非点源污染研究进展[J]. 水科学进展,2007,18(1):123-132.

[2] 周维博,李佩成. 我国农田灌溉的水环境问题[J]. 水科学进展,2001,12(3):413-417.

[3] Berg R D, Carter D L. Furrow erosion and sediment losses on irrigated cropland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1980,35(6):267-270.

[4] Koluvek P K, Tanji K K, Trout T J. Overview of soil erosion from irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993,119(6):929-946.

[5] Kirkby M J. Hillslope Hydrology[M]. Norwich: Wiley-Interscience Publication,1991.

[6] Philip J R. Hillslope infiltration: planar slopes[J]. Water Resources Research,1991,27(1):109-117.

[7] Jackson C R. Hillslope infiltration and lateral downslope unsaturated flow[J]. Water Resources Research,1992, 28(9):2533-2539.

[8] 贾志军,王贵平,李俊义,等. 土壤含水率对坡耕地产流入渗影响的研究[J]. 中国水土保持,1987(9):25-27,64.

[9] 黄明斌,李玉山,康绍忠,等. 坡地单元降雨产流分析及平均入渗速率的计算[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(1):63-68.

[10] 陈力,刘青泉,李家春. 坡面降雨入渗产流规律的数值模拟研究[J]. 泥沙研究,2001,29(4):61-67.

[11] 吴发启,赵西宁,崔卫芳. 坡耕地耕作管理措施对降雨入渗的影响[J]. 水土保持学报,2003,17(3):115-117.

[12] 陈洪松,邵明安,王克林. 上方来水对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. 水科学进展,2005,16(2):233-237.

[13] 郭建华,吴发启,梁心兰,等. 坡耕地地表糙度对降水分配的试验研究[J]. 水土保持研究,2008,15(3):11-14.

[14] 王小燕,李朝霞,蔡崇法. 砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J]. 水科学进展,2012,23(1):38-45.

[15] 卫喜国,严昌荣,魏永霞,等. 坡度和降雨强度对坡耕地入渗的影响[J]. 灌溉排水学报,2009,28(4):114-116.

[16] 辛伟,朱波,唐家良,等. 紫色土丘陵区典型坡地产流及产沙模拟试验研究[J]. 水土保持通报,2008,28(2):31-35.

[17] 张赫斯,张丽萍,朱晓梅,等. 红壤坡地降雨产流产沙动态过程模拟试验研究[J]. 生态环境学报,2010,19(5):1210-1214.

[18] 陈俊杰,孙莉英,刘俊体,等. 不同坡长与雨强条件下坡度对细沟侵蚀的影响[J]. 水土保持通报,2013,33(2):1-5.

[19] 王晓燕,王静怡,欧洋,等. 坡面小区土壤—径流—泥沙中磷素流失特征分析[J]. 水土保持学报,2008,22(2):1-5.

[20] 吴发启,赵西宁,佘雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. 水土保持通报,2003,23(1):16-18.

[21] 王荚文,郝明德,唐涛. 人工降雨条件下谷子地留茬的水土保持效应研究[J]. 水土保持通报,2009,29(4):134-137.

[22] 胡良平. SAS 统计分析教程[M]. 北京:电子工业出版社,2010.

(上接第 33 页)

[参 考 文 献]

[1] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区的沟谷类型[J]. 地理科学,1984,4(4):321-327.

[2] 范昊明,王铁良,蔡强国,等. 东北黑土漫岗区侵蚀沟发展模式研究[J]. 水土保持研究,2007,14(6):384-387.

[3] 范海峰,白建宏,王勇. 基于高分辨率遥感影像调查侵蚀沟的方法[J]. 东北水利水电,2009,27(6):56-57.

[4] 王岩松,王念忠,钟云飞,等. 东北黑土区侵蚀沟省际分布特征[J]. 中国水土保持,2013(10):67-69.

[5] 闫业超,张树文,李晓燕,等. 黑龙江克拜黑土区多年来侵蚀沟时空变化[J]. 地理学报,2005,60(6):137-142.

[6] 王文娟,张树文,邓荣鑫. 东北黑土区沟蚀现状及其与景观格局的关系[J]. 农业工程学报,2011,27(10):192-198.

[7] 孟令钦,李勇. 东北黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理初探[J]. 水土保持学报,2009,23(1):7-11.

[8] 刘增文,李雅素. 黄土残塬区侵蚀沟道分类研究[J]. 中国水土保持,2003(9):28-30.

[9] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs[J]. Catena, 2003,50(2):91-133.

[10] 隋跃宇,焦晓光,程守全,等. 海伦市农田黑土机械组成与土壤全量养分相关关系研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2007,23(4):456-458.

[11] 郭明航,杨勤科,王春梅. 中国主要水蚀典型区侵蚀地形特征分析[J]. 农业工程学报,2013,29(13):81-89.