

模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征

毛天旭¹ 朱元骏^{2*} 邵明安³ 吴冰¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

摘要 模拟降雨条件下研究了含砾石土壤的入渗过程,分析了砾石含量和坡度对土壤坡面产流时间和入渗的影响。研究表明:含砾石土壤的坡面产流时间与砾石含量和坡度密切相关,当坡度 $> 5^\circ$ 时,产流时间与砾石含量呈线性负相关。当坡度 $< 5^\circ$ 时,不同砾石含量的土壤入渗能力表现出明显差异,砾石含量为 20%~30%时,土壤入渗相对增加;当坡度 $> 10^\circ$ 时,砾石含量对入渗能力的影响不明显。利用 Kostiakov 入渗经验模型可以很好地模拟含砾石土壤的降雨入渗过程,模型中的经验系数 K 能够反映出降雨开始 1 min 内坡度和砾石含量对入渗的影响。

关键词 含砾石土壤;产流时间;入渗率;Kostiakov 经验公式

中图分类号 S152.7 文献标识码:A 文章编号 0564-3945(2011)05-1214-05

土壤入渗和产流特征能反映坡面径流过程和输沙能力,是表征降雨侵蚀的重要参数。为深入研究坡面侵蚀过程,很多学者建立了坡度、坡长、坡形、地表覆盖以及土地利用方式与土壤侵蚀量的关系,并以此来预测试验区的土壤侵蚀量^[1,2]。但相关研究大多是基于均质土壤,较少考虑土壤颗粒组成的复杂性。由于成土过程和人类活动的影响,含砾石土壤在自然界分布广泛,如我国西南喀斯特地区的土石山区,黄土高原北部地区成土过程中出现的风化程度不同的钙质结核^[3]等。砾石能影响土壤结构和水力学特性,进而改变坡面水土流失过程。国外研究表明,地表土壤中砾石对入渗和径流的影响存在不确定性^[4,5]。国内研究大多是在室内用一维垂直定水头入渗法描述土石混合介质的入渗过程^[6,7],着重分析砾石含量和直径对土壤水分、溶质运移的影响。还有研究认为在模拟降雨条件下土壤入渗率随砾石含量变化可能存在一个阈值^[8]。很少有学者分析含砾石土壤的坡面产流和入渗特征,相关研究不仅是量化非均质土壤坡面水土过程的基础,而且在土壤侵蚀、坡面水文模型研究和实际应用中具有一定的价值。

本研究在模拟降雨条件下,对不同坡度下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征进行了分析,旨在探讨砾石含量和坡度对坡面径流和水分入渗的影响及其可能原因,为该类型土壤的侵蚀过程以及水土资源的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工降雨大厅进行。试验土槽为铁制,规格 3 m (长)× 1 m (宽)× 0.25 m (深)。供试土壤取自西北农林科技大学试验地表层壤土(钙积土垫旱耕人为土),土壤质地为粉壤土,有机质含量 14 g kg^{-1} ,土壤颗粒组成见表 1(国际土壤质地分类系统)。土样风干后测定其风干质量含水率(平均为 3%),过 5 mm 筛,试验所用砾石取自渭河滩,为光滑椭圆形硬质鹅卵石,对水几乎不通透。在将土样和砾石混合前,去掉较大的石块,过 20 mm 筛,留取直径为 20 mm~50 mm 的砾石作为供试砾石,砾石平均直径为 4.07 cm,砾石级配比例见表 2。用水冲洗,除去砾石上附有的杂物,风干备用。

表 1 土壤颗粒组成

Table 1 Soil particles composition

土壤粒径 (mm) Soil particle sizes	2~0.2	0.2~0.02	0.02~0.002	<0.002
质量百分比 (%)	2.35	29.88	55.11	12.66

表 2 砾石级配比例

Table 2 Gravel size composition ratio

砾石直径 (cm) Gravel sizes	2~3	3~4	4~5
质量百分比 (%)	4.2	34.65	61.14

收稿日期 2010-04-22, 修订日期 2010-05-31

基金项目 国家自然科学基金(40801104)资助

作者简介 毛天旭(1984-),甘肃武威人,在读硕士研究生,主要研究方向为土壤物理学。E-mail maotianxu0214@163.com

*通讯作者: E-mail zhuyuanjun@foxmail.com

1.2 试验方法

试验中,土壤容重控制为 1.35 g cm^{-3} ,实测砾石密度为 2.65 g cm^{-3} ;风干土与砾石按质量比设 10:0、9:1、8:2、7:3 和 6:4 等 5 个处理,孔隙度分别为 0.49、0.44、0.39、0.34 和 0.29。然后将土壤和砾石混合均匀(砾石质量含量则分别为 0%、10%、20%、30%和 40%)。将土石混合物分层装入土槽,为防止土体垂直分层,每两层之间打毛。

降雨过程中雨强控制在 60 mm h^{-1} 左右(实际按率定雨强来计算),土槽设 5° 、 10° 、 15° 等 3 个坡度处理。降雨开始后记录土槽产流时间。从产流开始后每隔 1 min 收集一次径流,每 5 min 测定一次坡面水流流速(采用 KMnO_4 染色剂法,记录水流流过固定坡长的时间,然后换算成流速)。降雨历时为产流后持续 60 min。降雨结束后,用称重法和烘干法分别得到每分钟的径流量和产沙量。入渗率(i)用以下公式计算:

$$i = \frac{R}{T} \cos \theta - \frac{(F-S)}{k \cdot A}$$

式中 i —入渗率(cm min^{-1}) ; R —降雨量(cm) ; T —降雨历时(min) ; θ —土槽坡度($^\circ$) ; F —单位时间内的产流量(g) ; S —单位时间内的产沙量(g) ; k —换算系数(1 g cm^{-3}) ; A —土槽截面积(cm^2)。

2 结果与分析

2.1 坡度与砾石含量对产流时间的影响

产流时间是坡面综合效应的反映,主要取决于土壤初始含水率。在降雨的最初阶段,降雨全部渗入土壤,坡面无径流产生。当雨强大于土壤入渗能力时,产生超渗雨。超渗雨形成坡面积水,然后沿坡面向低处流动,称为坡面漫流^[9]。影响产流时间的因素有土壤特性、地面坡度、地表覆盖等。图 1 为模拟降雨条件下坡面产流时间随砾石含量的变化关系。

图 1 显示,在坡度为 5° 时,随着砾石含量的增加,产流时间变化不大,当砾石含量较高时,产流时间急

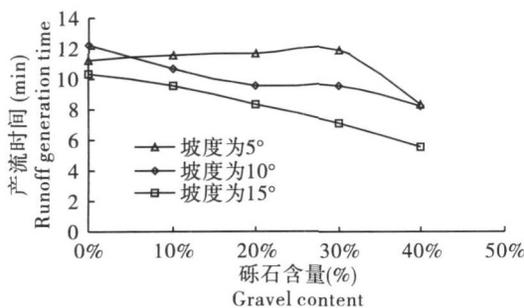


图 1 不同砾石含量土壤的产流时间
Fig.1 Runoff generation time in soils with different gravel content

剧降低,而在 10° 和 15° 时,产流时间随砾石含量的增加而降低。3 个坡度下,当砾石含量相同时,产流时间(T)随坡度变化大致呈 $T_{15^\circ} < T_{10^\circ} < T_{5^\circ}$;当坡度相同时,产流时间随砾石含量变化大致呈 $T_{0\%} > T_{10\%} > T_{20\%} > T_{30\%} > T_{40\%}$,这种变化趋势在坡度为 10° 和 15° 时特别明显。其原因在于:在降雨的最初阶段,主要是雨滴浸润土壤和砾石的过程。由于砾石的存在,一部分雨滴击溅砾石,使砾石表面湿润。随着时间的推移,砾石包裹一层水膜使土壤与砾石的周边接触成为入渗点,进而逐渐增大了水分湿润土壤的面积,入渗随之增加。当砾石被完全浸润后,入渗不再以入渗点的形式进行。这实际上是由于砾石的存在增大入渗孔隙的弯曲度,从而延缓了入渗,增加了坡面汇流,使产流时间减小。而且当土壤中砾石含量越大,坡面暴露的砾石也就越多,砾石的这种作用也就越明显。当砾石含量一定时,坡度越大,超渗雨产生的坡面漫流汇聚后的流速也就越大,径流的产生也就越快。

对 3 个坡度下产流时间随砾石含量的变化做回归分析,拟合结果见表 3。用 t 检验法检验,得到 $|t|_{10^\circ} = 6.37 > t_{0.01/2}(3) = 5.84$; $|t|_{15^\circ} = 15.11 > t_{0.01/2}(3) = 5.84$ 。说明线性回归达到显著水平($P = 0.01$)。这表明,当坡度较大($> 10^\circ$)时,坡面产流时间与砾石含量呈线性负相关。

表 3 产流时间和砾石含量的线性回归分析

Table 3 Linear regression analyses between runoff generation time and gravel content

坡度	回归方程	R^2
Slope gradient	Regressive equation	Correlation Coefficient
5°	$Y = -5.43x + 11.99$	0.33
10°	$y = -9.27x + 11.88$	0.93**
15°	$y = -11.98x + 10.57$	0.99**

2.2 坡度与砾石含量对入渗的影响分析

试验中入渗土壤为均匀非同质。为了便于比较,一维垂直入渗的入渗率用单位时间(min)内的入渗水深(cm)来表示^[10]。图 2 为模拟降雨条件下含砾石土壤入渗率随时间的变化关系。

从图 2 可以看出:在入渗的最初阶段,相同坡度下不同砾石含量的土壤入渗率曲线是重合的,即入渗率维持一个常数。这是由于试验开始时控制土壤初始含水量很低(平均为 3%)且在同一水平,此时土壤处于干燥状态,土壤水吸力很大,土壤入渗率取决于土壤的水吸力。这段时间内,含砾石土壤入渗率等于降雨强度,与砾石含量无关。随着降雨过程的继续,表层土含水量达到饱和,水分在重力作用和毛管力作用下

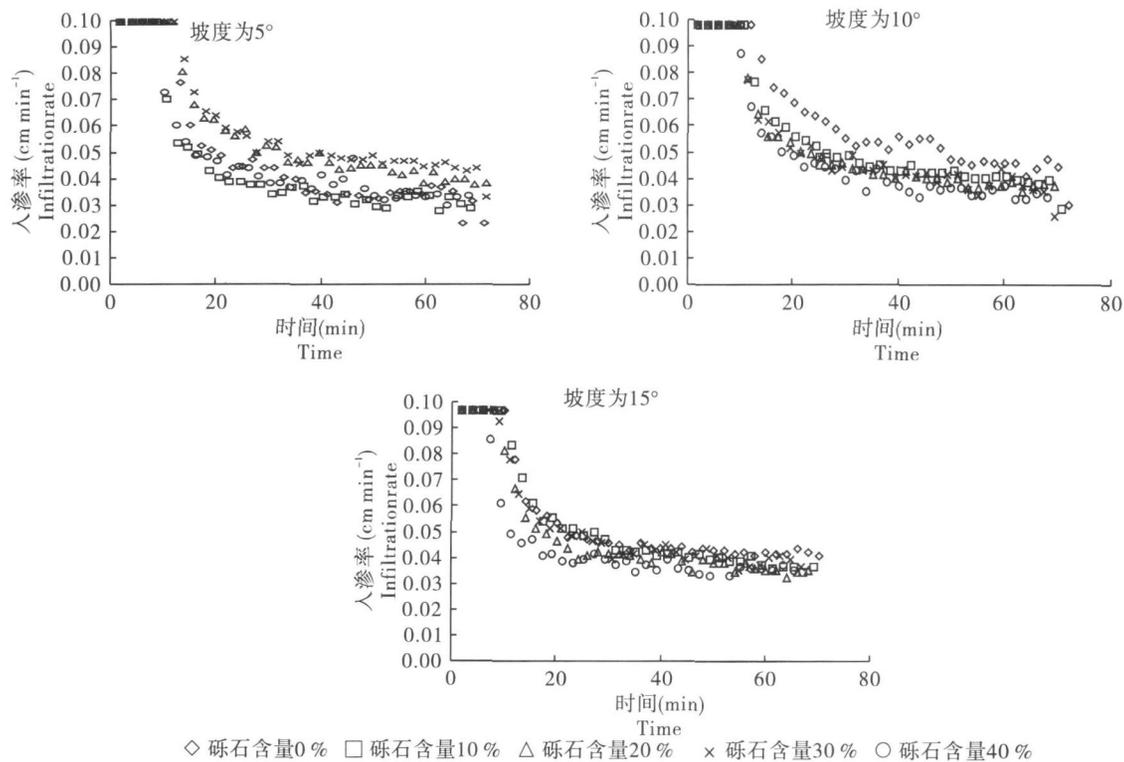


图 2 不同砾石含量的土壤入渗率随时间的变化关系

Fig.2 Changes of infiltration rates with time in soils with different gravel content

向土体深层运动。入渗使土壤含水量增加,相应地土壤水吸力降低,降雨不能完全渗入土壤,在土槽内形成积水,并产生径流。此时土壤的入渗率取决于土壤自身的性质。供试土壤中砾石的存在改变了均质土壤的入渗性能,具体表现在:一方面砾石在土壤中形成不透水层,阻碍了水分的下渗,同时延长了水分的下渗路径;另一方面,由于砾石的存在,增加土壤中孔隙的数量,有利于水分的下渗。从图 2 还可以看出:由于砾石的存在和含量的不一致,土壤的入渗性能在降雨进行到 10 min 左右出现较大的差异。降雨 10 min 左右,基本每个土槽都开始产流。也就是说,当表层土壤被充分湿润后,砾石对入渗的影响逐渐显现出来,具体为:当坡度较低(5°)时,20% 和 30% 砾石含量的土壤的入渗率明显高于砾石含量为 0%、10% 和 40% 的土壤,这说明土壤中砾石含量在 20%~30% 左右范围内能有效地增加土壤中过水孔隙的数目。当坡度较大($> 10^\circ$)时,随着砾石含量的增多,土壤的入渗性能降低。这可能是在坡度较大条件下,重力对土壤水的作用减弱以及土壤接近饱和时导致的土壤水吸力(坡面法向方向)降低的结果。

为了进一步研究 3 个坡度下不同砾石含量的土壤中入渗率随时间的变化关系,采用 Kostiakov^[11-13]入渗经验模型对实测结果进行拟合。公式如下:

$$i(t) = Kt^{-a}$$

式中 i —入渗率(cm min^{-1}) t —入渗时间(min);
 a —经验入渗指数(与土壤性质和初始含水率有关,反应入渗能力的衰减速度); K —入渗系数(入渗开始后 1 min 时的入渗率)。

回归模型参数的估计采用最小二乘估计法,其显著性检验采用 t 检验法(显著水平 $P = 0.01$)。拟合结果和显著性检验列于表 4。

表 4 显示:计算的 $|t|$ 远远大于相应的 $t_{0.01/2}(n-2)$,说明 Kostiakov 经验模型可以很好的用来模拟降雨条件下含砾石土壤的入渗过程。经验入渗参数 K 是入渗开始后 1 min 时的入渗率或入渗量,是表征土壤入渗能力的重要指标。由表 4 还可以看出:在坡度相同时,随着砾石含量的增加, K 值有减小的趋势。这说明在降雨开始后,坡面砾石便开始影响入渗,这是雨滴打击砾石在其表面形成水膜的过程。砾石越多,这种作用也就越明显。当砾石含量相同时, K 值随坡度的增加而变小,这一方面是由于随坡度增加,土槽实际承雨面积(即土槽的垂直投影面积)相对减小,导致土槽内的降雨量减小,从而影响入渗量;另一方面由于坡度越大,雨滴打击地表溅起的泥浆向坡下转移得也就越远,这也降低了地表的入渗能力。经验入渗参数 a 主要反映入渗的衰减能力,表 4 中 a 随砾石含量和坡度的

表 4 Kostiakov 经验公式拟合结果和显著性检验

Table 4 Fitting results by Kostiakov infiltration equation and its significant tests

坡度 Slope gradient	砾石含量 Gravel content	入渗参数 Infiltration parameters		R^2	显著性检验 Significant test		
		K	a		n	$ t $	$t_{0.01/2}(n-2)$
5°	0 %	0.21	0.46	0.87	36	14.90	2.73
	10 %	0.18	0.44	0.88	35	15.79	2.73
	20 %	0.18	0.36	0.90	36	17.76	2.73
	30 %	0.17	0.33	0.88	36	15.44	2.73
	40 %	0.17	0.41	0.89	35	16.29	2.73
10°	0 %	0.18	0.33	0.85	37	14.14	2.72
	10 %	0.18	0.37	0.90	36	17.04	2.73
	20 %	0.17	0.37	0.91	35	18.58	2.73
	30 %	0.17	0.38	0.88	35	15.91	2.73
	40 %	0.18	0.41	0.91	35	17.74	2.73
15°	0 %	0.16	0.33	0.86	36	14.65	2.73
	10 %	0.17	0.37	0.91	35	18.75	2.73
	20 %	0.16	0.39	0.89	35	16.52	2.73
	30 %	0.16	0.35	0.91	34	17.63	2.74
	40 %	0.13	0.34	0.86	33	13.62	2.74

变化不明显。原因在于 a 主要受到土壤初始含水量的影响,而本研究中基本保持含水量在同一水平。

3 结论

本研究在模拟降雨条件下,分析了坡度和砾石含量对坡面产流和入渗过程的影响,并对其可能原因进行了探讨,得出以下结论:

(1)含砾石土壤中砾石含量和坡度对坡面产流时间影响显著,砾石含量与产流时间之间呈负相关。

(2)Kostiakov 经验入渗模型能够较好的反映含砾石土壤入渗率随时间的变化关系,其中入渗参数 K 与砾石含量和坡度呈负相关。

本文对 3 个坡度、5 种砾石含量处理下的坡面产流和入渗特征进行了初步分析。由于砾石在土壤中的空间变异性非常大^[14,15],加之砾石的分布不均匀,限制了我们用实测的入渗深度来验证累积入渗量;此外,由于坡度的影响,实际入渗的湿润锋可能是一个不规则曲面。还有一些因素,如砾石尺寸、位置、形状等也会影响入渗和产流。因此,深入研究含砾石土壤的坡面水土过程还需综合考虑以上因素进行试验模拟和验证。

致谢 感谢黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室提供试验条件。

参考文献:

- [1] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[M]. 陕西: 陕西人民出版社, 1997: 76 - 84.
- [2] 苏子友, 吴文良, 张劲松, 等. 小浪底库区坡地不同利用方式入渗

规律与产流产沙特征研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 318 - 324.

- [3] ZHU Y J, SHAO M A. Spatial distribution of surface rock fragment on hill-slopes in a small catchment in wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(6): 862 - 870.
- [4] BRAKENSIEK D L, RAWLS W J. Soil containing rock fragments: effects on infiltration [J]. Catena, 1994, 23(1, 2): 99 - 110.
- [5] JEAN P, FLORENCIO I S. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position [J]. Catena, 1992, 19(5): 451 - 474.
- [6] 周蓓蓓, 邵明安. 不同砾石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 801 - 807.
- [7] 王慧芳, 邵明安. 含砾石土壤水分入渗试验研究 [J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 604 - 609.
- [8] 朱元骏, 邵明安. 不同砾石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 64 - 67.
- [9] 刘俊民, 余新晓. 水文与水资源学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1999: 36 - 38.
- [10] 刘建国, 王洪涛, 聂永丰. 多孔介质非饱和导水率预测的分型模型[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 269 - 275.
- [11] 解文艳, 樊贵盛. 土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(3): 272 - 275.
- [12] 李雪转, 樊贵盛. 非充分供水土壤水分入渗模型的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(4): 37 - 40.
- [13] 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: 125 - 130.
- [14] CHILDS S W, FLINT A L. Physical properties of forest soils containing rock fragment. In:GESSEL S P, LACATE D S, WECTRNAN G F et al. Sustained productivity of forest soils. University of British Columbia Faculty, Publ.Vancouver, 1990: 95 - 121.
- [15] MA D H, SHAO M A. Simulating infiltration into stony soils with a dual-porosity model [J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59 (5): 950 - 959.

Characteristics of Runoff and Infiltration in Stony Soils under Simulated Rainfall Conditions

MAO Tian-xu¹, ZHU Yuan-jun^{2*}, SHAO Ming-an³, WU Bing¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the investigation of the infiltration process in soil containing gravels under simulated rainfall, the effects of gravel content and slope gradients on runoff generation time and infiltration were analyzed. The results indicated that runoff generation time was closely related to gravel content and slope gradients. When the gradient being higher than 5°, there was a negative relationship between runoff generation time and gravel content. As for the gradient less than 5°, there existed an evident difference in infiltration capability among the soils containing different gravel contents. As gravel content in soils was between 20% - 30%, soil infiltration increased relatively. When the gradient being higher than 10°, gravel content weakly impacted on infiltration capability. The rainfall infiltration process in soil containing gravels could be well simulated by the experiential infiltration model of Kostiakov. The parameter K in the model could reflect the effects of the gradient and gravel content on infiltration over initial 1 min.

Key words: Soil containing gravels; Runoff generation time; Infiltration rate; Kostiakov infiltration equation