

文章编号: 1000-5013(2010)03-0332-05

粉砂壤土中大孔隙对坡地产汇流的影响

张小娜^{1,2}, 冯杰^{2,3}

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 中国水利水电科学研究院 水资源所, 北京 100044)

摘要: 以室内试验槽为平台, 采用人工模拟降雨实验, 研究粉砂壤土大孔隙对坡面出流、坡面流流速、坡面流阻力系数、曼宁糙率、雷诺数、弗劳德数和坡面积产沙量的影响. 结果表明, 在粉砂壤土中, 相对于无大孔隙试验槽, 含有大孔隙的试验槽的坡面阻力系数和曼宁糙率较大, 而坡面出流量、坡面初始出流时间、雷诺数、弗劳德数坡面流流速, 以及坡面积产沙量则较小. 两坡面流的流态均为层流和缓流, 累积产沙量随时间的变化过程可用幂函数描述.
关键词: 粉砂壤土; 大孔隙; 坡面流; 阻力系数; 产沙量
中图分类号: P 642 文献标识码: A

大孔隙普遍存在于自然界土壤中. 产生大孔隙的原因是多方面的, 如土壤动物如鼠类、蚯蚓和蚂蚁等对土壤的挖掘翻动, 植物根系的延伸和腐烂, 人类的耕种、砍伐和建造等活动, 土壤干湿变化或融冻交替引起的土壤膨胀和收缩, 或者是土壤中可溶性物质的溶解、化学风化等作用. 土壤中大孔隙及大孔隙流的存在, 增加了土壤的通气性, 提高了降雨进入土壤的入渗率, 改变了坡地径流的形成过程和不同径流成分的比例, 从而对坡地产汇流产生影响. 由于实验和理论条件限制, 我国对大孔隙及其影响的研究起步较晚, 始于 20 世纪 80 年代中后期, 现尚有许多问题有待深入研究^[19]. 本文以室内试验槽为平台, 采用人工模拟降雨实验, 研究土壤大孔隙对坡地产汇流的影响.

1 实验部分

1.1 试验的设计

试验所用土样取自江苏省南京市栖霞区东阳镇的粉砂壤土. 为了准确模拟田间的实际状况, 采用分层取土法和分层填土法, 即取土深度(h) 0~ 0. 2 m 为第 1 层, 0. 2~ 0. 4 m 为第 2 层, 0. 4~ 0. 6 m 为第 3 层. 各层土壤颗粒级配及基本物理性质, 分别如表 1, 2 所示. 表 1 中: 2% ~ 0. 02% 的土壤颗粒为砂粒; 0. 02% ~ 0. 002% 的土壤颗粒为粉粒; 小于 0. 002% 的土壤颗粒为粘粒. 表 2 中: γ 为干容重; ρ 为密度; ε 为孔隙率; w 为有机质的质量分数; K_s 为饱和土壤导水率.

试验在两个不可变坡度的试验槽内进行, 坡度为 4. 64 (°), 长、宽和填土深分别为 2. 48, 1. 92, 0. 8 m. 试验槽 1 内插有人造大孔隙, 其大孔隙平面分布, 如图 1 所示(人造大孔隙的直径均为 8 mm, 其中 10, 30, 50 cm 代

表 1 土壤颗粒级配
Tab. 1 Grade of soil particle

h/m	d/mm			土壤类型
	砂粒	粉粒	粘粒	
0~ 0. 2	15. 245	63. 235	21. 520	粉砂壤土
0. 2~ 0. 4	21. 635	59. 270	19. 095	粉砂壤土
0. 4~ 0. 6	23. 770	58. 820	17. 410	粉砂壤土

收稿日期: 2009-09-14
通信作者: 张小娜(1981-), 女, 博士, 主要从事水文水资源的研究. E-mail: nanaxiao86@ hhu. edu. cn.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50609005); 教育部博士点专项科研基金资助项目(20050294002); 霍英东青年教师基金资助项目(101075)

表大孔隙的深度); 试验槽 2 中无大孔隙. 两试验槽的填土深均为 0.6 m.

填土时采用分层填土, 为避免出现人为的土层界面, 每次放入土样前将夯实的土面抓毛, 在填土过程中随时抽样检查其土样是否达到所控制的容重, 以保证土样的一致性. 试验槽中开设的地表径流出口在试验槽表层.

表 2 土壤基本物理性质
Tab.2 Physical characteristics of soils

h/m	$\gamma/\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho/\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$e/\%$	$w/\%$	$K_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
0~0.2	1.21	2.64	54.17	1.08	0.465
0.2~0.4	1.47	2.63	44.11	1.21	0.139
0.4~0.6	1.55	2.64	41.29	1.10	0.108

1.2 试验方法

利用水文水资源基本规律实验平台中的人工降雨水文物理模拟实验系统(江苏南京河海大学水文水资源与水利工程国家重点实验室), 对两试验槽进行人工降雨. 试验中, 每间隔 1 min, 系统自动记录该时段的降雨量. 试验模拟降雨日期为 2007 年 9 月 15 日, 降雨历时 90 min.

1.3 测量方法

分别采用吸管法、环刀法和密度瓶法测定土壤的颗粒级配、容重和密度; 土壤的孔隙率是根据测定出的土壤密度和土壤干容重计算得到的; 土壤饱和导水率是利用 RETC 软件, 通过 PTFs(土壤转化函数)方法估算得到; 采用重铬酸钾法测定土壤的有机质质量分数; 采用三角堰测量法测量地面径流; 采用称重法测量测流壤中流和地下径流; 采用示踪法测定坡面流速. 从各种径流产生的时刻开始, 地面径流每隔 3 min 测一组数据; 坡面流速每隔 3 min 测一组数据.

2 结果与讨论

2.1 坡面出流

试验中, 记录的坡面出流时间以降雨开始时刻作为零时刻. 槽 1 在 2.116 7 min 产生坡面流, 槽 2 在 1.416 7 min 产生坡面流. 经计算可得到, 槽 1 的坡面出流总量为 $0.918\ 7\ \text{m}^3$, 占降雨总量的 86.373%, 槽 2 坡面出流总量为 $0.929\ 1\ \text{m}^3$, 占降雨总量的 87.341%. 两槽地面径流过程如图 2 所示. 图 2 中: Q 为径流量; i 为时段降雨量.

从图 2 中可以看出, 在降雨历时 15 min 前, 两槽的坡面出流过程相差较大, 槽 2 坡面流不但比槽 1 先产生, 而且流量明显大于槽 1. 但在降雨历时 15 min 后, 两者的坡面出流过程几乎重合.

究其原因, 降雨历时 15 min 之前, 槽 1 中存在大孔隙, 降落的相当一部分雨水被这些大孔隙拦蓄. 故降雨初期, 槽 1 的坡面汇流量要小于槽 2, 坡面汇流时间要晚于槽 2. 降雨历时 15 min 后, 槽 1 中的大孔隙流达到最大容量, 降落的雨水在两槽中的下渗量相差不大, 所以坡面出流过程几乎重合.

2.2 坡面流流速

两槽的坡面流流速过程, 如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 两槽的流速(v)变化形状基本相似, 并随时间呈波状分布. 但是, 槽 2 每时刻的坡面流流速均大于槽 1. 这是因为一方面降雨首先填满大孔隙, 导致槽 1 的地面径流量相对减少, 在相同的过水面积下, 导致流速偏小^[9]; 另一方面, 大孔隙导致槽 1 局部坡度突变, 糙率增大,

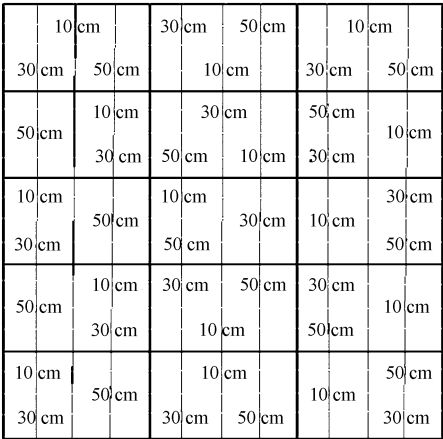


图 1 大孔隙分布平面图
Fig.1 Plan of macropore distribution

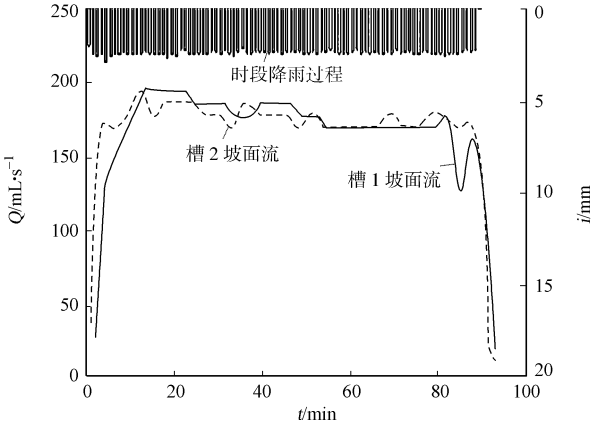


图 2 坡面的出流过程
Fig.2 Process of surface runoff

致使流速减小.

经计算可以得到,槽 1 的平均坡面流流速为 $6.754\ 4\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,槽 2 的平均坡面流流速为 $9.798\ 9\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,两者相差 $3.044\ 5\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$.有大孔隙坡面流流速较小,使得地面径流具有的能量也较小,从而挟沙能力也较小.

2.3 坡面流阻力系数和曼宁糙率

目前,表达坡面流阻力的主要参数有 Darcy-Weisbach 阻力系数(f)和曼宁糙率(n).坡面流的阻力系数的计算公式为

$$f = \frac{8gRJ}{V^2};$$

而坡面流的曼宁糙率的计算公式为

$$n = \frac{R^{2/3}J^{1/2}}{V}.$$

上两式中: V 为坡面流流速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); R 为平均水力半径 (m); J 为水流能坡. 由于对坡面流速作平均化处理,水流能坡 J 可采用坡面比降直接计算. 坡面流水层很薄,一般在几毫米之内,故水力半径 R 可用径流深近似表示,即 $h = q/V$, q 为单宽流量 ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$).

两试验槽的阻力系数和曼宁糙率随时间的变化过程,如图 4,5 所示. 从图 4,5 可以看出,槽 1 坡面流的阻力系数和曼宁糙率均远大于槽 2 坡面流的阻力系数和曼宁糙率,而且两参数的变化幅度也较大. 其中:槽 1,2 的坡面流平均阻力系数分别为 $7.437\ 0, 2.178\ 0$,而其变化幅度分别为 $16.672\ 9, 1.406\ 4$;槽 1,2 的坡面流平均糙率分别为 $0.030\ 5, 0.015\ 8$,而其变化幅度分别为 $0.036\ 3, 0.009\ 1$.这说明,大孔隙的存在增大了坡面流的阻力和糙率.

以两坡面的阻力系数平均值之差除以无大孔隙坡面的阻力系数的平均值,作为衡量大孔隙阻止坡面流的能力参数;同样,以两坡面的糙率系数的平均值之差除以无大孔隙坡面的糙率的平均值,作为衡量大孔隙增大坡面糙率的能力参数. 经计算可得到,两参数分别为 $2.414\ 5, 0.931\ 9$.大孔隙阻止坡面流能力参数是大孔隙增大坡面糙率能力参数的 2.59 倍,这是由于阻力系数反映坡面水流在运动中所受的阻力大小.它是坡面糙率程度、径流流态、断面特性、水流密度等因素的综合体现.

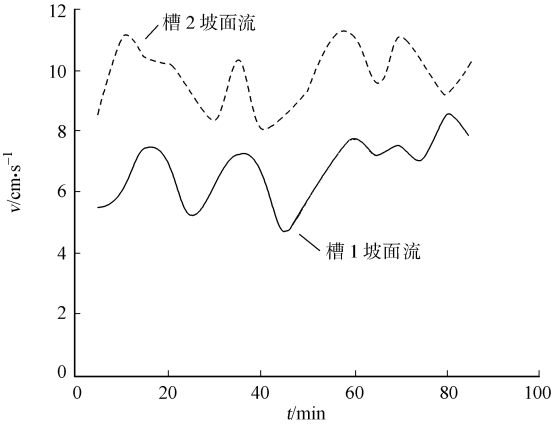


图 3 坡面流的流速过程

Fig. 3 Process of slop surface flow

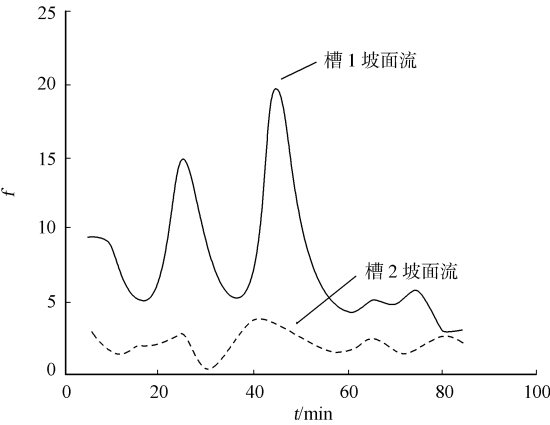


图 4 阻力系数随时间的变化过程

Fig. 4 Variation of resistance coefficient with rainfall time

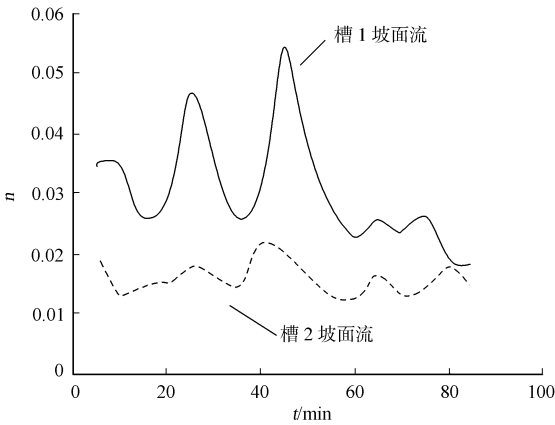


图 5 曼宁糙率随时间的变化过程

Fig. 5 Variation of manning roughness with rainfall time

2.4 坡面流流态

雷诺数(Re)是水流的惯性力和粘滞力之比,它是层流紊流两种流态的重要判别因子.两坡面流雷诺数随时间的变化过程,如图 6 所示.从图 6 可以看出,两坡面流的雷诺数均小于 120 ,这说明两坡面水流为层流状态.两坡面的雷诺数变化过程线相差不大,经计算,槽 1 坡面流的雷诺数平均值为 102.963 .

4, 而槽 2 坡面流的雷诺数平均值为 104.907 1. 这说明土壤大孔隙的存在, 降低了坡面流的紊动性.

弗劳德数 (Fr) 是水流惯性力和重力的比值, 它反映了流速和水深的对比关系, 是表征水流流态是急流还是缓流的指标. 两坡面流的弗劳德数随时间的变化过程, 如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 槽 1 坡面流的弗劳德数远较槽 2 坡面流的弗劳德数小, 这说明大孔隙使得坡面流重力占得比例增大. 两坡面的弗劳德数均小于 0.8, 意味着两坡面流的流态均为缓流.

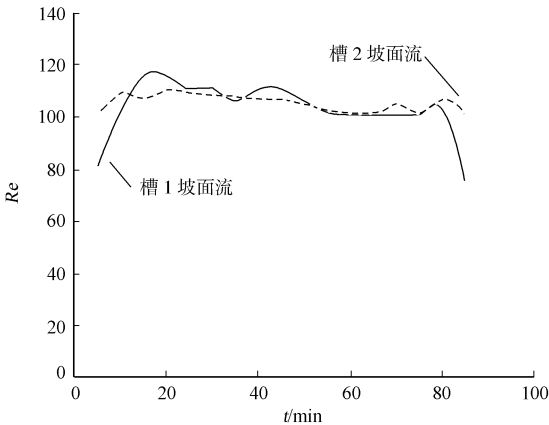


图 6 雷诺数随时间的变化过程
Fig. 6 Variation of Reynolds number
with rainfall time

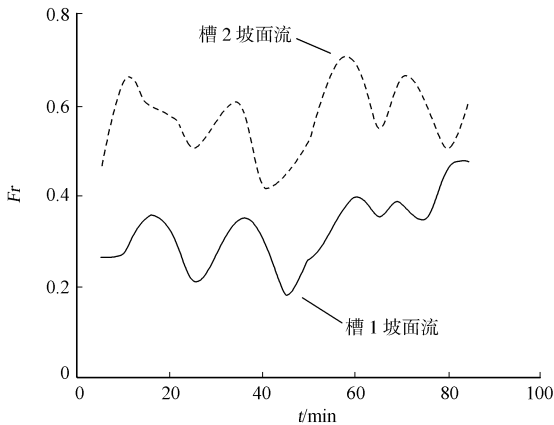


图 7 弗劳德数随时间的变化过程
Fig. 7 Variation of Froude number
with rainfall time

2.5 坡面累积产沙量

两槽坡面的累积产沙量(m)随时间变化过程, 如图 8 所示. 槽 1 坡面的累积产沙量为 69.4 g, 槽 2 坡面的累积产沙量为 224.87 g. 这表明, 有大孔隙坡面的累积产沙量较无大孔隙坡面的累积产沙量小, 约为其 3/10. 这是由于降雨引起的土壤侵蚀, 在很大程度上取决于降雨径流的搬运能力和分离量之间的关系^[10-11].

含有大孔隙的试验槽 1 的坡面糙率相对较大, 在其他条件相同的情况下, 坡面流速变小, 再加上大孔隙的存在, 降雨进入土壤的入渗率提高, 坡面出流量相对减小, 降雨径流的搬运能力减弱. 所以, 含有大孔隙的试验槽的坡面流的累积产沙量相对较小.

用幂函数可以较好地拟合两坡面累积产沙量变化过程. 槽 1, 2 的拟合曲线方程分别为

$$\begin{aligned} m_1 &= 1.6188t^{0.8459}, \\ m_2 &= 11.157t^{0.6647}. \end{aligned}$$

其中: 槽 1, 2 确定性系数分别为 0.990 1, 0.990 9; m_1, m_2 分别为槽 1, 2 坡面的累积产沙量(g); t 为时间(min).

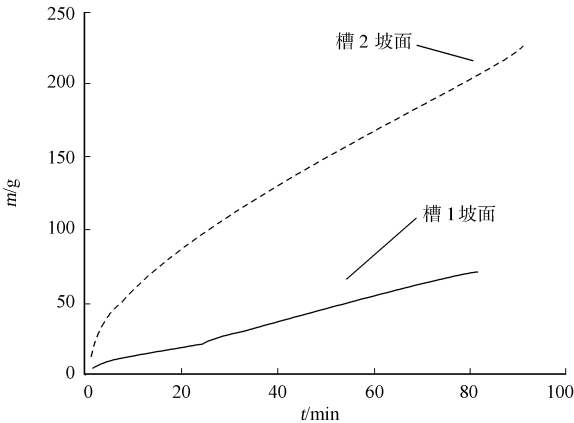


图 8 坡面累积产沙量随时间的变化过程
Fig. 8 Sediment concentration in slope flow

3 结论

土壤中大孔隙的存在, 改变了坡地径流的形成过程和不同径流成分的比例, 使坡地出口断面的流量过程以及坡面流水动力学参数发生变化. 通过室内试验槽试验, 初步研究了粉砂壤土中大孔隙对坡面流的影响, 并得出如下 4 点主要结论.

(1) 在降雨历时 15 min 前, 两槽的坡面出流过程相差较大, 无大孔隙坡面不但比有大孔隙坡面先产生坡面流, 而且流量明显大于有大孔隙坡面的流量. 但是, 在降雨历时 15 min 后, 两者的坡面出流过程几乎重合.

(2) 有大孔隙坡面的阻力系数和曼宁糙率均大于无大孔隙坡面的阻力系数和曼宁糙率, 而且两参

数的变化幅度均是大孔隙坡面大于无大孔隙坡面. 其中: 有大孔隙坡面阻力系数平均值和变化幅度分别为无大孔隙坡面的 3.41 倍, 11.85 倍, 而曼宁糙率平均值和变化幅度是无大孔隙坡面的 1.93 倍, 3.99 倍. 然而, 有大孔隙坡面的雷诺数、弗劳德数及坡面流流速均较无大孔隙坡面的雷诺数、弗劳德数及坡面流流速小, 有大孔隙坡面的 3 个动力学参数平均值分别是无大孔隙坡面的 0.98 倍, 0.58 倍和 0.69 倍.

(3) 两坡面的水流流态均为层流和缓流.

(4) 有大孔隙坡面的累积产沙量远较无大孔隙坡面的累积产沙量小, 约为其 3/10. 两坡面的累积产沙量随时间的变化过程均可用幂函数描述, 确定性系数都在 0.99 以上.

研究结果有助于采用合理有效地开展农业管理, 实施节水农业, 提高农业水的利用效率, 防止土地荒漠化, 降低农业成本.

参考文献:

[1] 冯杰, 郝振纯. CT 确定土壤大孔隙分布[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 612-617.
[2] TAYFUR G, KAVVAS M L. A really averaged overland flow equations at hillslope scale[J]. Hydrological Sciences, 1998, 43(3): 361-378.
[3] 郝振纯, 冯杰, 罗健. 两种土壤大孔隙分布的比较[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(2): 1-5, 28.
[4] 冯杰, 张佳宝, 郝振纯, 等. 水及溶质在有大孔隙土壤中运移的研究(I): 田间实验[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(3): 20-24, 26.
[5] 冯杰. 水及溶质在有大孔隙土壤中运移的研究(II): 数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 77-82.
[6] 区自清, 贾良清, 金海燕, 等. 大孔隙和优先流及其对污染物在土壤中迁移行为的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(1): 341-347.
[7] 程竹华. 田间土壤中的优势流与农业化学物质迁移的特征研究[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 1998.
[8] 秦耀东, 胡克林. 大孔隙对农田耕作层饱和和导水率的影响[J]. 水科学进展, 1998, 9(2): 107-111.
[9] 芮孝芳. 水文学研究进展[M]. 南京: 河海大学出版社, 2007: 193-200.
[10] 章俊霞, 左长清, 李小军. 土壤侵蚀的自然因素影响作用探讨[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(3): 1140-1141.
[11] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 145.

Experimental Research on the Effects of Macropores Upon
Overland Flow in Silt Loam Soil

ZHANG Xiao-na^{1,2,3}, FENG Jie^{2,3}

(1. Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineer, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Water Resources and Hydrology, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Institute of Water Resources Research, Institute of China Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on indoor soil tank experiment and the artificial rainfall simulation, the effects of macropore in silt loam on various parameters are analyzed, such as the slope outflow, the velocity of overland flow, resistance coefficient, manning roughness, Reynolds number, Froude number and slope cumulative sediment yield. The results show: resistance coefficient and manning roughness in macropore soil tank are larger than the ones in non macropore soil tank, but the amount of slope outflow, the initial time of slope outflow, Reynolds number, Froude number and slope cumulative sediment yield are less than those in non macropore soil tank. The flow patterns in both slopes are laminar flow and slow flow. The power function can describe the relationship between the amount of cumulative sediment yield and the time.

Keywords: silt loam soil, macropore; slope outflow; resistance coefficient; cumulative sediment yield

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)