

裂隙网络对坡面流及土壤水分入渗影响

朱磊^{1,2}, 尤今^{1,2}, 陈玖泓^{1,2}

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021;

2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021)

摘要:为研究裂隙对坡面流及土壤水分入渗的影响,通过染色示踪试验,对染色示踪图像进行二值化处理,提取出各像素点染色信息。对染色信息及试验数据处理得到径流量、土壤水分入渗量等参数,进而分析裂隙网络对入渗深度、染色面积、坡面流及土壤水分入渗的影响。结果表明,裂隙网络的存在减小了坡面径流系数,增大了降雨入渗系数;较无裂隙试验相比,50 mm/h雨强下裂隙试验平均径流系数减小了0.42,降雨入渗系数增大了0.53;30 mm/h雨强裂隙试验平均径流系数减小了0.15,降雨入渗系数增大了0.38。裂隙网络的存在增大了剖面的入渗深度、染色面积;较无裂隙试验相比,50 mm/h雨强下裂隙试验平均入渗深度增大了21.34 cm,平均染色面积增大了36.0%;30 mm/h雨强下裂隙试验平均入渗深度增大了5.70 cm,平均染色面积增大了9.5%。

关键词:裂隙网络;坡面流;土壤水分;入渗

中图分类号:P641.2

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.12.016

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.

0 引言

近年来,受厄尔尼诺现象影响,区域性干旱频发。随着干旱的发生,土壤中水分不断蒸发减少,土壤颗粒重新分离结合产生土壤裂隙。土壤裂隙的产生和形成与土壤性质、外界条件紧密相连^[1]。土壤裂隙的产生会导致诸多不良后果,例如土壤干燥过程中产生的裂隙间接影响了坡面流水动力学参数,使坡面流流速、单宽流量和雷诺数减小,从而减少了坡面径流^[1-3]。其次,夹带污染物的水流入渗可以沿土壤裂隙迅速并直接的到达地下水层,加大了地下水污染的可能性。再者,土壤裂隙可作为灌溉时的优先流途径,只有少部分水分和肥料通过土壤基质,其余绕过土壤基质快速下渗,降低水肥利用率^[3-5]。所以裂隙网络对坡面流及土壤水分入渗影响的研究对降低地下水污染、提高水肥利用率、优化和发展土壤干缩裂隙的农田产流及入渗规律等研究具有重要意义^[3]。以往研究多将土壤干缩裂隙、地表产流、土壤水分入渗分开单独进行研究,但是将裂隙网络、地表产流和土壤水分入渗作为一个整体研究鲜见。为此,通过模拟裂隙网络和控制降雨时长及雨强,在获取大量野外试验数据的基础上,对试验数据进行处理得到坡面流量、入渗量等参数,并应用STIR131等软件对试验图片进行处理并在FORTRAN编程平台通过编程运算得到土壤水分运动的入渗深度、染色面积等相关参数,为分析裂隙网络对坡面流及土壤水分入渗的影响提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在宁夏中宁县引黄灌区(105.67°E,37.48°N)进行,灌区位于宁夏回族自治区中部西侧,地处内蒙古高原和黄土高原的过渡带,属北温带季风气候区,年平均气温9.5℃,年平均降水量202.1 mm,年平均蒸发量1 947.1 mm^[6],田间持水率(质量)为23.82%,土壤有机质平均质量分数为14.47 g/kg,pH值为7.58。

1.2 染色示踪试验

试验按照降雨强度和降雨历时设置6个处理,见表1。

收稿日期:2017-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51569023,51369025)

作者简介:朱磊(1980-),男,宁夏中卫人。副教授,博士,主要从事土壤水分运动研究。E-mail: nxuzhulei@163.com

表1 土壤染色示踪试验设置

处理	S1	S2	S3	S4	S5	S6
雨强/(mm·h ⁻¹)	50	50	50	30	30	30
时间/min	30	30	30	60	60	60
有无裂隙	有	有	无	有	有	无

如图1所示,在试验区域(100 cm×100 cm)去除表面浮土并做成倾角为10°的斜坡,用电钻打孔并形成矩形土壤裂隙网络,每条裂隙长80 cm宽1 cm,深度30 cm,共10条。每次试验在保持裂隙网络与试验田倾角不变,通过人工模拟降雨器改变降雨时长及雨强,研究裂隙网络对坡面流及土壤水分入渗的影响。降雨开始前在X-Y平面试验田一侧进行初始含水率测量,并在Z-Y平面安置径流收集器,下接量筒。在模拟降雨器水源加入碘化钾试剂(20 g/L),根据表1进行试验,收集坡面径流。降雨结束后,使用塑料薄膜进行覆盖,减少水分蒸发。入渗12 h后在Z-Y平面开始每隔10 cm逐层做100 cm×80 cm的垂直剖面,并向剖面喷洒淀粉和次氯酸钠混合溶液。水流流经区域,碘离子被氧化成碘分子遇淀粉土壤颜色变蓝;水流未流经区域,土壤颜色不变。待染色反应充分后对试验剖面拍照记录并进行土壤含水率测量。进行土壤含水率测量时每个剖面从上到下,从左到右每隔10 cm取样测定含水率,通过增加取样密度减少试验误差。

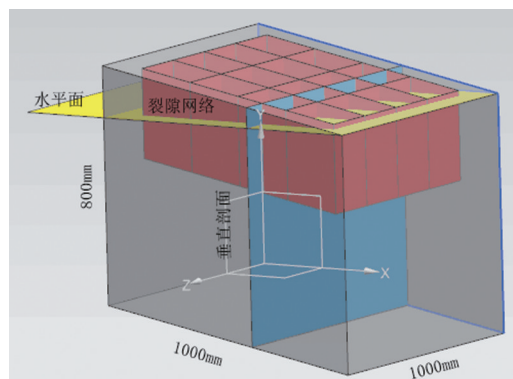
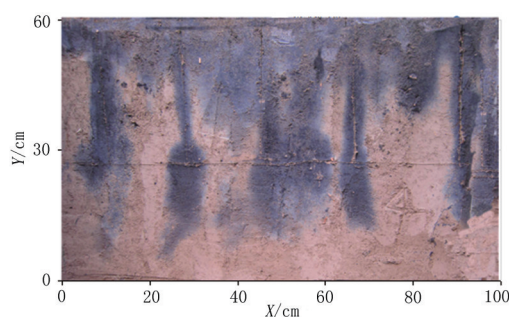


图1 田间试验裂隙网络示意图

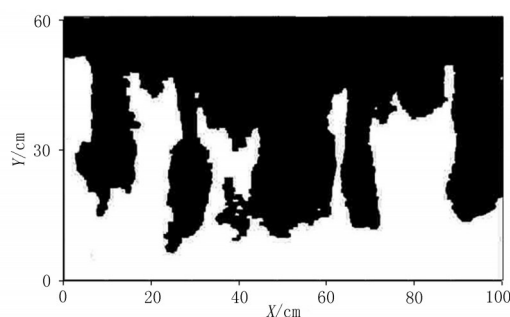
1.3 试验处理

1.3.1 试验图像的处理

应用Photoshop将剖面照片统一剪切为大小2 048×1 229像素,保存为RGB格式,并应用STIR131软件将RGB图像转化为BMP格式,再使用FORTRAN软件将图片进行数字化处理。根据染色点与非染色点RGB值的边界条件^[7],对所有像素点进行二值化处理。所有二值化处理得到的坐标点通过Surfer绘图整理后得出剖面图片。



(a) 试验处理前图片



(b) 试验处理后图片

图2 试验图片处理对照

1.3.2 试验数据处理

用FORTRAN软件对试验照片进行二值化处理,得到染色点和非染色点的坐标,根据计算公式得到平均入渗深度和染色率。其中,入渗深度公式为:

$$\delta_f = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{A} = \frac{n_b}{n_b + n_w} = \frac{n_b}{n_t}, \quad (1)$$

式中: δ_f 为平均入渗深度; A_i 为第*i*列像素点入渗深度; n 为像素点的列数; A 为一列中像素点的总和; n_b 为黑色像素点数即试验中染色的点; n_w 为白色像素点数即试验中未染色的点; n_t 为白色像素点与黑色像素点之和。

染色率计算公式为:

$$\delta_h = \frac{m_b}{m_b + m_w} = \frac{m_b}{m_t}, \quad (2)$$

式中： δ_h 为染色率； m_b 为任意一行中黑色像素点数即试验中染色的点； m_w 为同一行中白色像素点数即试验中未染色的点； m_t 为白色像素点与黑色像素点之和。

2 结果与分析

2.1 裂隙网络对坡面流的影响

由图3可知,在50 mm/h雨强下,S1、S2、S3处理开始产生坡面流的时间分别为模拟降雨开始后741、819、350 s。待降雨结束,S1、S2、S3处理坡面流总水量分别为11 790、6 500、19 650 mL。S1、S2处理由于裂隙的存在,导致部分水分通过裂隙进行入渗,延缓了坡面流产生时间,且部分水分快速的通过裂隙进行入渗,减少了径流量。30 mm/h雨强下,S4、S5、S6处理产生坡面流时间为分别为2 294、3 147、1 279 s,坡面流总水量分别为6 300、815、7 960 mL。可见,裂隙网络的存在延缓了坡面流的产生,减少了坡面径流量。

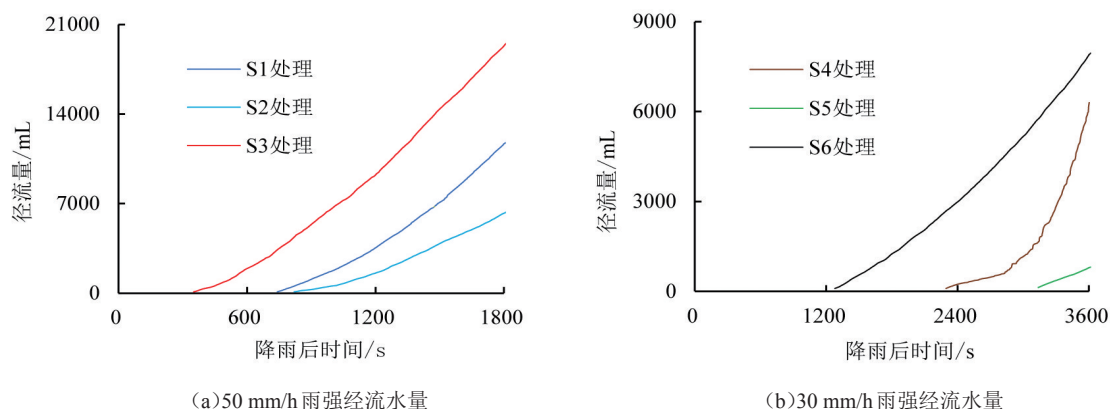


图3 径流量变化

2.2 裂隙网络对土壤水分运动的影响

2.2.1 裂隙网络存在对土壤水分入渗量的影响

为研究裂隙网络对土壤水分运动的影响,根据染色图片可知,6组处理均未发生深层渗漏现象。可应用2种方法计算入渗量,即通过水量平衡法和含水率计算入渗量,结果见表2,表中 R^2 为含水率计算入渗量的拟合曲线判定系数, R^2 趋近于1说明回归方程拟合的越好, R^2 在0.5以上达到率定要求^[8]。

表2 入渗量

处理	水量平衡计算入渗量/mL	含水率计算入渗量/mL	R^2
S1	13 200	11 681	0.687 2
S2	18 500	12 852	0.988 7
S3	5 350	5 247	0.998 3
S4	23 700	22 313	0.816 8
S5	29 185	24 665	0.711 1
S6	22 040	15 146	0.997 2

从表2可看出,6组处理 R^2 均在0.5以上,均达到率定要求。含水率计算入渗量时,将试验含水率与初始含水率的差值通过分层累计的方法求得9个剖面入渗量,添加至散点图并绘制出入渗量的拟合曲线,对曲线积分即为试验入渗量。虽然取样点比较多,但是不能代表整个剖面的含水率,所以由于试验误差,计算结果较水量平衡计算结果偏小。

50 mm/h雨强下,S1、S2、S3处理水量平衡计算入渗量分别为13 200、18 500、5 350 mL,含水率计算入渗量分别为11 681、12 852、5 247 mL,有裂隙试验入渗量均显著高于无裂隙试验入渗量,表明裂隙网络使土壤水分的入渗量增加。在30 mm/h雨强下,S4、S5、S6处理水量平衡计算入渗量分别为23 700、29 185、22 040 mL,含水率计算入渗量分别为22 313、24 665、15 146 mL,有裂隙试验组入渗量均高于无裂隙试验入渗量,但入渗量变化不如50 mm/h雨强条件下显著。可见,裂隙网络使土壤水分的入渗量增加,在一定范围内雨强越大,裂隙网络对入渗量的影响越显著。

2.2.2 裂隙网络存在对土壤水分入渗深度的影响

剖面染色深度的计算通过入渗照片每条竖直像素线上染色点的个数。将每一剖面上的入渗深度在水

平方向每 10 cm 上平均,入渗深度为每条竖直像素线上的入渗深度,得到各试验区域上的入渗深度分布图。为了直观和清晰表示入渗深度空间分布,将入渗深度点绘在 Z-X 平面上,结果见图 4。

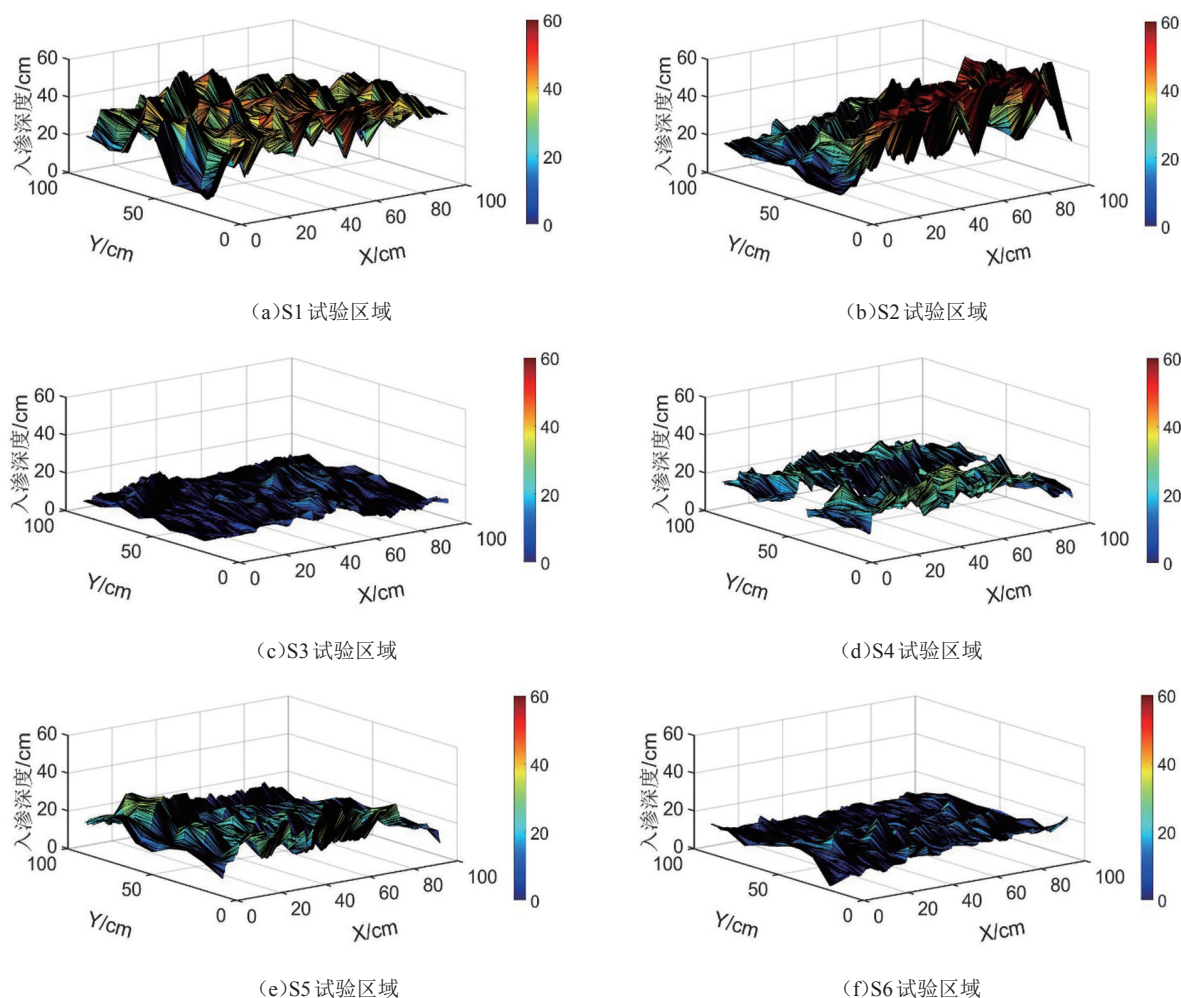


图 4 试验入渗深度分布

由图 4 可知,有裂隙区域入渗形状呈带状分布。S1、S2 处理平均入渗深度分别为 33.46、32.49 cm, S3 处理平均入渗深度为 11.64 cm; S4、S5 处理平均入渗深度分别为 20.32、18.45 cm, S6 处理平均入渗深度为 13.69 cm。可见,裂隙网络的存在促使水分平均入渗深度增大,有利于优先流现象的发生,且在 30 mm/h 雨强向 50 mm/h 雨强增大的过程中,水分平均入渗深度呈增大趋势。

进一步对入渗深度进行方差分析,比较剖面的入渗均匀性。方差公式为 $S^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right)$, 式中: X_i 为试验剖面各竖直像素线上的入渗深度; $\bar{X}$ 为试验剖面平均入渗深度。经计算可知, S1、S2、S3 处理方差分别为 74.9、108.4、8.6, S4、S5、S6 处理方差分别为 20.5、25.5、5.6。裂隙存在下土壤水分入渗的均匀度受到影响,相比于无裂隙区域,有裂隙的入渗均匀度差。由 30 mm/h 雨强向 50 mm/h 雨强变化过程中,试验区域的入渗均匀度变差。

2.2.3 裂隙网络存在对土壤水分入渗面积的影响

由图 5 可知,曲线与坐标轴围成的闭合曲线的面积即为入渗面积, P1 到 P9 分别代表剖面 1 到剖面 9。S1、S2、S3 处理平均染色面积分别为 55.8%、54.2%、19.0%, S4、S5、S6 处理平均染色面积分别 33.9%、30.7%、22.8%。可见,雨强相同时,裂隙网络的存在增加了土壤水分入渗的染色面积。

对比 50 mm/h 雨强与 30 mm/h 雨强裂隙网络试验组土壤水分入渗染色面积发现,随着雨强的增大,裂隙网络存在对土壤水分入渗染色面积增加有显著影响。雨强由 30 mm/h 向 50 mm/h 增大的过程中,土壤水分入渗的染色面积呈增大趋势。表明雨强的增大,能促进激活裂隙通道作为优先流通道,有利于优先流形成。

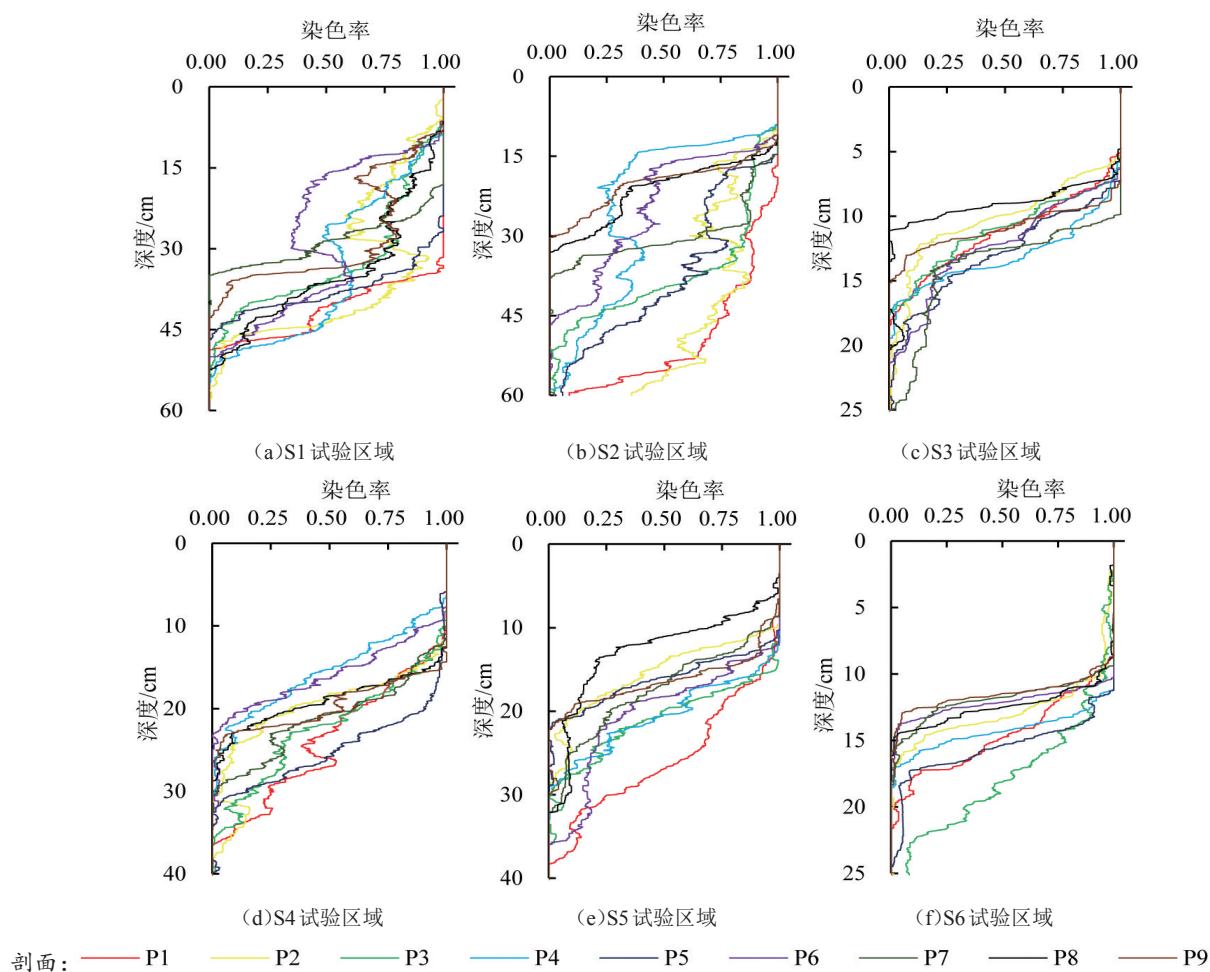


图5 入渗面积分布图

2.3 径流系数与降雨入渗系数比较

降雨入渗系数是指通过含水率计算得到的入渗量与降水量的比值,径流系数是指径流量与降雨量的比值。由表3可知,50 mm/h雨强下无裂隙试验S3处理的径流系数为0.786 0,降雨入渗系数为0.209 9,S1、S2处理的径流系数减小为0.471 6、0.260 0,降雨入渗系数增大为0.467 2、0.514 1;30 mm/h雨强下S6处理的径流系数为0.265 3,降雨入渗系数为0.504 9,S4、S5处理的径流系数减小为0.210 0、0.027 2,降雨入渗系数增大为0.743 8、0.822 2。可见,相同雨强下,裂隙网络的存在减小了径流系数,增大了降雨入渗系数,减少坡面流量,增加了土壤水分的入渗量,且在30 mm/h雨强向50 mm/h雨强增大的过程中,径流系数增大,降雨入渗系数减小。

表3 径流系数与降雨入渗系数

处理	径流量/mL	含水率计算入渗量/mL	径流系数	降雨入渗系数
S1	11 790	11 681	0.471 6	0.467 2
S2	6 500	12 852	0.260 0	0.514 1
S3	19 650	5 247	0.786 0	0.209 9
S4	6 300	22 313	0.210 0	0.743 8
S5	815	24 665	0.027 2	0.822 2
S6	7 960	15 146	0.265 3	0.504 9

此外,50 mm/h雨强下有裂隙试验较无裂隙试验平均入渗深度增大了21.34 cm,平均染色面积增大了36.0%;30 mm/h雨强下有裂隙试验较无裂隙试验平均入渗深度增大了5.70 cm、平均染色面积增大了9.5%。在雨强从30 mm/h增大到50 mm/h过程中,降雨入渗系数降低,但平均入渗深度、平均染色面积呈增大趋势。可见,降雨强度较低时,土壤水主要以基质流模式进行入渗,反之则越多水分通过土壤裂隙进行入渗。

3 结 论

1) 裂隙网络的存在使坡面径流系数减小, 降雨入渗系数增大。较无裂隙试验相比, 50 mm/h 雨强下裂隙试验平均径流系数减小了 0.42, 降雨入渗系数增大了 0.53; 30 mm/h 雨强裂隙试验平均径流系数减小了 0.15, 平均降雨入渗系数增大了 0.38。同时裂隙网络的存在延缓了坡面流形成的时间, 降低了坡面流流速, 减少了坡面流流量, 增加了土壤水分入渗量。

2) 裂隙网络的存在使土壤水分平均入渗深度、染色面积增大, 入渗均匀度变差。较无裂隙试验相比, 50 mm/h 雨强下裂隙试验平均入渗深度增大了 21.34 cm, 平均染色面积增大了 36.0%; 30 mm/h 雨强下裂隙试验平均入渗深度增大了 5.70 cm, 平均染色面积增大了 9.5%。通过数据可知裂隙网络的存在有利于优先流现象的发生, 促进了优先流发育程度, 使部分土壤水分绕过土壤基质延裂隙快速下渗。

3) 30 mm/h 雨强增加至 50 mm/h 雨强时, 平均入渗深度、染色面积、径流系数增大, 降雨入渗系数减小。雨强的增加, 能促进激活裂隙通道作为优先流通道, 有利于优先流形成。

参考文献:

- [1] 张中彬, 彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. 土壤学报, 2015(3):477-488.
- [2] 张小娜, 冯杰, 张超, 等. 不同雨强下土壤大孔隙对坡面流水动力学参数的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(3):264-269.
- [3] 朱磊, 陈玖泓, 刘德东. 耦合基质区与裂隙网络的土壤优先流模型及验证[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14):15-21.
- [4] JARVIS N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. European Journal of Soil Science, 2007, 58(3):523-546.
- [5] 王康. 多孔介质非均匀流动显色示踪技术与模拟方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [6] 陈玖泓, 朱磊, 田军仓. 农田裂隙分布及其对土壤水分运动影响试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(2):1-6.
- [7] 朱磊. 土壤水非均匀流动实验和理论与基于水流网络的数值模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2008.
- [8] 郝远远, 徐旭, 任东阳, 等. 河套灌区土壤水盐和作物生长的 HYDRUS-EPIC 模型分布式模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11):110-116.

The Influence of Fracture Network on Overland Flow and Water Infiltration in Soil

ZHU Lei^{1,2}, YOU Jin^{1,2}, CHEN Jiuhong^{1,2}

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.Efficient Use of Water Resources in Arid Modern Agriculture Ministry of Educational Engineering Research Center, Yinchuan 750021, China)

Abstract: This paper studied the impact of fracture network on overland flow and water infiltration in soil using dye tracer. By digitizing the two-dimensional dye images, we calculated the parameters related to runoff volume, infiltration volume in the absence and presence of the soil fracture network respectively. The result indicated that compared with the non-fractured soil, the fracture network reduced surface runoff coefficient and increased rainfall infiltration coefficient; the average runoff coefficient with the fracture network reduced by 0.42 and the rainfall infiltration coefficient increased by 0.53 under rainfall intensity of 50 mm/h. The average runoff coefficient with the fracture network reduced by 0.15 and the average rainfall infiltration increased by 0.38 under the rainfall intensity of 30 mm/h. Meanwhile, the fracture network increased infiltration depth and the wetting areas, compared with those in the absence of fracture network. The average rainfall infiltration depth in the presence of the fracture network increased 21.34 cm and the average wetting area increased 36.0% under a rainfall intensity of 50 mm/h, and 5.70 cm and 9.5% under a rainfall intensity of 30 mm/h.

Key words: fracture network; overland flow; soil water content; water infiltration in soil

责任编辑: 赵宇龙