

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.03.002

不同雨强下植被对坡地产汇流和溶质运移的影响

张小娜^{1 2},冯 杰^{2 3},邵 伟^{1 2}

(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,采用人工模拟降雨试验,研究了在 3 种雨强下有无植被的试验槽坡面流流速、地面径流以及地面径流中 Br⁻、NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 质量浓度变化.结果表明,随着降雨强度的增大,植被对降雨的截留作用明显减弱,对坡面流流速的延缓作用则呈现先增大后减小的趋势,植被对地面径流中 NH₄⁺ 的质量浓度变化过程影响较大,对 NO₃⁻ 的质量浓度影响较小;Br⁻ 质量浓度随着降雨历时的增加呈现幂函数递减趋势,且这种趋势随着降雨强度的增大趋于减缓.

关键词:植被;坡面产汇流;溶质运移;降雨强度

中图分类号:TV121⁺.7 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2010)03-0246-06

植被是影响坡面流水力特性的重要因子,目前国内外已在这方面进行了大量研究.李毅等^[1-2]通过室内人工降雨试验研究,指出植被有增加入渗率、减小径流系数、明显降低径流流速等作用;郭雨华等^[3-5]通过野外放水试验,得到相同的结论;周星魁等^[6]研究指出,稳渗率随着植被覆盖度的增加呈线性增加,并给出了关系表达式;李毅等^[7]研究了不同草地覆盖面积比与坡面流出流时间、终止时间的关系,得出了草地覆盖面积比与坡面流出流时间和径流终止时间呈正相关关系的结论.草地覆盖面积越大,对坡面流的延滞作用越显著,放水流量越大,草地覆盖对坡面流的延滞作用越小.总之,植被的覆盖改变了坡地径流的形成过程和不同径流成分的比例,从而使坡地出口断面的流量过程和溶质运移发生了变化.本文针对杨凌重壤土,以室内试验槽为平台,采用人工模拟降雨试验,研究在不同雨强下植被对坡面流流速、地面径流以及地面径流中 Br⁻、NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 质量浓度变化的影响.

1 试验方法

1.1 试验设计

试验在 2 个可变节的试验槽内进行,其中试验槽的长、宽、深分别为 2.0 m、0.55 m、0.35 m.土样为陕西杨凌重壤土,为准确模拟田间的实际状况,采用分层法取土和填土,0~15 cm 为第 1 层,15~30 cm 为第 2 层.分析土壤的颗粒级配比如表 1 所示,第 1 层和第 2 层土壤的密度分别为 1.269 g/cm³ 和 1.305 g/cm³,饱和水力传导度分别为 1.624×10⁻⁴ cm/s 和 1.326×10⁻⁴ cm/s.填土时,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密度,以保证土样的一致性.两试验槽开设有地表径流和地下径流出口,位置分别在试验槽的土壤表层和土壤底层,坡度统一设置为 5°.两槽的不同点在于一槽种植有紫花苜蓿,另一槽则为裸土.

表 1 土壤的颗粒级配
Table 1 Grain gradation of soils

深度/cm	不同直径土壤颗粒所占的质量百分比/%					
	1~0.25 mm	0.25~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	0.005~0.001 mm	<0.001 mm
0~15	0.85	5.45	43.36	12.90	23.10	14.34
15~30	0.55	6.35	42.02	12.72	19.33	19.03

利用陕西省杨凌黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的可控制降雨时间和强度的人工侧喷降雨装置,对试验槽实施人工降雨.该降雨装置的降雨高度为 16 m,降雨强度在 40 ~ 260 mm/h 范围内分级可调,雨滴达到的终点速度满足天然降雨特性,降雨均匀度高达 80% 以上.

试验模拟降雨日期为 2007 年 10 月 10 日—11 月 15 日,分别在 30 mm/h, 60 mm/h 和 120 mm/h 共 3 种降雨强度下对两槽实施人工降雨.3 种降雨强度下的降雨历时分别为 1.5 h,1 h,1 h.为保证试验槽内降雨强度均匀性,需对降雨强度进行率定,率定结果见表 2.每次降雨前将 KBr 1.7 g 和 (NH₄)₂SO₄ 0.7 g 共同溶解于水中,配制成 250 mL 溶液,均匀洒入试验槽中.

1.2 测定方法

坡面流流速测定采用示踪法,径流量的测定采用称重法.水样中 Br⁻,NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 质量浓度的测定分别采用电极法、纳氏试剂光度法和酚二黄酸光度法.

2 试验结果与分析

2.1 植被对坡面流流速的影响

图 1 是根据试验中实测的坡面流流速作出的 3 种降雨强度下两槽的坡面流流速变化过程.从图 1 可以看出,在 3 种降雨强度下,无植被试验槽的坡面流流速明显较有植被试验槽的坡面流流速大.这是由于植被的覆盖使雨滴打击土壤表面的动能得以缓冲;另外,植被的覆盖加大了坡面粗糙度,减缓了坡面汇流流速,所以地面径流流速较裸土中的大.

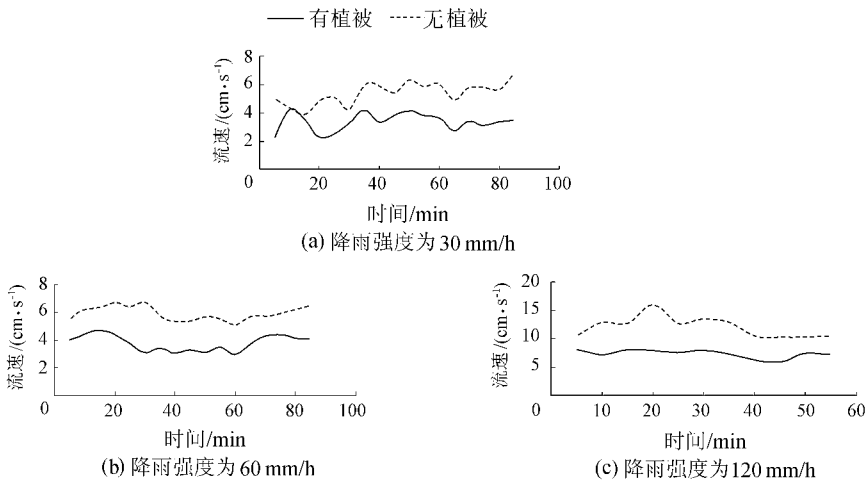


图 1 坡面流流速过程
Fig. 1 Processes affecting overland flow velocity

为了分析在其他影响因素相同的情况下,降雨强度的大小与植被延缓坡面流流速作用大小的关系,求出 3 种雨强下两槽的坡面流平均流速,并以裸土的坡面流平均流速与有植被的坡面流平均流速的比值作为衡量植被延缓坡面流流速作用大小的标准.降雨强度为 30 mm/h,60 mm/h 和 120 mm/h 时,裸土的坡面流流速分别是有植被的坡面流流速的 1.60,1.56 和 1.63 倍,这说明降雨强度的大小与坡面植被延缓坡面流流速作用的大小并非为正相关关系.

2.2 植被对地面径流的影响

地面径流过程如图 2 所示.从图 2 可看出:第一,在同一降雨强度条件下,有植被试验槽任意时刻的地面径流量均小于裸土试验槽的地面径流量.这是由于植物根系的生长,土壤中会产生大孔隙,部分降雨会直接沿着大孔隙进入土壤中;第二,降雨强度 30 mm/h,60 mm/h 和 120 mm/h 时,裸土试验槽的地面径流出流时间较有植被试验槽的地面径流出流时间分别提早 2.2 min,1.2 min 和 0.4 min.这说明植被对降雨有截留作用,对地面径流有阻拦作用,同时也说明随着降雨强度的增大,截留作用和阻拦作用明显减缓.

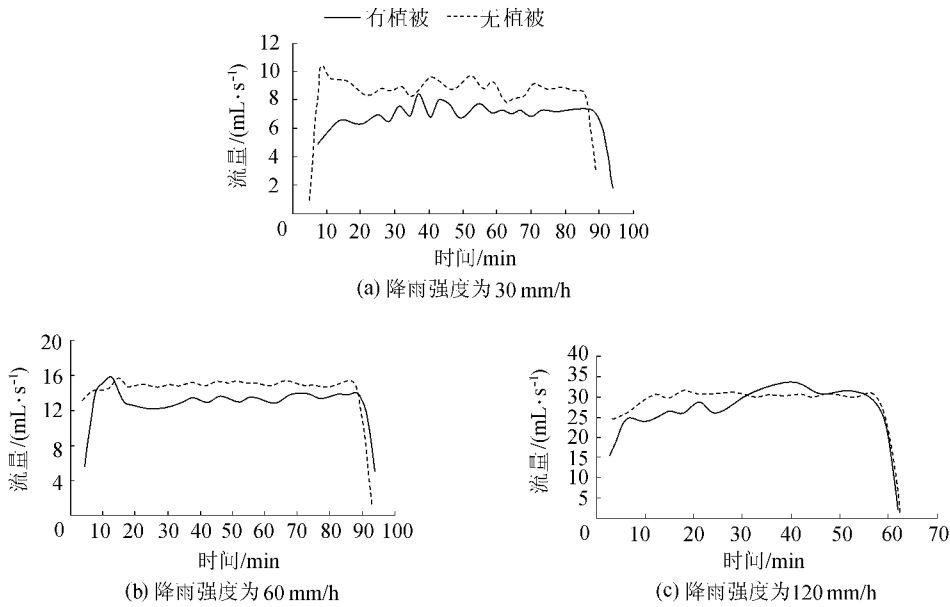


图 2 地面径流

Fig. 2 Surface runoff

2.3 植被对地面径流中溶质质量浓度变化过程的影响

土壤中溶质质量浓度变化过程实质是表层土壤与降雨、径流的相互作用过程^[8-10]. 土壤水文条件和物理化学性质的差异使这一过程变得尤为复杂^[11-13].

2.3.1 Br⁻ 质量浓度变化过程

Br⁻ 为非吸附性离子, 径流是 Br⁻ 流失的主要载体^[10]. 在地表开始产流时, 吸附于表层颗粒和存在于土壤液相中的 Br⁻ 含量相对较高, 地面径流的稀释溶解作用较强, 因而地面径流中 Br⁻ 质量浓度较高. 随着降雨过程的持续, 土壤表层的 Br⁻ 不断地被雨水淋洗到土层深处或随径流、泥沙迁移, 又不能及时得到下层土壤中 Br⁻ 的补充, 因此导致径流中 Br⁻ 含量降低. 地面径流中的 Br⁻ 质量浓度变化曲线见图 3, Br⁻ 质量浓度变化曲线的回归方程为

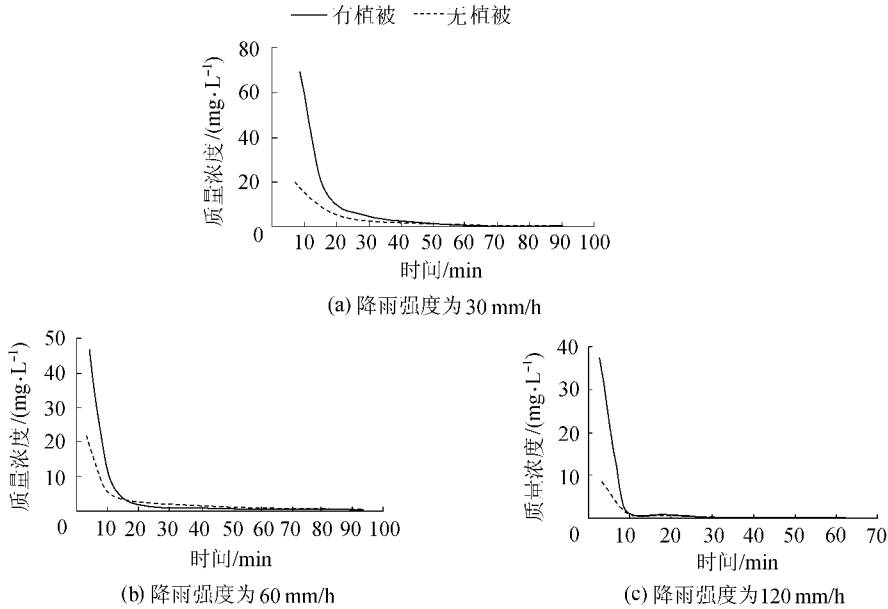


图 3 地面径流中 Br⁻ 质量浓度过程线

Fig. 3 Course lines of Br⁻ concentration in surface runoff

$$C_{\text{有Br}^-} = \begin{cases} 6636.4t^{-2.1336} & R^2 = 0.9979 & I = 30 \text{ mm/h} \\ 286.81t^{-1.6374} & R^2 = 0.9904 & I = 60 \text{ mm/h} \\ 106.97t^{-1.5909} & R^2 = 0.9526 & I = 120 \text{ mm/h} \end{cases} \quad (1)$$

$$C_{\text{无Br}^-} = \begin{cases} 396.95t^{-1.4636} & R^2 = 0.9944 & I = 30 \text{ mm/h} \\ 107.55t^{-1.1775} & R^2 = 0.9757 & I = 60 \text{ mm/h} \\ 25.274t^{-1.3} & R^2 = 0.9739 & I = 120 \text{ mm/h} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $C_{\text{有Br}^-}$ 、 $C_{\text{无Br}^-}$ ——有植被试验槽、无植被试验槽地面径流中 Br^- 质量浓度， mg/L ； t ——时间， min ； R ——相关系数； I ——降雨强度， mm/h 。

降雨条件下土壤溶质迁移包括两个过程：垂向运动和坡面运动。 Br^- 属于非吸附性离子，所以其地面径流中的质量浓度主要取决于下渗量和地面径流量，以及雨滴的冲击作用。植被的覆盖，一方面降低了雨滴的冲击作用，使得进入地面径流中的 Br^- 减少，另一方面，增加了下渗量，使得地面径流量减少， Br^- 质量浓度相对提高。从图 3 和公式 (1) 和 (2) 可以分析出 Br^- 质量浓度随着降雨历时的增加呈现幂函数递减趋势，且这种趋势随着降雨强度的增大趋于减缓。相同降雨条件下，有植被的试验槽地面径流中 Br^- 质量浓度高于裸土试验槽中 Br^- 质量浓度。

2.3.2 NH_4^+ 质量浓度变化过程

与 Br^- 不同， NH_4^+ 带正电荷，属于吸附性化学物质，带有负电荷的土壤颗粒对它的吸附性很强。地表径流中的吸附性化学物质主要来自土壤固体颗粒所吸附的化学物质，包括土壤表层被雨滴击溅扰动和径流剥蚀搬运的侵蚀泥沙。地面径流中 NH_4^+ 质量浓度过程见图 4。从图 4 可以看出，降雨强度不同，两槽 NH_4^+ 质量浓度变化过程相差较大，这说明降雨强度对 NH_4^+ 质量浓度变化的影响较大。

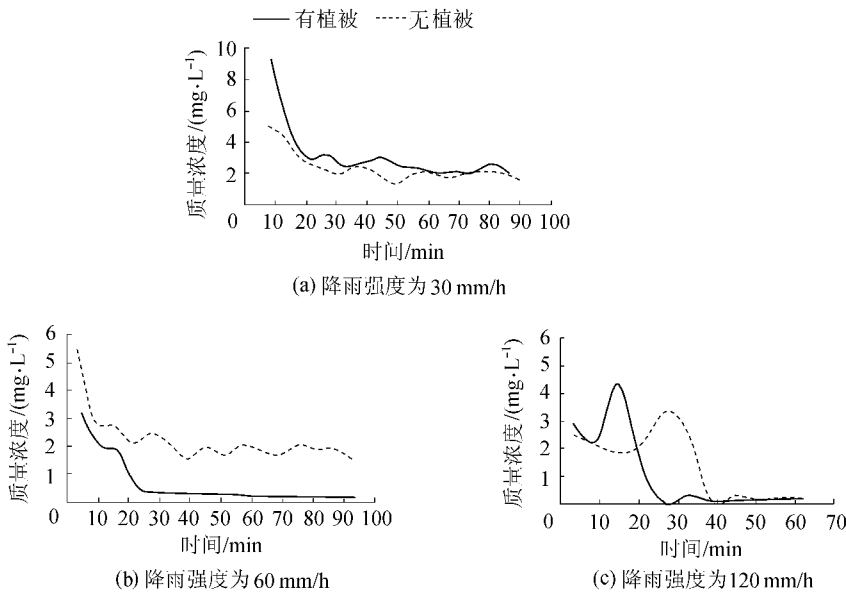


图 4 地面径流中 NH_4^+ 质量浓度过程线

Fig. 4 Course lines of NH_4^+ concentration in surface runoff

降雨强度为 30 mm/h 时，从地面径流开始至降雨 5 min 时，有植被试验槽中的 NH_4^+ 质量浓度高于裸土试验槽中的，降雨 5 min 后，两槽中地面径流中的 NH_4^+ 质量浓度相差不大，变化过程也很一致。原因可能是由于降雨前期有植被的试验槽表层土壤颗粒吸附的 NH_4^+ 较多，但随着降雨的进行，植被的覆盖降低了雨滴的冲击作用，参与地面径流的 NH_4^+ 量减少，所以两槽的 NH_4^+ 质量浓度变化过程趋于相同。降雨强度为 60 mm/h 时，整个地面径流过程，裸土试验槽地面径流中 NH_4^+ 质量浓度都高于有植被试验槽。这是由于植被的覆盖，加大了下渗量，阻碍了地面径流，加剧了泥沙的富集，一定程度上增加了泥沙中的 NH_4^+ 的富集。降雨强度为 120 mm/h 时，两槽 NH_4^+ 质量浓度变化过程相似，整个产流过程中，质量浓度先降低，而后又升高至极值点，接着质量浓度急剧下降，最后趋于平衡。不同点是从地面径流开始至降雨 20 min 时，有植被试验槽地面

径流中 NH_4^+ 质量浓度高于裸土试验槽中的,降雨开始 20 min 时,两槽的质量浓度相同,降雨开始 20 ~ 38 min 期间,裸土试验槽地面径流中 NH_4^+ 质量浓度高于有植被试验槽,降雨 38 min 后,两槽的质量浓度接近,都趋于平衡.分析其原因,可能在于大雨强下,雨滴对坡面的打击力度加强,地面径流量和坡面流流速加大,植被对地面径流的阻碍作用相对变小,而有植被的试验槽在降雨前期地面径流量较大,随着降雨历时的增加,在地表土层被径流剥离搬运后,下层土壤 NH_4^+ 迅速成为新的供给源,而有植被的试验槽中孔隙度较大, NH_4^+ 随下渗水分向深层迁移的量较多,相对来说,下层土壤供给的 NH_4^+ 较少,随地表径流迁移的量也就较少.

2.3.3 NO_3^- 质量浓度变化过程

与 Br^- 一样, NO_3^- 为非吸附性离子,地面径流中 NO_3^- 质量浓度变化过程线如图 5 所示.从图 5 可以看出,两槽的 NO_3^- 质量浓度变化过程线几乎重合,这说明植被对地面径流中 NO_3^- 质量浓度变化影响很小.

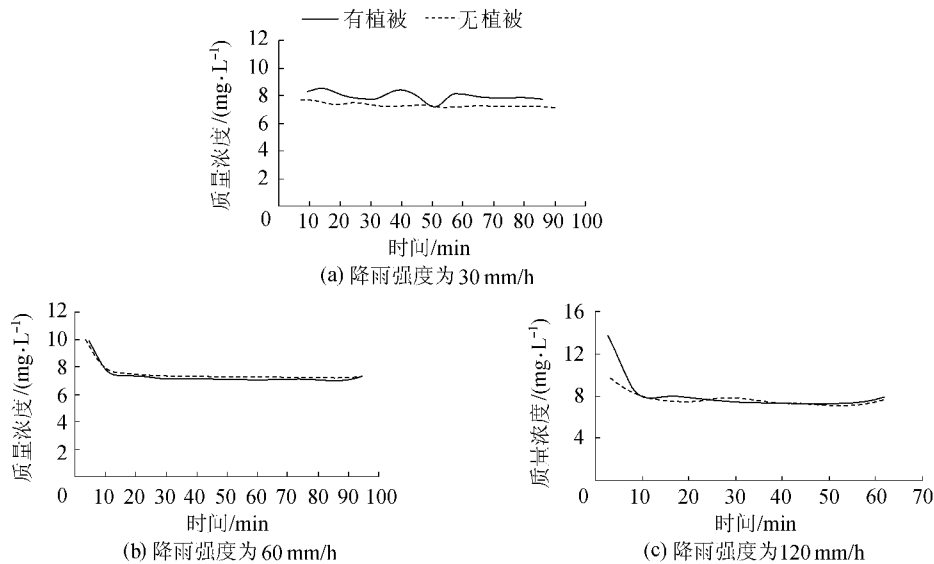


图 5 地面径流中 NO_3^- 质量浓度过程线

Fig. 5 Course lines of NO_3^- concentration in surface runoff

3 结 语

a. 植被对降雨有截留作用,对地面径流有阻拦作用,这使得有植被的试验槽下渗量较大,地面径流出流时间较晚,地面径流量较小,地下径流出现时间较早,地下径流量较大.降雨强度与植被的截留和阻拦作用呈现负相关性.

b. 离子的化学性质不同,植被对其的影响也不同,总体来说,植被对于吸附性离子 NH_4^+ 的影响最大,降雨强度不同,两槽 NH_4^+ 质量浓度变化过程线相差较大,对于地面径流中的 NO_3^- 质量浓度变化影响最小,在不同的降雨强度下,两槽的 NO_3^- 质量浓度变化过程几乎重合,而对于地面径流中 Br^- 质量浓度,只要降雨条件相同,有植被试验槽中的始终高于裸土试验槽中的.

参考文献:

[1] 李毅,邵明安.草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验[J].农业工程学报,2008,24(10):1-5.(LI Yi,SHAO Ming-an. Hydro-dynamic parameters of overland flow during laboratory rainfall experiments under grass coverage[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2008,24(10):1-5.(in Chinese))

[2] 宋维峰,余新晓,张颖.坡度和刺槐覆盖对黄土坡面产流产沙影响的模拟降雨研究[J].中国水土保持科学,2008,26(2):15-18.(SONG Wei-feng,YU Xin-xiao,ZHANG Ying. Effects of slope grade and cover of robinia pseudoacacia on runoff and soil loss from loess slopes under simulated rainfall[J]. Science of Soil and Water Conservation 2008,26(2):15-18.(in Chinese))

[3] 郭雨华,赵廷宁,孙保平,等.草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究[J].水土保持研究,2006,13(4):264-267.(GUO Yu-hua,ZHAO Ting-ning,SUN Bao-ping,et al. Study on the dynamic characteristics of overland flow and resistance to overland flow of grass slope[J]. Research of Soil and Water Conservation 2006,13(4):264-267.(in Chinese))

- [4] 吴淑芳,吴普特,冯浩,等.标准坡面人工草地减流减沙效应及其坡面流体力学机理研究[J].北京林业大学学报,2007,29(3):99-104.(WU Shu-fang,WU Pu-te,FENG Hao,et al. Effects of forage grass on the reduction of runoff and sediment and the hydrodynamic characteristic mechanism of slope runoff in the standard slope plot[J]. Journal of Beijing Forestry University 2007 29(3):99-104.(in Chinese))
- [5] 何进知,李舒宝,蒋永奎,等.森林植被对流域产汇流的影响分析[J].水力发电学报,2001(2):69-72.(HE Jin-zhi,LI Shu-bao,JIANG Yong-kui,et al. Analysis of the watershed runoff yield and concentration on the variation of the forest cover[J]. Journal of Hydroelectric Engineering 2001(2):69-72.(in Chinese))
- [6] 周星魁,王忠科,蔡国强.植被和坡度影响入渗过程的试验研究[J].山西水土保持科技,1996(4):10-13.(ZHOU Xing-kui,WANG Zhong-ke,CAI Guo-qiang. Experimental study on the influence of vegetation and slope on slope infiltration process[J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi,1996(4):10-13.(in Chinese))
- [7] 李勉,姚文艺,陈江南,等.草被覆盖对坡面流流速影响的人工模拟试验研究[J].农业工程学报,2005,21(12):43-47.(LI Mian,YAO Wen-yi,CHEN Jiang-nan,et al. Experimental study on the effect of different grass coverages on the overland flow velocity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2005 21(12):43-47.(in Chinese))
- [8] VINEY N R,SIVAPALAN M,DEELEY D. Conceptual model of nutrient mobilization and transport applicable at large catchments scales[J]. Journal of Hydrology 2000 240(1/2):23-44.
- [9] ZHANG X C,NORTON D,LEI T. Coupling mixing zone concept with convection-diffusion equation to predict chemical transfer to surface runoff[J]. Transactions of ASAE,1999,42(4):987-994.
- [10] 张亚丽,张兴昌,邵明安,等.降雨强度对黄土坡面矿质氮素流失的影响[J].农业工程学报,2004,20(3):55-58.(ZHANG Ya-li,ZHANG Xing-chang,SHAO Ming-an,et al. Impact of rainfall intensity on soil mineral nitrogen loss by runoff on loess slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2004 20(3):55-58.(in Chinese))
- [11] 王全九,穆天亮,王辉,等.土壤溶质随径流迁移基本特征分析[J].水土保持研究,2008,15(6):38-41.(WANG Quan-jiu,MU Tian-liang,WANG Hui,et al. Features analysis of solute in soils transfer with surface runoff[J]. Research of Soil and Water Conservation,2008,15(6):38-41.(in Chinese))
- [12] 王全九,沈晋,王文焰,等.降雨条件下黄土坡面溶质随地面径流迁移试验研究[J].水土保持学报,1993,7(1):11-17.(WANG Quan-jiu,SHEN Jin,WANG Wen-yan,et al. Laboratory experiments of solute in the loess slope with surface runoff during rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1993,7(1):11-17.(in Chinese))
- [13] 张光辉,刘宝元,张科利.坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J].土壤学报,2002,39(6):882-886.(ZHANG Guang-hui,LIU Bao-yuan,ZHANG Ke-li. Experimental simulation of hydraulic mechanism of soil detachment by surface runoff on slope land[J]. Acta Pedologica Sinica 2002 39(6):882-886.(in Chinese))

Influence of vegetation on overland runoff generation, flow concentration and solute transport under different rainfall intensities

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

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: The overland flow velocity, surface runoff without vegetation, and course lines of Br^- , NH_4^+ , and NO_3^- concentrations in the surface runoff under three rainfall intensities (30 mm/h, 60 mm/h and 120 mm/h) were studied based on laboratory soil tank experiments and artificial rainfall simulations. The results show that, with the increase of the rainfall intensity, the interception of rainfall by vegetation decreases, and the capacity of vegetation to delay the overland flow velocity exhibits a trend of decrease. The vegetation has the greatest influence on the course lines of NH_4^+ concentration in the surface runoff and a lesser influence on the course lines of NO_3^- concentration in surface runoff. The Br^- concentration appears to have a decreasing trend in the form of a power function with the increase of rainfall duration, and this trend slows with the increase of rainfall intensity.

Key words: vegetation; overland runoff generation and flow concentration; solute transport; rainfall intensity