

不同雨强条件下坡度对坡地产汇流及溶质运移的影响

张小娜^{1,2}, 冯杰^{2,3}, 高永波², 刘宁宁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 水资源研究所, 北京 100044)

摘要: 为了分析坡度对坡面产汇流和溶质运移的影响, 以室内土槽为平台, 采用人工模拟降雨实验, 研究了坡度为 5° , 10° 和 15° , 雨强为30, 60和120 mm/h条件下植被坡地的入渗总量、坡面流流速、地面径流以及地面径流中 Br^- , NH_4^+ 和 NO_3^- 的浓度变化。结果表明, 在其它影响因素相同的情况下, 随着坡度的增大, 坡面平均流速增大, 地面径流总量增加, 入渗总量减少, 地面径流初始产流时间和径流终止时间均呈减小趋势, 地面径流中 Br^- 浓度变化不大, 变化曲线几乎重合, NH_4^+ 浓度总体上呈递减趋势, 且随着降雨强度的增大, 这种递减趋势越显著, NO_3^- 的规律性不明显。用幂函数关系可较好地拟合出坡面平均流速与坡度的关系。

关键词: 坡度; 坡地产汇流; 溶质运移

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0119-05

中图分类号: P642.11

Influences of Slope on Runoff and Concentration and Solute Transport Under Different Rainfall Intensities

ZHANG Xiao-na^{1,2}, FENG Jie^{2,3}, GAO Yong-bo², LIU Ning-ning²

(1. Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Eng., Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

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

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

Abstract: In order to analyze the influences of land surface slope on runoff and concentration and solute transport, the total infiltration amount, the average of overland flow velocity, surface runoff and the changes of Br^- , NH_4^+ , and NO_3^- concentrations in surface runoff were studied in indoor soil tank experiment under artificial rainfall simulation. Three slopes (5° , 10° , and 15°) and three rainfall intensities (30, 60 and 120 mm/h) are tested. Results show that with slope increasing, the average of overland flow velocity and the total amount of surface runoff are increased and the beginning time and termination time of surface runoff are advanced. The total infiltration amount is decreased with slope increasing. No obvious change in Br^- concentration is observed and the course lines of Br^- concentration in surface runoff are almost coincident. The NH_4^+ concentration appears a reducing trend and this trend becomes obvious with rainfall intensity increasing. Change of NO_3^- concentration is not evident. The relationship between the averaged overland flow velocity and surface slope expressed by simple power function.

Keywords: land surface slope; slope runoff and concentration; solute transport

坡面产汇流影响因子的研究一直是水文学的重要研究课题之一,也是解决经济社会可持续发展中出现水问题必然遇到的一个重要问题^[1]。坡度是坡地产汇流的一个重要影响因子,坡度的改变,使得坡地径流的形成过程和不同径流成分的比例以及坡地出口断面的流量过程和溶质运移发生了变化。

关于坡度对坡地产汇流和溶质运移的影响国内外已经做了大量研究^[2-10]。本研究通过分析人工降雨条件下不同坡度植被坡地的入渗总量、坡面流流速、地面径流以及径流中的 Br^- , NH_4^+ 和 NO_3^- 的浓度变化,希望能够进一步认知坡度对坡面产汇流和溶质运移的影响机理。

收稿日期: 2009-09-15

修回日期: 2009-11-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“土壤大孔隙空间结构及水和溶质在其中运移的机理研究”(50609005); 霍英东青年教师基金(101075); 水利部社会公益性项目(200801033)

作者简介: 张小娜(1981—), 女(汉族), 河南省南阳市人, 博士研究生, 主要从事产汇流方面的研究。E-mail: nanaxiao86@163.com。

1 试验方法

1.1 试验设计

试验所用土样为陕西杨凌重壤土,为了准确模拟田间的实际状况采用分层法取土,0—15 cm 为第一层,15—30 cm 为第二层。分析土壤的颗粒级配比如表 1 所示。试验在可变节坡度的试验槽内进行,试验槽的长、宽、深分别为 2.0, 0.55, 0.35 m。

填土时也采用分层法,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土壤表层。试验槽中种植紫花苜蓿,该植物根系发达。试验的前期工作还包括,在紫花苜蓿生长成熟之前精心养育此植物,无雨期时,将土槽运到室外,接受日光,雨期时,推进实验室。

表 1 土壤的颗粒级配 %

深度/ cm	土壤颗粒直径/mm					< 0.001
	1~ 0.25	0.25~ 0.05	0.05~ 0.01	0.01~ 0.005	0.005~ 0.001	
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

利用陕西省杨凌区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,对土槽实施人工降雨。该降雨装置的降雨高度为 16 m,降雨强度可在 40~260 mm/h 范围内分级调节,雨滴终点速度满足天然降雨特性,降雨均匀度高达 80% 以上。

1.2 试验方法

本试验模拟降雨日期为 2007 年 10—11 月,共进行了 9 次人工降雨,分别在 3 种降雨强度 30, 60 和 120 mm/h 下,改变土槽的坡度从 5°, 10° 到 15°。3 种雨强的降雨历时分别为 1.5, 1, 1 h。每次降雨前将 KBr 1.7 g, (NH₄)₂SO₄ 0.7 g 溶解于水中,配制成 250 ml 溶液,均匀洒入试验槽中。用负压计法测定土壤容积含水量,降雨强度为 30 mm/h,坡度为 5°, 10° 和 15° 时降雨前试验槽的前期土壤容积含水量分别为 37.20%, 37.35% 和 37.58%; 降雨强度为 60 mm/h, 分别为 38.59%, 38.46% 和 38.25%; 降雨强度为 120 mm/h, 分别为 37.90%, 38.59% 和 37.36%。

1.3 分析方法

坡面流流速测定采用示踪法,地表径流量的测定采用称重法,观测地表径流时间间隔为 3 min,水样中的 Br⁻, NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 浓度,采用的测定方法分别为电极法、纳氏试剂光度法和酚二黄酸光度法。

2 结果与讨论

2.1 坡度对入渗总量的影响

土壤中存在能吸收、保持水分的固体土壤颗粒和可传递水分的孔隙,降雨初期,土壤水分的入渗主要受控于土壤吸力,入渗过程就是土壤吸收水分,调节水分,并向土层中传递水分的过程。这无疑要受到土壤水作用力的支配。土壤水作用力包括分子力、毛管力和重力^[11]。

绘制坡度与入渗总量的关系曲线可看出随着坡度的增大,入渗总量减少。分析其原因,可能是由于在土壤物化性质相同的情况下,分子力和毛管力相同,但随着坡度的增大,重力在沿坡面方向的分力增大,沿垂直坡面方向的分力减小,土壤吸收水分的能力减小,所以入渗总量减少。具体来说,在降雨强度为 30 和 60 mm/h 时,入渗总量随着坡度的增大呈指数减少趋势;在降雨强度为 120 mm/h 时,则呈抛物线减少趋势。

2.2 坡度对坡面流流速的影响

坡面流流速受控于地表特征、地表坡度、土壤特性和地面径流量等。江忠善^[12]对国内外的试验资料及数据进行分析整理后发现,薄层水流平均流速公式可简化为流量和坡度的幂函数形式

$$V = K q^n S^m$$

式中: V ——薄层水流平均流速(m/s); q ——单宽流量[m³/(s·m)]; m, n ——参数; S ——坡度。绘制由试验中实测的坡面流速计算得出的坡面流平均流速与表坡度的关系曲线,可看出在其它影响因素相同的情况下,平均流速随着地表坡度和雨强的增大而增大。用简单的幂函数关系拟合出的坡面平均流速与坡度的关系,相关系数均在 0.90 以上,且小雨强下,坡度的指数 m 较大,这说明随着雨强的增大,坡度对流速的影响减小。

2.3 坡度对地面径流的影响

2.3.1 地面径流初始产流时间变化特征

随着坡度的增大,地面径流初始产流时间呈指数下降。同时随着降雨强度的增大,初始产流时间明显变小。这说明随着坡度的增大,坡面变陡,地面的滞蓄能力下降,部分被积蓄的雨水随坡度的增大而形成径流,在大雨强下这种地面滞蓄能力下降的更为显著。

为了更好地分析降雨强度和坡度与地面径流初始产流时间的相关关系,根据试验数据运用 SPSS 计算出初始产流时间与降雨强度以及初始产流时间和坡度的相关系数,分别为 -0.853 和 -0.397。说明降雨强度和坡度与初始产流时间均呈现负相关,即降

雨强度越大, 初始产流时间越小; 坡度越大, 初始产流时间也越小。

2.3.2 地面径流终止时间变化特征 各场次降雨地面径流在出口处终止的时间差异不大。但总体上, 随着坡度的增大, 径流终止时间呈现线性减小趋势。表明在一定坡度范围内, 坡度越小, 植被的蓄水延滞作用越明显, 坡面流终止时间越长。同时, 随着降雨强度的增加, 坡面流终止时间变小。

同样, 计算出终止时间与降雨强度和坡度的相关关系, 其相关系数分别为 -0.786 和 -0.027 。降雨历时与终止时间的相关系数为 0.998 。可见, 坡度与地面径流终止时间的相关性要差一些。

2.3.3 地面径流总量 在降雨强度、降雨历时、土壤特性一定的条件下, 地面径流量的大小取决于坡度因子。绘制地面径流总量与坡度的关系曲线, 得出在其它条件相同的情况下, 随着坡度的增大, 地面径流总量呈现线性增加趋势。如果假设坡度为 5° 时的地面径流总量为 1, 则坡度为 10° , 在降雨强度为 30, 60, 120 mm/h 时的径流总量分别为 1.086 4, 1.012 5 和 1.008 1 m^3 ; 坡度为 15° 的地面径流总量分别为 1.117 3, 1.041 0 和 1.058 3 m^3 。

随着坡度的增大, 地面径流总量增加的原因是由于坡度的增大, 重力在沿坡度方向的分力增大, 沿垂直坡面方向的分力减小, 土壤吸收水分的能力减小, 所以入渗总量减少, 地面径流量增加。

2.4 坡度对地面径流中溶质变化过程的影响

降雨条件下土壤溶质迁移包括两个过程: 一是在降雨过程中, 土壤溶质随入渗水分向深层迁移; 另一是当降雨强度大于土壤入渗能力时产生地表径流, 土壤表层的溶质在雨滴打击及径流冲刷作用下, 向地表径流传递, 并随地表径流迁移。土壤溶质随地表径流

迁移受众多因素的影响, 但直接影响因素为降雨特性、下垫面条件及所涉及化学物质特性。降雨不仅为整个土-水体系输入水量, 而且也输入能量, 因此它是土壤体系中水分和溶质迁移的能源; 下垫面是降雨及径流溶质迁移的基础, 也是径流溶质的供给源; 化学物质是整个研究的对象, 它的物理化学特性同样影响其本身的迁移特性^[13-17]。

2.4.1 Br^- 变化过程 Br^- 是保守离子, 在土槽中仅作迁移运动, 不发生吸附和转化。地面径流中的 Br^- 浓度变化曲线见图 1。产流初期, 径流中的 Br^- 浓度最高, 但随着降雨历时的增加, 径流中 Br^- 浓度表现出指数递减的趋势。这是由于 Br^- 带有负电荷, 与土壤颗粒所带电荷相同, 故土壤颗粒对其具有排斥力, 因此 Br^- 易于脱离土壤颗粒, 随水溶液迁移, 所以降雨产流后, 土壤表层溶液中 Br^- 很快被稀释, 使地面径流中的 Br^- 浓度由最大值迅速下降并随之趋于平缓化^[8]。

在雨强为 30 mm/h 时, 产流开始至降雨 20 min 内, Br^- 浓度从 69 ~ 80 mg/L 急剧降至 6 ~ 10 mg/L, 而在接下来 30 min 内, 浓度变化幅度很小, 在 4.6 ~ 7.7 mg/L, 降雨历时 50 min 后, 地面径流中的 Br^- 含量极其微小, 浓度在 0 ~ 1.5 mg/L; 雨强为 120 mm/h 时, 产流开始至降雨 11 min 内, Br^- 浓度从 37.5 ~ 47 mg/L 迅速下降至 5.3 ~ 8.7 mg/L, 之后地面径流中的 Br^- 浓度极其微小, 变化幅度也很小。根据地面径流过程和 Br^- 浓度变化过程计算坡度为 5° , 10° 和 15° 时地面径流中 Br^- 流失总量。其中降雨强度为 30 mm/h, 在 3 种坡度下, 地面径流中 Br^- 流失总量分别为 203.558, 208.830 和 255.012 mg; 降雨强度为 120 mm/h 时, 地面径流中 Br^- 流失总量分别为 319.177, 435.990 和 520.770 mg。

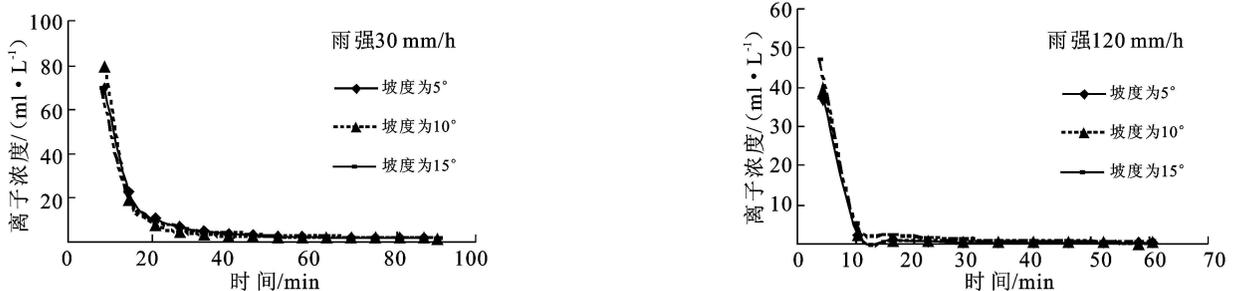


图 1 不同雨强条件下地面径流中 Br^- 浓度过程线

从上面分析可得出, 在相同降雨强度下, 随着坡度的增大, 地面径流中 Br^- 流失总量增加, 但各时刻地面径流中 Br^- 的浓度变化不大, 这说明坡度对地面径流中 Br^- 浓度的变化过程影响非常小; 而在相同的坡度下, 小

雨强地面径流中 Br^- 的浓度要大于大雨强地面径流中的 Br^- 浓度, 但大雨强下 Br^- 流失总量显著大于小雨强下 Br^- 流失总量。这是因为随着雨强的增大, 地面径流量增加, Br^- 被稀释的程度加剧, 所以浓度较小。

2.4.2 NH_4^+ 变化过程 图2为地面径流中 NH_4^+ 浓度变化过程线。从图中可以看出, NH_4^+ 浓度变化较 Br^- 浓度变化复杂, 且在产流初期, 浓度远较 Br^- 浓度小。这是由于 NH_4^+ 半径较小, 带有与土壤颗粒相反的电荷, 土壤颗粒对其吸附性很强, 不易脱离土壤颗粒, 且 NH_4^+ 本身的转化性亦很强, 所以地面径流中 NH_4^+ 的浓度较小, 且在土壤中迁移转化较为复杂。

降雨强度为 30 和 120 mm/h 时, 随着降雨历时的增加, NH_4^+ 浓度变化都呈现单调递减趋势。根据 NH_4^+ 浓度变化特点, 可将地面径流中 NH_4^+ 浓度变化过程分为两个阶段: 急降阶段和平缓变化阶段。在这两个阶段中, 随着坡度的增大, 地面径流中 NH_4^+ 浓度总体上均呈递减趋势, 且随着降雨强度的增大,

这种递减趋势越显著。分析其原因, 第一, 坡度越大, 与雨滴发生碰撞的直接作用对象面越小, 与降雨混合的土壤表层 NH_4^+ 越少; 第二, 坡度越大, 坡面流水层越薄, 越有利于进行硝化作用, NH_4^+ 越易被转化为 NO_2^- 或 NO_3^- ; 第三, 降雨强度越大, 雨滴对土壤或者水层的冲击力越大, 坡度不同水层的厚薄对比更为明显, 即前两种作用更为显著。

同理, 计算坡度为 5° , 10° 和 15° 时的地面径流中 NH_4^+ 流失总量。降雨强度为 30 mm/h 条件下, 地面径流中 NH_4^+ 流失总量分别为 90.575, 90.426 和 70.803 mg; 降雨强度为 120 mm/h 下, 地面径流中 NH_4^+ 流失总量分别为 425.667, 303.578 和 86.536 mg。与 Br^- 流失总量不同, 同一雨强下, NH_4^+ 流失总量随着坡度的增大而减少。

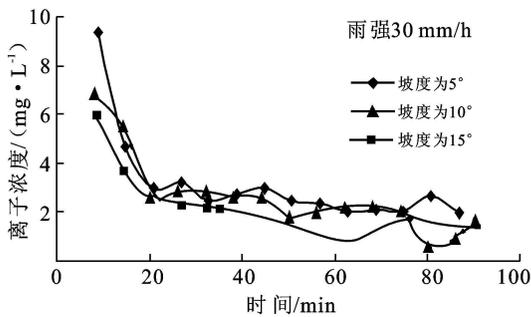


图2 不同雨强条件下地面径流中 NH_4^+ 浓度过程线

2.4.3 NO_3^- 变化过程 NO_3^- 是由 NH_4^+ 通过硝化作用转化过来的。相比较 Br^- 和 NH_4^+ , NO_3^- 浓度变化幅度偏小。这是由于坡面水流较薄, 易于硝化, 所以整个降雨过程中, 不断有 NH_4^+ 被转化为 NO_3^- , 即 NO_3^- 不断被补充。同时这也说明了在地面径流过程中, 相对于 NH_4^+ , NO_3^- 较为稳定, 不易被反硝化。

降雨强度为 30mm/h 时, 坡度为 10° 和 15° 时, 两者的地面径流中 NO_3^- 的浓度变化比较一致, 坡度为 5° 时, 其变化比较复杂。降雨强度为 120 mm/h 时, 坡度为 5° 时和 10° 时, 两者的地面径流中降雨后期 NO_3^- 的浓度变化比较一致, 坡度为 15° 时, NO_3^- 的浓度变化幅度很小, 几乎不发生变化。同时随着坡度的增加, 变化幅度呈减小趋势(图3)。

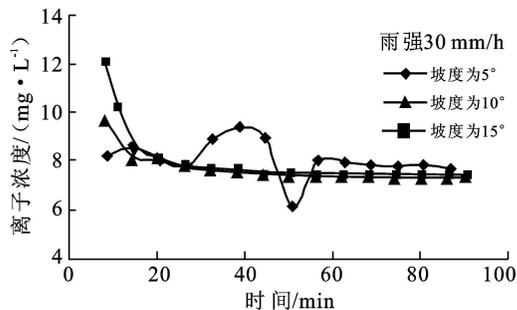


图3 不同雨强条件下地面径流中 NO_3^- 浓度过程线

3 结论

(1) 在其它条件相同的情况下, 坡度增大, 重力在

沿坡度方向的分力增大, 沿垂直坡面方向的分力减小, 地面径流总量增加, 入渗总量减小且入渗总量随坡度增大的趋势随着降雨强度的不同而不同, 在降雨强度

为30和60 mm/h条件下, 呈现指数减少趋势, 在降雨强度为120 mm/h条件下, 则呈现抛物线减少趋势。

(2) 用幂函数可以拟合出的坡面平均流速与坡度的关系。坡度增大, 坡面流平均流速增大且随着降雨强度的增大, 坡度对流速的影响减小。

(3) 坡度增大, 地面植被的滞蓄能力减弱, 地面径流初始产流时间提前, 坡度和地面出流时间的相关系数为-0.397。坡度与地面径流终止时间的相关性要差一些, 相关系数为-0.027。

(4) 坡度对地面径流中 Br^- 浓度的变化影响非常小, 对 NH_4^+ 浓度的影响较大, 随着坡度的增大, 地面径流中 NH_4^+ 浓度总体上呈递减趋势, 且随着降雨强度的增大, 这种递减趋势越显著。

(5) 相同雨强下, 随着坡度的增大, 地面径流中 Br^- 流失总量增加, NH_4^+ 流失总量减少。

[参考文献]

- [1] 芮孝芳. 水文学研究进展[M]. 南京: 河海大学出版社, 2007: 51.
- [2] 陈浩, 蔡国强. 坡度对地面径流深、入渗量影响的试验研究[C]//晋西黄土高原土壤侵蚀规律试验研究文集. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [3] 周星奎, 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, 74(4): 10-13.
- [4] 范世香, 韩绍文. 地面坡度对地表径流影响的试验研究[J]. 水土保持通报, 1991, 11(4): 6-10.
- [5] 程琴娟, 蔡国强, 廖义善. 土壤表面特性与坡度对产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 9-15.
- [6] 蒋定生, 黄国俊. 地面坡度对降水入渗影响的模拟试验[J]. 水土保持通报, 1984, 4(2): 10-13.
- [7] Fang H Y, Cai Q G, Chen H. Effect of rainfall regime and slope on runoff in a gullied loess region on the Loess Plateau in China[J]. Environmental Management, 2008, 42(3): 402-411.
- [8] Chaplot V, Le Bissonais Y. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plots sizes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25: 145-153.
- [9] El Hassanin A S, Labib T M, Gaber E I. Effect of vegetation cover and land slope on runoff and soil losses from the watersheds of Burundi[J]. Agricultural ecosystem and environment, 1993, 43: 303-308.
- [10] Posen J. The influence of angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume[J]. Zeitschrift für Er Geomorphologie, 1984, 49: 117-131.
- [11] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 11.
- [12] 江忠善, 宋文经. 坡面流速的试验研究[J]. 中科院西北水保所集刊, 1998(7): 46-52.
- [13] 王九全, 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.
- [14] 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, 52.
- [15] 张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学试验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 882-886.
- [16] 王全九, 王文焰, 沈晋. 黄土坡面溶质随径流迁移的动力模拟模型[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 1993, 21(S): 2-4.
- [17] 王全九, 王文焰, 沈晋. 黄土坡面溶质随径流迁移的对流质量传递模型[J]. 水土保持研究, 1994, 1(5): 12-15.