

雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响

张梦¹, 李冬杰², 周玥¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京金水信息技术发展有限公司, 北京 100053)

摘要: 采用人工模拟降雨的手段, 在 2 种雨强(50, 75 mm/h)、4 种坡度(5°, 10°, 15°, 20°)条件下, 研究了雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀和养分流失的影响。结果表明:(1)降雨强度从 50 mm/h 增大到 75 mm/h, 相同坡度的坡面开始产流时间提前了 2.75~4.79 min。(2)随着雨强的增大, 同一坡度的坡面径流量增加了 12.53~15.80 mm/m², 增加幅度为 1.24~1.31 倍; 同一坡度的坡面产沙量增加了 0.47~3.61 kg/m², 增加幅度为 0.77~2.90 倍。坡面侵蚀过程中, 存在临界坡度, 为 15°左右。(3)氮素流失以径流流失为主, 泥沙中总氮的流失量较低, 仅占径流总氮流失量的 1.4%~9.7%。坡度较小时, 磷素流失途径以径流流失为主, 随着坡度的增加, 磷素的流失途径以泥沙流失为主。(4)径流总氮流失浓度与径流强度呈线性正相关, 泥沙总氮和总磷流失浓度与产沙率也分别呈显著的线性正相关。

关键词: 降雨强度; 坡度; 土壤侵蚀; 养分流失

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)01-0085-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.014

Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Soil Erosion, Nitrogen and Potassium Loss on Loess Slope

ZHANG Meng¹, LI Dongjie², ZHOU Yue¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Beijing Golden-water Info-tech. Ltd., Beijing 100053)

Abstract: This study explored the effects of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion and nutrient loss under two rainfall intensities (50 and 75 mm/h) and four slope gradients (5°, 10°, 15° and 20°) through simulated rainfall experiments. The results were as follows: (1) When the rainfall intensity increased from 50 mm/h to 75 mm/h on the same slope, the runoff yield time was advanced by 2.75 ~ 4.79 min. (2) On the same slope, with the increasing of rainfall intensity, the cumulative runoff and cumulative sediment yield increased by 12.53 ~ 15.80 mm/m² and 0.47 ~ 3.61 kg/m², respectively, and the increase ranges were 1.24 ~ 1.31 times and 0.77 ~ 2.90 times, respectively; there was a critical slope gradient in the process of slope erosion, and it was about 15°. (3) The loss of nitrogen in the runoff was dominant, and the amount of nitrogen loss in sediment was low, which accounted only for 1.4% ~ 9.7% of total nitrogen loss in runoff; when the slope gradient was low, the loss of phosphorus was mainly caused by runoff loss, while with the increasing of the slope gradient, it was mainly caused by sediment loss. (4) The concentration of total nitrogen loss in runoff had obvious linear positive correlation with runoff intensity, and there was a significant positive linear correlation between total nitrogen and total phosphorus loss and sediment yield rate.

Keywords: rainfall intensity; slope gradient; soil erosion; nutrient loss

我国黄土丘陵区植被稀少, 覆盖度较低, 近年来土壤侵蚀日益严重, 并伴随着大量的养分元素流失。降雨强度和坡度对黄土丘陵区土壤侵蚀影响显著, 对这两个影响因素研究者们已经做过许多研究。其中降雨是影

响坡面产流的主要因子^[1], 黄土丘陵区暴雨频发, 有研究指出降雨强度对黄土坡面径流影响最大, 占权重的 21.84%^[2]。初始产流时间也随着雨强增大而提前, 两者呈明显的负相关^[3-4]。而坡度的影响存在着不同的观

点,多数研究者认为坡度越大则径流量越大^[5-6]。谭贞学等^[7]研究发现,坡度增加时坡面产生的细沟径流流速加快,径流侵蚀强度增加,径流量和产沙量增加。一些研究^[8]则认为坡面承雨量随坡度增加而减小,促进径流量增加的因素被抵消,因而径流量随坡度增大而呈减小趋势。还有研究^[9]指出坡面产流量和产沙量随坡度的增加呈先增大后减小再增大的趋势。

雨强和坡度通过影响径流和泥沙,最终影响着土壤养分流失。大多数研究显示雨强与养分流失量呈正相关^[10]。土壤养分流失主要有两种途径,雨强较小时,随径流迁移的可溶态养分流失量所占比例较高;雨强较大时,土壤养分以泥沙形式随径流迁移^[11]。土壤中养分流失量随坡度的增大而增大,但是当坡度大于某一值时,坡度增加,养分流失量反而减小,即养分流失存在临界坡度^[5,12]。但一些研究指出土壤中不同养分随径流和泥沙流失呈现不同特点。袁兴程等^[13]研究指出在降雨过程中氮素流失以随径流流失为主,而磷素以随泥沙流失为主。陈玲等^[14]则认为,黄土坡地土壤中磷素以地表径流为主。上述研究大多集中于对一个影响因素的探讨,针对坡度和雨强这两个因素共同影响坡面侵蚀和养分流失的研究较少。

黄土坡面土壤侵蚀和养分流失受到雨强和坡度的共同影响,迫切需要对这两种影响因素进行研究。为了更加符合野外实地自然状况,确保研究结果更加精准,本文在内蒙古黄土区修建径流小区,通过模拟降雨试验,分析雨强和坡度在黄土坡面侵蚀过程中的作用机理,以期为预报黄土区坡面土壤侵蚀以及实施水土流失防治措施提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验装置与材料

本试验于 2014 年 8—9 月在内蒙古呼和浩特市和林格尔县(东经 111°41',北纬 40°12')试验基地进行。该地为半干旱气候,年平均降水量为 417.5 mm,24 h 最大暴雨为 99 mm,80%的降雨集中在 6—9 月。基于当地实际自然情况,试验设计了 6 个径流小区,长 10 m,宽 5 m。试验期间植被都被移除,坡面为裸坡。坡度设置为 5°,10°,15°,20°。每个坡面底部有一个长 5 m、宽 2 m、深 0.2 m 的浆砌石槽,中间低,两边高,便于径流收集。石槽通过一个直径 0.075 m 的 PVC 管连接大径流桶。

试验土壤为当地的栗色土,测定试验土壤特性时随机在一个坡面选择 5 个点采集土壤样品,样品采集深度为 0—10 cm,每个样品重 500 g。土样密封在塑料袋中,在实验室进行理化性质分析。将采集的一部分土样筛除根系和石头,使用吸管法测定粒径分布。用法环刀法确定土壤容重。使用 pH 探针插入水土

比例为 2.5:1 的悬浮液中测定土壤 pH。土壤有机质采用湿烧法测定,土壤总氮采用半微量凯氏法测定,土壤总磷采用钼锑抗比色法测定。土壤容重为 1.52 g/cm³,pH 为 8.4,有机质、总氮、总磷含量分别为 2.81,0.17,0.21 g/kg。茹豪等^[15]研究指出,土壤侵蚀量与砂粒所占比例呈正相关关系。本次试验土壤属于砂质壤土,是黄土丘陵区典型土壤类型。土壤颗粒以砂粒为主,占总量的 89.55%,粉粒和黏粒含量很少,分别占总量的 5.43%和 5.02%,土壤团粒结构较差。有研究指出土壤中氮、磷的含量直接影响着土壤结构的好坏^[16],从而对土壤侵蚀产生影响。试验土壤有机质和养分含量低,且团粒结构差,抗冲抗蚀性弱,极易造成土壤侵蚀和养分流失。

试验采用人工模拟降雨,降雨设备为侧喷式降雨器,降雨高度 3 m。坡面两侧每隔 5 m 各设置 3 个喷头,通过调节喷头的喷发角度改变降雨范围,坡顶和坡脚的喷头角度设置为 90°,中间设置为 180°。通过改变喷嘴的孔径和水的压力调整降雨强度。模拟降雨试验之前测定降雨均匀性,在斜坡上均匀放置 40 个径流小桶,并用塑料布覆盖坡面,以防止水分入渗。用测量桶里的降雨量和每次模拟降雨 10 min 后的降雨强度计算均匀性。测定结果显示降雨均匀性大于 70%,满足模拟降雨的要求,结果见表 1。

表 1 坡面模拟降雨均匀度 单位:%

雨强/ (mm·h ⁻¹)	坡度/(°)			
	5	10	15	20
50	70.4	73.8	70.1	76.9
75	72.6	76.5	71.3	75.9

1.2 试验设计

本试验降雨强度设置为 50,75 mm/h,坡度设置为 5°,10°,15°,20°,共 8 个处理。每次试验开始前 12 h 在坡面上用 25 mm/h 雨强进行预降雨,直到坡面产生径流为止,以消除前期含水量不同给试验结果带来的影响。为消除风的影响,试验处理在下午 6:00 进行。

降雨开始后,记录降雨时间。坡面产流时间以坡面径流汇流至 PVC 管出口处为准,开始记录产流时间。产流开始后不等间距采样,即产流后 0~1,5~6,10~11,15~16,20~21,25~26,30~31,40~41 min 采集径流样。停止降雨 1 min 后最后一次采样,记录坡面停止产流的时间,结束降雨试验。用小径流桶收集样品,其余样品用大径流桶收集,测定径流体积。在降雨过程中,用小铲子不断在石槽中轻轻搅动,以保证坡面产生的径流和泥沙尽可能地都进入径流桶中。

1.3 样品处理

模拟降雨结束后测定径流体积,然后充分搅匀径流小桶取 500 mL 水沙混合样装入塑料瓶。待样品

沉淀完全后,取上层清液 300 mL 装于塑料瓶,置于 4 ℃ 冰箱柜内冷藏用于化学分析。桶中剩余的泥沙风干取样装入密封袋中,同样存于冰箱用于化学分析。将取好的 500 mL 样品中的泥沙从水中分离,在烘箱中烘干称重。测定径流和泥沙中养分含量时采用常规方法,径流中全氮采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定,全磷采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法测定;泥沙中全氮采用半微量凯式法测定,全磷采用钼蓝比色法测定^[17]。

2 结果与分析

2.1 降雨强度和坡度对坡面径流的影响

由表 2 可知,随着雨强的增加,同一坡面开始产流时间提前 2.75~4.79 min,产生径流所用时间减少了 43.8%~61.0%。这是由于降雨前各坡面土壤含水率较高,当雨强增大,降雨量迅速超出土壤入渗能力形成径流,导致产流时间提前。而坡度改变对入渗率影响不大,因此各坡面开始产流时间随雨强的增大整体提前。随着雨强的增大,同一坡度的坡面径流量明显增加,径流量增加了 12.53~15.80 mm/m²,增加幅度在 1.24~1.31 倍。从产生径流开始,径流强度迅速增大,之后增长趋势减慢,且随着降雨强度的增加,坡面径流强度明显增大(图 1),这主要是由于雨强增大,加强了雨滴动能,加速破坏了坡面土壤结构,同时土壤颗粒间的空隙被逐渐填满,降低了水分入渗,使大部分降雨形成了径流^[6,18]。在 50 mm/h

雨强条件下,只有 10° 坡在降雨期间达到稳定,且持续时间较短。在 75 mm/h 雨强条件下,达到稳定的坡面明显增多,除 20° 坡外,其他坡面均达到了稳定,稳定时间增长。表明随着雨强的增加,径流强度保持稳定时间增加。

表 2 模拟降雨下径流量和侵蚀量特征

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	开始产流 时间/min	径流量/ (mm·m ⁻²)	侵蚀量/ (kg·m ⁻²)
50	5	8.57	12.36	0.61
	10	6.17	11.96	1.12
	15	6.28	10.59	2.24
	20	7.70	9.51	0.86
	5	3.78	28.16	1.08
75	10	2.93	26.77	2.04
	15	3.53	23.74	5.85
	20	3.00	22.04	3.35

随着坡度的增大,坡面开始产流时间提前,且 50 mm/h 雨强条件下提前趋势较 75 mm/h 明显。径流量随着坡度的增加无明显变化,总量基本相同。有研究^[19]表明,裸坡坡面径流量的变化并不明显。坡度的增加虽然在降雨前期加快了坡面汇流,但是坡度的增大导致实际承雨面积减小^[20],因此,坡面径流量随着坡度增加基本保持不变。径流强度是研究坡面径流过程重要指标,通过比较不同坡度坡面的径流强度(图 1)发现,2 种降雨强度下,5° 坡径流强度均为最大,10° 和 15° 坡居中,20° 坡面最小。

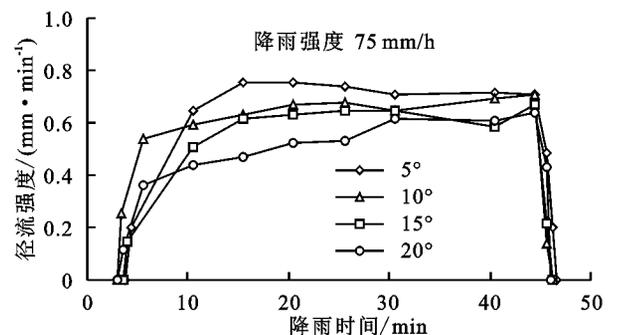
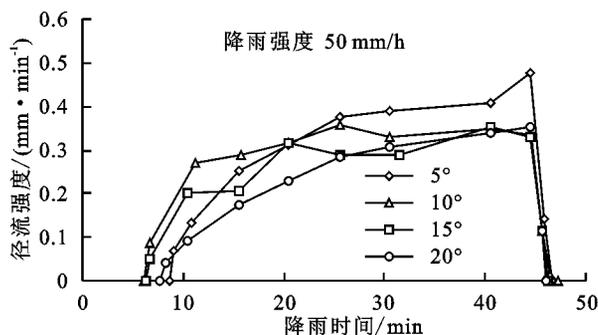


图 1 坡面径流强度随降雨时间的变化过程

2.2 降雨强度和坡度对坡面侵蚀的影响

由表 2 可知,随着雨强的增大,各坡面侵蚀量均显著增大。同一坡度的坡面产沙量增加了 0.47~3.61 kg/m²,增加幅度为 0.77~2.90 倍。坡度从 5° 增大到 20°,坡面产沙量增加幅度依次增大,表明降雨强度对坡面侵蚀的影响受坡度大小的影响。降雨开始后各坡面侵蚀强度迅速上升,整个降雨过程中侵蚀强度一直上下波动,到降雨结束还没有达到稳定(图 2)。而且雨强越大,坡面侵蚀越严重,产沙量越大,从而引起侵蚀强度上下波动也越大。

随着坡度的增加,坡面侵蚀量在 2 种雨强下均呈

先增加后减小的变化趋势,15° 时坡面侵蚀量最大。坡度对坡面侵蚀存在 2 种相反的作用^[20]:一方面,坡度增大,加速了坡面的径流流速,增强了水势动能,同时坡面土壤重力沿斜坡的分力增大,抗蚀性降低,易被径流携带搬运;另一方面,坡度增大,坡面承雨面积减小,实际降雨量减小,使得坡面承受的侵蚀强度减小,减缓了坡面泥沙的产生。在坡度增大过程中,对坡面侵蚀增强的作用大于减缓坡面侵蚀的作用,但当坡度增大到一定值时,坡度减缓坡面侵蚀的作用占据主导,此时随着坡度的增加,坡面泥沙量反而开始减小,这一坡度即为临界坡度。在本次试验中,相同雨

强条件下,15°坡的侵蚀强度最大。5°和10°坡的侵蚀强度随坡度的增加而增大,说明在这个坡度范围内,坡度的增加加剧了坡面侵蚀;20°坡的侵蚀强度小于15°坡,说明坡度在20°时,坡度的增加减缓了坡面侵

蚀。15°坡的侵蚀强度最大,但是坡度的增加是增强还是减弱了坡面侵蚀,两种反作用力哪个占主导作用并不能确定,因此在本次试验中,临界坡度在15°左右,这一临界坡度值还有待进一步研究。

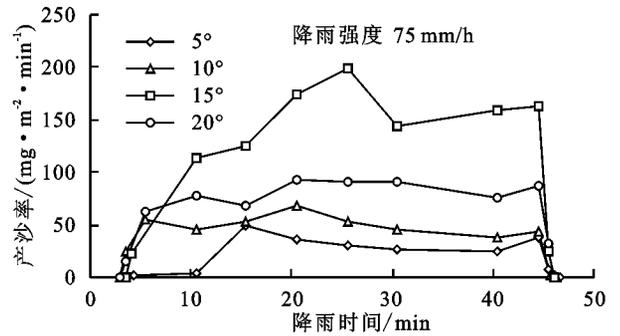
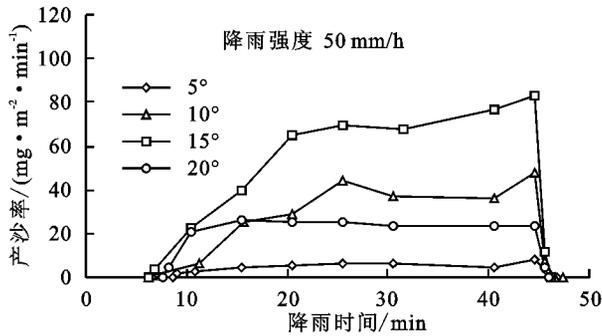


图 2 坡面产沙率随降雨时间的变化过程

2.3 降雨强度和坡度对氮磷流失的影响

2.3.1 坡面总氮流失特征 由表 3 可知,2 种雨强下各坡面单位面积径流总氮流失量在 6.02~12.79 g/m²,单位面积泥沙总氮流失量在 0.14~1.05 g/m²。相对于坡面径流总氮流失量,泥沙总氮流失量则明显较低,仅占径流总氮流失量的 1.4%~9.7%。由此可知,降雨过程中土壤中的氮素主要随径流流失为主。降雨强度从 50 mm/h 增大到 75 mm/h,各坡面随径流和泥沙流失的总氮量均增加。其中,各坡度坡面径流中总氮流失明显增加,增加了 1.31~5.68 g/m²;泥沙中总氮流失仅增加了 0.03~0.66 g/m²,说明雨强对泥沙总氮流失量的影响并不明显。随着坡度的增大,径流和泥沙中总氮流失量增大,当坡度为 15°时达到最大,当坡度为 20°时,总氮流失量减小,与侵蚀量的变化趋势相同。

表 3 坡面总氮流失量

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	径流总氮 流失量/ (g·m ⁻²)	泥沙总氮 流失量/ (g·m ⁻²)
50	5	6.50	0.14
	10	7.09	0.19
	15	7.51	0.39
	20	6.02	0.22
75	5	12.15	0.17
	10	12.77	0.46
	15	12.79	1.05
	20	7.33	0.71

为分析坡面总氮流失和径流、泥沙的关系,分别对径流和泥沙中氮素流失浓度与径流强度和侵蚀强度进行回归分析,经过比较,选择了相关系数最高的方程(图 3)。雨强和坡度影响着径流强度和侵蚀强度,从而对总氮流失浓度均有一定影响。由回归分析可知,径流总氮浓度和径流强度、泥沙总氮流失浓度和侵蚀强度分别呈显著的线性正相关关系。50,75

mm/h 雨强下,径流总氮流失浓度与径流强度的关系分别为 $y=0.558x+0.015$ ($R^2=0.711$)、 $y=0.385x+0.032$ ($R^2=0.562$);泥沙总氮流失浓度和产沙率的关系分别为 $y=0.146x+2.099$ ($R^2=0.862$)、 $y=0.176x+2.134$ ($R^2=0.893$)。当雨强由 50 mm/h 增大到 75 mm/h 时,径流总氮浓度和径流强度相关性方程的斜率和相关系数均减小,说明径流总氮流失浓度随径流强度增加的变化幅度减小,雨强增大对径流总氮流失浓度的影响减弱,但仍具有极显著的正效应。对于泥沙中流失的氮素而言,随着产沙率增加,泥沙总氮流失浓度和产沙率相关性方程的斜率和相关系数均增大。相关性方程的斜率越大表明变化速度越快,径流总氮流失浓度和径流强度的相关性方程中斜率为 0.558,0.385,泥沙总氮流失浓度和产沙率的相关性方程中斜率为 0.146,0.176,由此可知,径流总氮流失浓度随径流强度增长的速度明显远大于泥沙总氮流失浓度随侵蚀强度增长的速度。因此,径流总氮流失量受雨强的影响要高于泥沙总氮流失量。

2.3.2 坡面总磷流失特征 由表 4 可知,对于同一坡度的坡面来说,径流中总磷流失量远小于径流总氮流失量。因为磷易被土壤固定,而氮素容易被淋洗而被径流携带损失^[21]。随着雨强的增加,各坡度坡面径流总磷流失量增加了 2.3~3.9 倍,增长率高于径流中总氮流失量的增长率,但是流失总量远低于径流中单位面积总氮流失量,说明与磷素相比,氮素更易于被水体溶解和携带。泥沙总磷流失量与坡面泥沙流失量特征相同,在 15°时达到最大,当坡度为 20°时,总磷流失量减小。

相同降雨强度下,当坡度在 5°和 10°时,径流中总磷流失量大于泥沙中总磷流失量;当坡度增大为 15°和 20°时,径流中总磷流失量小于于泥沙中总磷流失量,这表明坡度较小时,磷素流失途径以径流流失为主,随着坡度的增加,磷素的流失途径以泥沙流失为主。

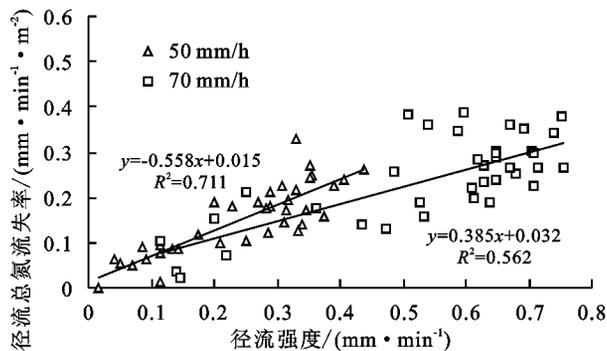


图 3 总氮流失浓度与径流强度和产沙率的关系

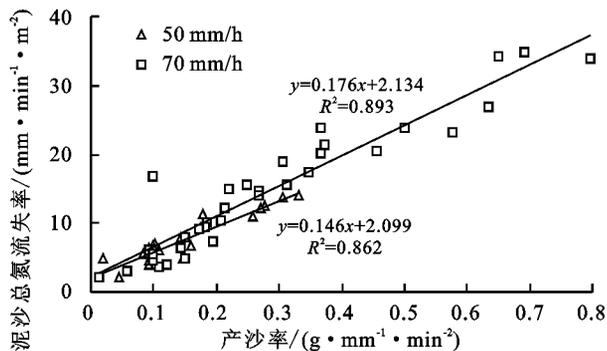


表 4 坡面总磷流失量

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	径流总磷 流失量/ (g·m ⁻²)	泥沙总磷 流失量/ (g·m ⁻²)
50	5	0.15	0.09
	10	0.30	0.19
	15	0.12	0.58
	20	0.16	0.26
75	5	0.54	0.26
	10	0.97	0.58
	15	0.54	1.51
	20	0.78	0.99

失浓度和侵蚀强度分别进行回归分析(图 4)。回归分析发现,径流总磷流失浓度和径流强度的关系比较复杂,各函数方程的相关系数均较低,相关系数最高为指数函数。50,75 mm/h 雨强下,径流总磷流失浓度与径流强度的关系分别为 $y=0.002e^{3.192x}$ ($R^2=0.147$)、 $y=0.002e^{2.731x}$ ($R^2=0.413$)。而泥沙总磷流失浓度和侵蚀强度呈显著的正相关关系;径流总氮流失浓度与径流强度的关系分别为 $y=0.259x-0.351$ ($R^2=0.962$)、 $y=0.255x+1.317$ ($R^2=0.940$)。由此可见,随着径流强度和侵蚀强度的增大,径流和泥沙中磷素流失浓度均逐渐增大,而且方程中径流中总磷流失浓度变化速度明显小于泥沙中总磷流失浓度。

径流中总磷流失浓度和径流强度、泥沙中总磷流

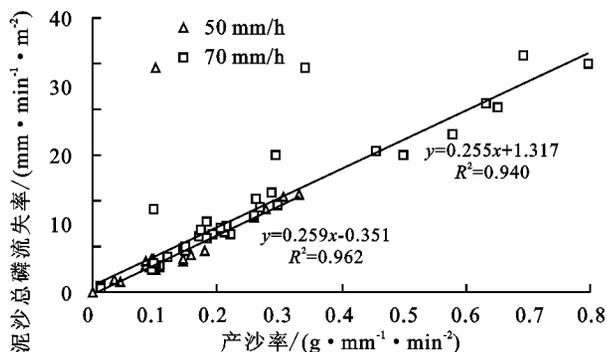
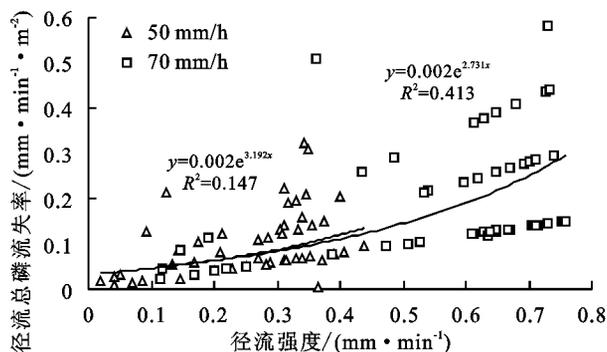


图 4 总磷流失浓度与径流强度和产沙率的关系

3 结论

(1)随着雨强的增加,同一坡面开始产流时间提前 2.75~4.79 min,产生径流所用时间减少了 43.8%~61.0%;径流量增加了 12.53~15.80 mm/m²,增加幅度在 1.24~1.31 倍;径流强度保持稳定时间增加。随着坡度的增大,径流量无明显变化,2 种降雨强度下,5°坡径流强度均为最大,10°和 15°坡居中,20°坡面最小。

(2)随着雨强的增大,各坡面侵蚀量均显著增大。同一坡度的坡面侵蚀量增加了 0.47~3.61 kg/m²,增加幅度为 0.77~2.90 倍。在本次试验中,随着坡度的增加,坡面侵蚀量在 2 种雨强下均呈增加后减小的变化趋势,15°时坡面侵蚀量最大,20°时减小,临界坡度在 15°左右。

(3)降雨过程中土壤中的氮素主要随径流流失为主。2 种雨强下各坡面单位面积径流总氮流失量在 6.02~

12.79 g/m²,单位面积泥沙总氮流失量在 0.14~1.05 g/m²。泥沙总氮流失量仅占径流总氮流失量的 1.4%~9.7%。径流总氮浓度和径流强度、泥沙总氮流失浓度和侵蚀强度分别呈显著的线性正相关关系。

(4)随着雨强的增加,各坡度坡面径流总磷流失量增加了 2.3~3.9 倍。相同降雨强度下,当坡度在 5°和 10°时,径流中总磷流失量大于泥沙中总磷流失量;当坡度增大为 15°和 20°时,径流中总磷流失量小于泥沙中总磷流失量。泥沙总磷流失浓度和侵蚀强度呈显著的正相关关系。

参考文献:

[1] 武彩萍,骆亚生,陈伟,等.降雨对黄土裸坡坡面形态影响的室内模型试验[J].水土保持通报,2013,33(1):115-119.
[2] 王晓燕,毕华兴,高路博,等.晋西黄土区不同空间尺度径流影响因子的辨析[J].西北农林科技大学学报(自然

- 科学版), 2014, 42(1): 159-166.
- [3] 张佳琪, 王红, 张瑞芳, 等. 雨强对片麻岩坡面径流养分流失规律的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 42-45, 51.
- [4] 罗春燕, 涂仕华, 庞良玉, 等. 降雨强度对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 24-27.
- [5] 孔刚, 王全九, 樊军. 坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 14-18.
- [6] 葛金金, 杨加智, 詹美礼, 等. 坡度与降雨强度对坡面侵蚀产沙过程影响的试验研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(2): 101-104.
- [7] 谭贞学, 王占礼, 王莎, 等. 黄土坡面细沟侵蚀过程[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 1-5.
- [8] 耿晓东, 郑粉莉, 张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 5-11.
- [9] 张兴奇, 顾礼彬, 张科利. 坡度对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 18-22.
- [10] Shigaki F, Sharpley A, Prochnow L I. Rainfall intensity and phosphorus source effects on phosphorus transport in surface runoff from soil trays [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373(1): 334-343.
- [11] 傅涛, 倪九派, 魏朝富. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 71-74.
- [12] 张佳琪, 王红, 代肖, 等. 坡度对片麻岩坡面土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 1-5.
- (上接第 84 页)
- [9] 潘成忠, 马岚, 上官周平. 含沙量对草地坡面径流泥沙沉积和水力特性的影响[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 857-862.
- [10] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 125-134.
- [11] 王雪松, 谢永生, 陈曦, 等. 模拟降雨条件下工程堆积体产流产沙特征研究[J]. 泥沙研究, 2015(4): 74-80.
- [12] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 坡面水流速度与坡面含沙量的关系[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 73-78.
- [13] 盛贺伟, 孙莉英, 蔡强国. 黄土坡面片蚀过程稳定含沙量及其影响因素[J]. 地理科学进展, 2016, 35(8): 1008-1016.
- [14] 李浩宏, 王占礼, 申楠, 等. 黄土坡面片蚀水流含沙量变化过程试验研究[J]. 中国水土保持, 2015(3): 46-49.
- [15] 韩建刚, 李占斌. 紫色土区小流域泥沙输出过程对雨型和空间尺度的响应[J]. 水利学报, 2006, 37(1): 58-62.
- [16] 徐震, 高建恩, 赵春红, 等. 雨滴击溅对坡面径流输沙的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 20-23.
- [17] 高佩玲, 雷廷武, 赵军, 等. 坡面侵蚀中径流含沙量测量方法研究与展望[J]. 泥沙研究, 2004(5): 28-33.
- [18] 王辉, 雷廷武, 赵军. 坡面径流量与含沙量动态测量系统[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 79-82.
- [19] 曾为军, 张云伟, 陈岭, 等. 基于计时与光照法的坡面径流量及含沙量动态检测系统[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 114-123.
- [13] 袁兴程, 钱新, 庞宗强, 等. 不同土地利用方式土壤表层氮、磷流失特征研究[J]. 环境化学, 2011, 30(9): 1657-1662.
- [14] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2151-2158.
- [15] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 176-182.
- [16] 刘忠良, 宇万太, 周桦, 等. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J]. 土壤, 2011, 43(5): 681-690.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[J]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 刘战东, 高阳, 段爱旺, 等. 麦田降雨产流过程的影响因素[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 38-44.
- [19] 蒋荣, 张兴奇, 季启芳, 等. 坡度和雨强对喀斯特地区坡面产流产沙的影响[J]. 环境保护科学, 2012, 38(5): 13-17.
- [20] 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 147-154, 182.
- [21] Mark A S, Clare M H, Jan W E, et al. The european nitrogen assessment: Sources, effect and policy perspectives [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 345-376.
- [20] 曹建生, 张万军. 小流域径流泥沙自动采集器的试验研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 45-49.
- [21] 叶芝菡, 刘宝元, 路炳军, 等. 径流小区集流桶含沙量全深剖面采样器的研制与试验[J]. 泥沙研究, 2005(2): 24-29.
- [22] 黄启厅, 史舟, 潘桂颖, 等. 沙质土壤热红外高光谱特征及其含沙量预测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2195-2199.
- [23] 尚佰晓, 王莉, 王瑄, 等. 坡面土壤剥蚀率及其与水流含沙量的关系研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 28-31.
- [24] 和继军, 孙莉英, 李君兰, 等. 缓坡面细沟发育过程及水沙关系的室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 138-144.
- [25] 肖培青, 郑粉莉, 姚文艺. 坡沟系统侵蚀产沙及其耦合关系研究[J]. 泥沙研究, 2007(2): 30-35.
- [26] 郑粉莉, 高学田. 坡面汇流汇沙与侵蚀—搬运—沉积过程[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 134-137, 139.
- [27] 汪晓勇, 郑粉莉, 张新和. 上方汇流对黄土坡面侵蚀—搬运过程的影响[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 7-11.
- [28] 张锐波, 张丽萍, 付兴涛. 坡面侵蚀产沙与水力学特征参数关系模拟[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 81-86.
- [29] 韩其为, 何明民. 泥沙起动规律及起动流速[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [30] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [31] 姚文艺, 汤立群. 水力侵蚀产沙过程及模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001.