

模拟降雨下不同坡度土壤坡面产流产沙特征及磷和钾素流失研究

陈 诚¹, 郝治邦²

(1. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475003; 2. 河北省子牙河河务管理处, 河北 衡水 053000)

摘 要:采用室内模拟降雨研究了不同坡度对土壤坡面产流产沙特征及其养分流失的影响。结果表明:在降雨条件下,初始产流时间随坡度的增加而趋于提前,初始产流时间变化范围为 0.63~1.62 min,说明坡面产流时间因坡面坡度的增加而缩短。不同坡度条件下径流强度随降雨历时的增加而增加,在降雨历时前 20 min,径流强度急剧增加,降雨历时 20 min 以后,径流强度增加趋势趋于平稳,径流强度遵循幂函数变化规律;不同坡度条件下入渗强度随降雨历时的增加而降低,在降雨历时前 20 min,入渗强度急剧降低,降雨历时 20 min 以后,入渗强度降低趋势趋于平稳,坡面入渗强度随时间则呈对数函数变化。不同坡度下径流量均随降雨历时呈“增加—稳定”趋势(单峰曲线,抛物线规律),在整个降雨过程中,径流量随坡度的增加而增加,在 0~20 min 内,径流量随降雨历时的增加陡然上升趋势,20~40 min,不同坡度条件下土壤泥沙侵蚀量均达到最大值,40 min 以后泥沙侵蚀量随降雨历时的增加呈现基本平稳趋势,泥沙侵蚀量中 DP, K⁺, SEP 和 SEK 均随着坡度的增加而增加。不同坡度条件下,泥沙量与侵蚀泥沙中养分的含量均存在不同程度的正相关关系,其中坡面坡度为 20°, 25° 和 30° 时,侵蚀泥沙养分含量与泥沙流失量间的相关性明显优于其他坡度,说明侵蚀泥沙量的增加会引起泥沙中各种类养分含量的增加效应,而随着坡度的增加,侵蚀泥沙量与侵蚀泥沙中养分的含量并非均显示出更进一步的相关性。

关键词:模拟降雨; 土壤坡度; 产流产沙; 养分流失

中图分类号: S157.1; X14

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)02-0070-07

Research on Slope Runoff, Sediment and P and K Loss Characteristics on Slopes with Different Gradients Under Artificial Simulation of Rainfall

CHEN Cheng¹, HAO Zhibang²

(1. Yellow River Conservancy Institute, Kaifeng, He'nan 475004, China;

2. River Management Office of Ziya River in Hebei Province, Hengshui, Hebei 053000, China)

Abstract: Simulated rainfall experiments were conducted to investigate the effect of slope gradients on characteristics of runoff, sediment and nutrient losses. The results showed that the runoff occurring times shortened with the increase of slope gradients, and the initial runoff time ranged from 0.63 minute to 1.62 minutes, which indicated that the runoff time shortened with the increase of slope gradients. For the different slope gradients, the runoff intensity increased with the increase of rainfall time, which tended to be stable after 20 minute rainfall and followed the power function, while the average infiltration rate decreased with the increase of rainfall time, which tended to be stable after 20 minute rainfall and followed the logarithmic function. Sediment yields on slope increased with the increase of slope gradients, in 0~20 minutes, the sediment yields on the slope increased with the increase of rainfall time, which were the highest during 20~40 minutes, and tended to be stable after 40 minutes. The contents of DP, K⁺, SEP and SEK increased with the increase of rainfall time. There were the varying degrees of positive correlation between sediment yields and nutrient contents on the slope, and the correlation coefficients in the slope gradients of 20°, 25° and 30° were much higher than those in the slope gradients of 5°, 10° and 15°, which implied that sediment yield on the slope could cause the increase of various kinds of nutrients, while sediment yields and nutrient contents on the slope had no further

correlation with the increase of slope gradient.

Keywords:artificial simulation of rainfall; slope gradient; runoff and sediment; nutrient loss

水土流失是地表物质在降雨、径流、风、冻融等外营力驱动下发生位移与再分配的一种自然过程,主要包括侵蚀、剥离、搬运、沉积等环节^[1-2]。土壤坡面水土流失是坡地表层土壤与降雨、径流相互分散、剥离和搬运的复杂的物理化学过程,也是大量营养元素流失的过程,受降雨特性、产流排水率、径流泥沙浓度等因素的影响^[3-4]。在 20 世纪初期,国内外对于土壤侵蚀的研究多限于侵蚀过程中的产流产沙动态变化和机理分析,而忽略了由此带来的养分流失问题^[4]。土壤侵蚀使得土壤肥力下降,理化性质变劣,土地利用效率降低,生态环境恶化,已成为制约地区社会发展的重要因素。

在降雨条件下,水土流失实质是坡地表层土壤与降雨、径流相互作用的一系列复杂的物理化学过程,受到降雨和土壤特性等因素影响,水土流失产生的泥沙流失量主要受产流排水率、径流泥沙浓度的影响,而产流排水率、径流泥沙浓度主要与受侵蚀土壤的机械组成及降雨强度有关,导致强降雨极易造成土壤坡面水土和养分流失等^[5]。流失的泥沙具有富集养分的特点,与受侵蚀土壤的初始养分含量相比,流失泥沙的养分含量一般较高,这种现象称为泥沙富集效应^[6]。在降雨背景下,雨水在土壤剖面主要以入渗和径流两种方式进行转移,当雨水入渗量超过土壤最大蓄水量时,则径流产生;土壤表层易受降雨冲刷侵蚀

的影响,径流随后发展为泥沙流失,进而引起水土流失^[7];另一方面导致土壤肥力下降,土地生产力降低,破坏土地资源,在强烈的人为干扰下,水土流失过程进一步加剧,从而引发了各种各样的资源与环境问题^[7]。降雨条件下土壤养分流失是导致土壤质量退化的重要原因,坡度是影响坡面土壤侵蚀的主要地形因子,但由于坡度与坡面侵蚀关系的复杂性,使坡度对土壤侵蚀的影响规律存在一定的不确定性,而坡度与坡面侵蚀关系的复杂性和不确定性一定程度上也限制了坡面水土保持措施的有效实施^[6-7]。因此,如何增加降雨入渗、合理高效利用水资源和减少水土流失、防治坡地水土流失,减少养分损失,生态环境建设和农业可持续发展的关键。因此,本文采用人工模拟降雨试验,研究不同坡度对土壤坡面产流产沙特征及其养分流失的影响,旨在揭示土壤养分随地表径流迁移机制和坡面的流失发生规律,能够发展有效的区域水土养分流失控制方法,为水土保持、土壤侵蚀与防治提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置及设计

试验土壤取自河南省开封市黄河水利职业技术学院的野外试验田,供试土样为典型红壤(表层 0—20 cm),其基本性质见表 1。

表 1 供试土壤基本性质

机械组成/%			pH 值	有机质/	全氮/	全磷/	全钾/	速效磷/	碱解氮/	有效钾/
2~0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm		%	(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)
3.12	75.13	19.56	6.23	16.85	1.14	0.82	18.54	43.15	19.74	3.57

试验于 2015 年 5—9 月在黄河水利职业技术学院试验基地的降雨大厅进行,人工模拟降雨装置为西安清远测控技术有限公司生产及安装的人工模拟降雨装置(QYJY-503C)。划分为 6 个降雨区域,其装置包括降雨系统和供水系统两部分,降雨系统由多个单一降雨支架组成,降雨支架主要包括侧式喷头、喷头支架和压力控制部分,降雨喷头由喷头体、碎流挡板、出流孔板等部分组成。喷头安装在由三角架固定的降雨支架上,该装置由 4 组单喷头对喷(各个方向均能喷到),喷头出水高度 6 m,喷头高 3 m,降雨雨滴终点速度近似天然降雨速度。供水压力由压力表控制,雨强主要通过孔板的孔径来调节,孔径 3~13 mm,可控制雨强 40~170 mm/h,雨滴直径和雨滴分布与天然降雨相似,降雨均匀度大于 90%,采用多个

雨量筒现场实际测量降雨强度,满足人工模拟降雨试验的要求。

在参考前人研究的基础上,试验设置 6 个坡度(5°,10°,15°,20°,25°和 30°)共 6 组试验(表 2),降雨强度设置为 70 mm/h,每组试验均设 3 组平行,以保证试验的准确性,共进行了 15 次人工模拟降雨试验,每次试验前采用 TDR 测定土壤水分,以保证土壤前期含水率基本一致。前期降雨 24 h 后进行降雨强度为 60 mm/h 的模拟降雨,降雨直至坡面即将发生产流为止,然后用塑料布覆盖并静置,使水分自由运动下渗以接近自然状态下土壤水分分布状况,同时又能保证各场次降雨的前期土壤含水率基本一致。每场试验前对降雨强度进行两次率定,并且两次的误差不超过 5%,以确保降雨的强度和均匀度达到试验要求。降雨历时

均设定为 90 min。降雨开始后用秒表计时并记录初始产流时间,同时观察坡面侵蚀过程。开始产流后的前 10 min 每 3 min 取 1 次径流泥沙样,30~90 min 每 5 min 取 1 次径流泥沙样,用量筒测量径流体积,将径流泥沙样静置 12 h 后倒掉上层清液,降雨结束后,用烘干法求得泥沙重,并由浑水径流减去换算得到的泥沙体积,即得坡面由降雨转化为径流的水量^[8]。

表 2 试验设计

坡度/(°)	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨历时 /min	平行 次数
5	70	90	3
10	70	90	3
15	70	90	3
20	70	90	3
25	70	90	3
30	70	90	3

1.2 样品测定

根据水量平衡原理,坡面降雨水量转化分为入渗、蒸发和径流 3 个过程,由于试验在室内进行且时间较短,蒸发损失的水量可以忽略。考虑到地表径流包含了泥沙,所以计算地表产流率要减去泥沙的体积。则径流量和入渗量之和近似等于坡面降雨量,其中坡面平均入渗率利用如下公式计算得出^[8]:

每次降雨时在小区内均匀布置八个雨量筒,用以测定降雨量及降雨均匀系数,进而对雨强进行率定。

称量每个桶的径流泥沙总量,放置澄清后倒掉上部清液,待水分蒸发完全测定泥沙量,径流泥沙总量减去泥沙重即为径流量。

降雨开始后即计时;记录开始产流时间,用塑料桶收集径流,间隔一定时间(根据流量大小调整)更换塑料桶;降雨结束后记录降雨历时及结束。

待桶内径流放置澄清后,根据降雨历时分时段采集桶内径流样,同样采集泥沙风干样。径流样上清液过滤后,放入冰箱中低温保存(2~3℃)。

根据水量平衡原理,坡面降雨水量转化分为入渗、蒸发和径流 3 个过程,考虑到地表径流包含了泥沙,所以计算地表产流率要减去泥沙的体积。则径流量和入渗量之和近似等于坡面降雨量,其中坡面平均入渗强度利用如下公式计算得出^[9]:

$$I = (Pt \cos \alpha - 10 R/S)/t$$

式中: I 为坡面平均入渗率(mm/min); P 为降雨强度(mm/min); α 为地表坡度(°); R 为降雨时间 t 内产生的径流量(ml); S 为坡面实际承雨面积(cm²); t 为降雨时间(min)。

每个小区收集的泥沙运回实验室,风干后除去肉眼可见的碎石、植物残体等杂质,自然风干(20 d)去

除碎片和部分根后过 2 mm 筛,径流样溶解态磷(DP)浓度采用钼蓝比色法测定,径流样钾离子(K⁺)浓度采用原子吸收分光光度计测定;泥沙样品中泥沙浸提态磷(SEP)含量采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提,钼锑抗比色法测定;泥沙浸提态钾(SEK)含量采用 1 mol/L 中性醋酸铵溶液浸提,原子吸收分光光度计测定。

1.3 数据处理

Excel 2003 进行数据处理与分析,SPSS 18.0 做回归分析和统计检验,由原始数据拟合得到的回归关系经统计学检验得到最佳拟合度参数 R^2 ,并在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平检验相关系数的显著性。

2 结果与分析

2.1 模拟降雨条件下坡度对初始产流时间的影响

产流时间是指从开始进行降雨到径流小区中径流出现并开始从集流槽流入集水池所经历的时间历时,是衡量侵蚀产流过程的一个重要方面^[8]。降雨是坡面侵蚀的源动力,次降雨是否产生径流以及径流量的大小与产流时间关系密切,而径流量决定了对坡面土壤冲刷侵蚀的能力^[8]。降雨产生径流和径流量与起始产流时间关系密切相关,在土壤类型和前期含水量等因素一致的条件下,坡度和降雨强度会影响其初始产流时间。由图 1 可知,在降雨强度下,初始产流时间随坡度的增加而趋于提前,初始产流时间变化范围 0.63~1.62 min,说明坡面产流时间因坡面坡度的增加而缩短。各坡度间的产流时刻值相差较大,之所以出现径流小区模拟降雨条件下产流时间随坡度的增大而提前是由于:降雨强度下土壤母质、土壤前期含水量等要素一致时,坡面坡度越大,降水入渗机会越少,降雨入渗损失越小,径流沿坡面方向的运动速度越快,雨滴在坡面迅速汇集,产流时间整体提前,这与前人的研究结果一致^[6-7,9]。

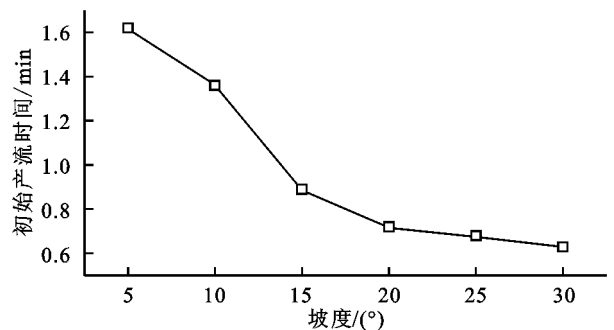
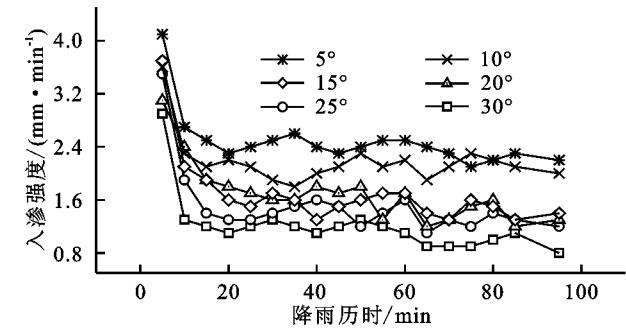


图 1 模拟降雨条件下坡度对初始产流时间的影响

2.2 模拟降雨条件下坡度对产沙产流的影响

研究结果发现,在坡面产流一段时间后坡面流量基本达到稳定,相应入渗也趋于稳定,对该时刻起至降雨过程结束止的各个时刻的径流强度和入渗率求平均值,作为该坡面的径流强度和稳定入渗率。图 2

反映了土壤坡面平均入渗强度在降雨过程中的变化过程,即降雨初始,坡面具有较大的入渗强度,随着降雨的持续发生,坡面入渗强度逐渐减小,最终趋于稳定,不同坡度条件下径流强度增加趋势基本相一致,不同坡度条件下径流强度随降雨历时的增加而增加,在降雨历时前 20 min,径流强度急剧增加,降雨历时 20 min 以后,径流强度增加趋势趋于平稳,径流强度随坡度的增加而逐渐增加。这可能与降雨过程中土壤的侵蚀发展过程及地表结皮有关:降雨初期,坡面受到的侵蚀作用较小,土壤结构的破坏程度较小,土壤入渗能力较强,随着降雨的持续发生,雨滴直接击打在土壤表层颗粒上,土壤颗粒分散、压实后容易形成结构性结皮;由于降雨前期坡面径流量小,径流流速慢,土壤颗粒与径流有充分的作用时间,被雨滴溅蚀分散的细小土壤颗粒更易于随水分入渗而淋入下层土壤,形成沉积结皮,以上两个过程促进了坡面结皮的发育,土壤透水能力降低,土壤不能充分吸收水分,而使大量雨水变为地表径流,降低了土壤入渗强度^[8]。此外,坡



面径流在降雨、土壤前期含水量、地表覆盖等基本相同条件下,要受地表坡度决定的承雨量大小所控制,同时在降雨过程中也受到雨滴能量、坡面水流入渗和坡面侵蚀状况等因素的影响^[5,8]。水分入渗受到土壤渗透性能控制,随降雨进行,土壤含水率逐渐增大,实际入渗强度随降雨过程的进行而逐步下降,径流强度逐步增大,在坡面产流一段时间后坡面径流量基本达到稳定,相应入渗强度也趋于稳定,坡度对坡面平均入渗强度的影响则表现为平均入渗强度随坡度的增加而增加,不同坡度条件下入渗强度变化趋势基本相一致,不同坡度条件下入渗强度随降雨历时的增加而降低,在降雨历时前 20 min,入渗强度急剧降低,降雨历时 20 min 以后,入渗强度降低趋势趋于平稳,径流强度随坡度的增加而逐渐增加,坡度越小,其平均入渗强度差值越小;这主要是由于坡度增大,坡面径流在顺坡方向重力的分力逐渐增大,导致径流流速加快,缩短了降雨与坡面的作用时间,降雨入渗机会减小,而 25°与 30°坡面平均入渗强度曲线接近,可能是因为在 25°和 30°间存在临界坡度的关系。

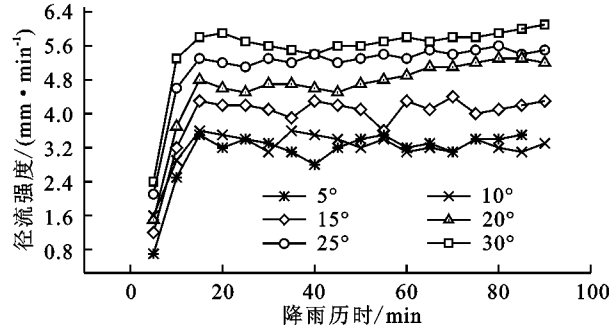


图 2 模拟降雨条件下坡度对产沙产流的影响

通过 SPSS 曲线拟合,对土壤坡面径流强度和坡面入渗强度随降雨历时的变化关系作函数拟合,筛选出 R^2 最大(最佳拟合度及调整 R^2)和 p 值(显著性)最小的曲

线组合,并在此基础上检验其 F 值和差异显著性($p < 0.05$),由表 3 可知,结果发现径流强度遵循幂函数变化规律,而坡面入渗强度随时间则呈对数函数变化。

表 3 径流强度和入渗强度与降雨历时的关系

项目	y	拟合方程	R^2	调整 R^2	p 值	F 值
径流强度	5°	$y=0.9228x^{0.3216}$	0.5698	0.48533	$<0.05^*$	56.38
	10°	$y=1.9929x^{0.1269}$	0.4857	0.31952	$<0.05^*$	61.34
	15°	$y=1.4947x^{0.2576}$	0.5614	0.48039	$<0.01^{**}$	59.78
	20°	$y=1.6046x^{0.2834}$	0.7102	0.62956	$<0.01^{**}$	83.25
	25°	$y=0.514x^{4.102}$	0.6587	0.54586	$<0.01^{**}$	71.36
	30°	$y=2.8389x^{0.1794}$	0.6104	0.48046	$<0.05^*$	72.95
入渗强度	5°	$y=-0.4270\ln(x)+2.7573$	0.6978	0.58615	$<0.01^{**}$	92.36
	10°	$y=-0.4880\ln(x)+3.2791$	0.6524	0.54598	$<0.01^{**}$	102.37
	15°	$y=-0.5079\ln(x)+3.5402$	0.8697	0.79676	$<0.01^{**}$	98.41
	20°	$y=-0.5370\ln(x)+3.6407$	0.7385	0.63376	$<0.01^{**}$	85.37
	25°	$y=-0.2893\ln(x)+3.3247$	0.4023	0.37434	$<0.05^*$	112.68
	30°	$y=-0.4103\ln(x)+3.9746$	0.6751	0.59027	$<0.01^{**}$	103.47

注: ** 表示 $p < 0.01$ 水平显著; * 表示 $p < 0.05$ 水平显著,下同。

2.3 模拟降雨对条件下坡度对土壤侵蚀量的影响

降雨强度和坡度变化对坡面降雨的入渗过程和土

壤稳定性都有较大影响,最终影响到坡面降雨和径流的侵蚀能力,这主要反映在坡面的侵蚀产沙量上,坡面

土壤颗粒随径流的迁移、损失是坡面侵蚀的主要方式,侵蚀泥沙量的变化是坡面土壤、降雨特性、地形因子等诸多因素的综合反映,不同坡度下坡面承载的降雨侵蚀力不同^[10]。因此,侵蚀泥沙量呈现出非线性的变化特征。由图 3 可知,不同坡度下径流量均随降雨历时呈“增加—稳定”趋势(单峰曲线),且在整个降雨过程中,径流量随坡度的增加而增加,在 0~20 min 内,径流量随降雨历时的增加陡然上升趋势,并且在 0~20 min 内的径流量差异并不大,也即降雨初始时刻,坡度对径流量的影响比较小,而在降雨后期,坡度对径流量的影响较大;20~40 min,不同坡度条件下土壤泥沙侵蚀量均达到最大值,40 min 以后泥沙侵蚀量随降雨历时的增加呈现基本平稳趋势。综合比较可知,可能是因为土壤、降雨等影响坡面侵蚀发展的因子控制一定的情况下,坡面变化对坡面侵蚀程度的贡献率增大,坡度增大,坡面入渗强度降低,径流量增加,径流流速增大,径流对土壤颗粒的侵她力和冲刷力增强,对坡面土壤颗粒的携带力变大,因此坡度增大时径流中泥沙含量峰值出现了增大趋势,产生峰值的时间比较早(峰值均在 10 min 左右产生)。侵蚀泥沙量在不同坡度下的差异变化说明坡度对坡面泥沙流失有重要影

响。相同雨强条件下,坡度越大,雨水在坡面停留的时间越短,缩短了径流的入渗时段,降雨入渗量变少,径流量增大,同时坡面径流流速加大,径流动能增强,大的水流流速与大的径流量组合,使坡面径流侵蚀能力增强,径流对土壤颗粒的分散作用及冲刷搬运能力增强^[11];另外,坡度越大,土壤的稳定性越低,土壤可蚀性增强,为径流搬运泥沙提供丰富的物质来源。因此,坡度越陡,坡面泥沙流失越多^[11]。

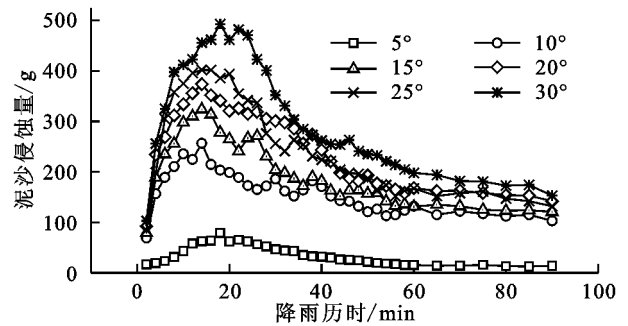


图 3 模拟降雨对条件下坡度对土壤侵蚀量的影响

在分析不同坡度条件下侵蚀泥沙量与产流历程的关系,并拟合不同坡度下侵蚀泥沙量与产流历时的回归方程,见表 4,由表可知,总体上不同坡度下的侵蚀泥沙量与产流历时均呈抛物线规律变化($y=ax^2+bx+c$)。

表 4 不同坡度条件下泥沙量与产流历时回归模型

坡度	拟合方程	R^2	调整 R^2	p 值	F 值
5°	$y=-0.0061x^2+0.0166x+46.021$	0.5237	0.4410	$<0.05^*$	89.36
15°	$y=-0.0023x^2-1.732x+265.02$	0.5984	0.5041	$<0.01^{**}$	102.77
20°	$y=-0.0177x^2-0.7589x+306.56$	0.6123	0.5194	$<0.01^{**}$	113.54
25°	$y=-0.0086x^2-1.999x+339.51$	0.5871	0.4970	$<0.01^{**}$	98.73
30°	$y=-0.0280x^2-0.7491x+385.32$	0.5739	0.4929	$<0.01^{**}$	98.73

2.4 模拟降雨对条件下坡度对泥沙 P 和 K 素流失的影响

土壤养分流失具有重要的生态学指示意义,降雨条件下土壤养分不但以溶解态形式随径流流失,而且泥沙流失也会携带大量颗粒态养分迁移出坡面,在这个过程中主要以溶解态和浸提态流失,而且泥沙流失也会携带大量颗粒态养分迁移出坡面^[8-9,11]。本研究采用土壤 DP, K^+ , SEP 和 SEK, 从不同坡度对土壤养分流失动态特征进行分析。由图 4 可知,土壤 DP, K^+ , SEP 和 SEK 均随着坡度的增加而增加,说明坡度越大,其土壤养分流失较为明显。随着坡度的增加,土壤 DP, K^+ , SEP 和 SEK 呈增加趋势,土壤 DP, K^+ , SEP 和 SEK 增加幅度逐渐增加。从养分流失过程来看,随着坡度的增加,钾素流失形式以浸提态为主,逐步被溶解态所取代,磷素始终以泥沙浸提态流失占优势,径流养分浓度曲线变化特征反映了土壤养分向径流释放的基本规律,这不仅与土壤坡度有关,

而且与养分离化性质关系密切。经计算可知, DP/SEP 的比值均小于 1,说明了土壤磷素主要随泥沙流失,坡度对磷素流失形态影响并不大。

2.5 侵蚀泥沙总体特征与侵蚀泥沙养分变化分析

不同坡度的坡面受到的雨滴击溅力以及径流对坡面的冲刷作用有一定的差异,最终影响到侵蚀泥沙含量以及侵蚀泥沙中各养分的含量^[8-9,11]。对不同坡度条件下产流过程中侵蚀泥沙含量与泥沙养分含量进行相关分析,由表 5 可知,侵蚀泥沙含量与泥沙养分含量相关分析结果表明:不同坡度条件下,泥沙量与侵蚀泥沙中养分的含量均存在不同程度的正相关关系,其中坡面坡度为 20°、25°和 30°时,侵蚀泥沙养分含量与泥沙流失量间的相关性(相关系数)明显优于坡度为 5°、10°和 15°时,这种相关关系说明侵蚀泥沙量的增加会引起泥沙中各种类养分含量不同程度的增加效应,主要是因为侵蚀泥沙携带着大量的颗粒态养分,侵蚀泥沙量的增大势必会导致吸附在泥沙颗

粒中的养分的增加,而不同养分在同一坡度条件下相关系数的差异性,可能是由于各养分在侵蚀泥沙中吸附的能力不同,从而有了养分含量与侵蚀泥沙量的相关关系的不同。而随着坡度的增大,侵蚀泥沙量与侵蚀泥沙中养分的含量并非均显示出更进一步的相关性,如 K^+ 浓度,坡度由 5° 提为 30° 时,侵蚀泥沙量与

其的相关关系反而降低,而坡度由 5° 提为 20° 时,SEK 与侵蚀量没有显著的相关关系 ($p>0.05$),坡度由 5° 提为 30° 时,DP 和 SEP 与侵蚀量的相关关系基本呈增加趋势。此外,侵蚀泥沙养分含量多少由多种因素共同作用(坡度、侵蚀泥沙量以及养分自身在土壤颗粒中的吸附特性)。

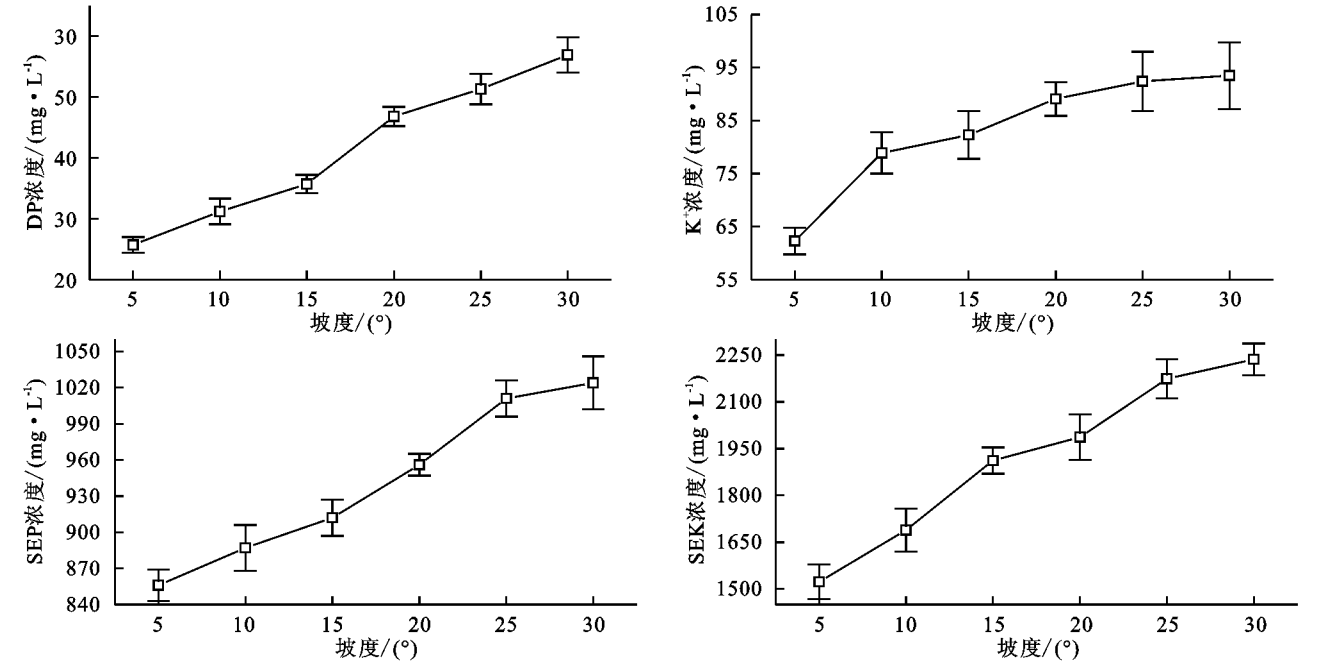


图 4 模拟降雨对条件下坡度对泥沙养分流失的影响

表 5 不同坡度条件下侵蚀泥沙量与泥沙养分流失量相关分析

坡度	DP		SEP		SEK		K ⁺ 浓度	
	偏相关系数	显著性	偏相关系数	显著性	偏相关系数	显著性	偏相关系数	显著性
5°	0.023	—	0.156	—	0.236	—	0.587	*
10°	0.156	—	0.106	—	0.056	—	0.709	**
15°	0.742	**	0.569	*	0.123	—	0.714	**
20°	0.623	*	0.702	**	0.058	—	0.236	—
25°	0.851	**	0.825	**	0.625	*	0.478	—
30°	0.843	**	0.779	**	0.569	*	0.369	—

3 讨论与结论

在降雨强度下,初始产流时间随坡度的增加而趋于提前,初始产流时间变化范围 0.63~1.62 min,说明坡面产流时间因坡面坡度的增加而缩短,土壤颗粒在坡面的迁移变化过程主要表现在土壤中团聚体和土壤机械组成的空间变化,土壤颗粒随降雨径流迁移出坡面进入径流槽则称为侵蚀泥沙,侵蚀泥沙的量即土壤侵蚀量,是评价土壤颗粒迁移的指标之一,也是土壤颗粒迁移的宏观表征^[12]。土壤颗粒侵蚀变化的衡量指标主要有侵蚀泥沙量、径流强度、径流系数等,其中径流强度是坡面侵蚀过程中径流量与产流时间的比值^[13]。研究结果发现,不同坡度条件下径流强度变化趋势基本相一致,坡面径流在降雨、土壤前期

含水量、地表覆盖等基本相同条件下,主要受地表坡度决定的承雨量大小所控制,同时在降雨过程中也受到雨滴能量、坡面水流入渗和坡面侵蚀状况等因素的影响,前期降雨后的土壤具有相对较高的含水量,坡面降雨入渗相对较弱,而水分的消散作用对土壤结构也造成一定程度的破坏,这些因素都导致土壤渗透能力进一步下降,从而使得径流强度随坡度增大而呈减小趋势。而平均入渗率随坡度的增大表现为先增大后减小趋势,这说明坡度对水分入渗有一定的促进作用,但是这种作用可能在一定的范围内成立^[12]。而坡度变化对降雨入渗过程的作用机理比较复杂:首先,稳定入渗水流的主要通道是土壤中较大的非毛管孔隙和部分毛管孔隙,雨滴动能随之增大,坡面水深增加,地表水层的压力和雨滴打击对入渗水体产生的

挤压力都相应增大;尤其是雨滴打击所产生的挤压力不仅可以加速入渗水流的运动速度,也可以使部分静止的毛管水加入入渗水流中^[12]。因此,降雨强度的增大可以起到增加土壤入渗的作用;其次,可能与土壤在降雨过程中的结皮形成机理及坡面侵蚀发展过程有关:当坡度较小时,雨滴的垂直下落对土壤表面施加打击力的角度比较大,容易形成结构性结皮;同时,由于坡面水流流速慢,被分散的细小颗粒更易随水分入渗而淋入下层土壤,形成沉积结皮^[14-15]。以上两个过程使得坡度小的坡面结皮层厚度和硬度都发育的比较完全,由此可以导致入渗率降低,坡面平均入渗率可能存在一个入渗量变化的临界坡度,对此还需通过更多野外和室内试验作进一步研究和验证。

坡度是影响坡面土壤侵蚀的主要地形因子,大量观测资料表明^[16-17],在我国主要水蚀区,土壤侵蚀量与坡度呈显著的正相关关系。坡面侵蚀量并不随着坡度的增长而持续增加,而是存在一个侵蚀量发生变化的临界坡度,由于试验方法和土壤性质的差异,不同研究得出的临界坡度差异较大。陈晓安等^[18]通过坡面流切应力、土壤的抗冲蚀能力、坡面流速等数据,理论推导得出土壤侵蚀的临界坡度在 $41.5^{\circ} \sim 50.0^{\circ}$;水建国等^[19]对浙江省红壤丘陵区坡耕地径流小区 1987—2000 年的观测数据进行分析发现,红壤坡地的土壤侵蚀量与坡度呈极显著的对数正相关,土壤坡度每增加 1 度,全年土壤侵蚀量将递增 120 t/km^2 。本研究中不同坡度下径流量均随降雨历时呈“增加—稳定”趋势(单峰曲线,抛物线规律),在整个降雨过程中,径流量随坡度的增加而增加,在 $0 \sim 20 \text{ min}$ 内,径流量随降雨历时的增加陡然上升趋势, $20 \sim 40 \text{ min}$,不同坡度条件下土壤泥沙侵蚀量均达到最大值, 40 min 以后泥沙侵蚀量随降雨历时的增加呈现基本平稳趋势,当坡度由 5° 增大到 30° 时,泥沙侵蚀量逐渐增加,并没有出现临界坡度,有可能在 30° 以上。随着坡度的增加,径流重力在斜坡方向上的分力增大从而加快了径流的速度,使击溅雨滴沿坡面向下落得更远,有利于增加径流,坡度愈大,坡面土体受到斜坡重力切向分力愈大,坡面上土体不稳定性愈大,在外力作用下发生下移的可能性变大,因此侵蚀产沙量变化总体趋势是随坡度增大而增大。

有研究指出模拟降雨对土壤养分的影响主要是通过降低土壤侵蚀和改变理化性质实现的,而模拟降雨对土壤养分的富集主要是其固定效应和保蓄效应综合作用的结果^[20-21]。结合本试验的研究结果来看,侵蚀泥沙养分含量在不同坡度下的整个产流过程中,侵蚀泥沙 DP, K^+ , SEP 和 SEK 含量随着坡度的增加

而增加。相关性分析可知,不同坡度条件下,泥沙量与侵蚀泥沙中养分的含量均存在不同程度的正相关关系,其中坡面坡度为 20° 、 25° 和 30° 时,侵蚀泥沙养分含量与泥沙流失量间的相关性明显优于其他坡度,说明侵蚀泥沙量的增加会引起泥沙中各种类养分含量的增加效应,而随着坡度的增加,侵蚀泥沙量与侵蚀泥沙中养分的含量并非均显示出更进一步的相关性。然而,模拟降雨与土壤溶质迁移关系的研究只是初步结果,模拟降雨对坡面侵蚀的影响较为复杂,模拟降雨对坡面土壤溶质向径流释放机理影响及其动力学机制还有待深入研究。

参考文献:

- [1] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 91-97.
- [2] 晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 169-175.
- [3] 郑世清, 王占礼, 陈文亮, 等. 坡地开垦对水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 55-56.
- [4] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 12-22.
- [5] Liu R, Wang J, Shi J, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468: 1069-1077.
- [6] Mardamootoo T, du Preez C C, Sharpley A N. Phosphorus mobilization from sugarcane soils in the tropical environment of Mauritius under simulated rainfall[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 103(1): 29-43.
- [7] Chege N J. Analysis of Runoff, Infiltration Rate, Sediment Release and Nutrient Drain From Four Vegetation Types in South Kinangop Forest, Nyandarua County [D]. Kenya: Kenyatta University, 2014.
- [8] Qian J, Zhang L P, Wang W Y, et al. Effects of vegetation cover and slope length on nitrogen and phosphorus loss from a sloping land under simulated rainfall[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2014, 23(3): 835-843.
- [9] Wallace C B, Burton M G, Hefner S G, et al. Effect of preceding rainfall on sediment, nutrients, and bacteria in runoff from biosolids and mineral fertilizer applied to a hayfield in a mountainous region[J]. Agricultural Water Management, 2013, 130: 113-118.
- [10] Liu Y J, Wang T W, Cai C F, et al. Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 485: 93-102.

草与其余三种措施间以及挂网植草与六角防护间均差异显著($p<0.05$),草皮防护与这两种措施均未达到显著水平;六角空心砖配合紫穗槐灌木和小火炬草本植被的护坡形式保水效果较好。

参考文献:

[1] 邓辅唐,吕小玲,喻正富,等.高速公路边坡植物群落的水土保持效应[J].中国水土保持,2007(5):43-46.

[2] 卓慕宁,李定强,郑煜基.高速公路生态护坡技术的水土保持效应研究[J].水土保持学报,2006,20(1):164-167.

[3] 骆汉,赵廷宁,彭贤锋,等.公路边坡绿化覆盖物水土保持效果试验研究[J].农业工程学报,2013,29(5):63-70.

[4] 周显广.公路边坡坡面防护效益研究[D].西安:长安大学,2011.

[5] 杨振.黑龙江公路路堑边坡水土保持措施效果研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2008.

[6] 答竹君,艾应伟,宋婷,等.道路边坡土壤水分空间和季节变异性分析[J].水土保持通报,2011,31(1):72-75.

[7] 任婷婷,王瑄,孙雪彤,等.不同土地利用方式土壤物理性质特征分析[J].水土保持学报,2014,28(2):123-126.

[8] 张庆,牛建明,韩芳,等.不同坡位植被分异及土壤效应:

以内蒙古短花针茅草原为例[J].植物生态学报,2011,35(11):1167-1181.

[9] Garten C T, Huston M A, Thoms C A. Topographic variation of soil nitrogen dynamics at Walker Branch Watershed, Tennessee[J]. Forest Science, 1994,40(3):497-512.

[10] 徐娟,余新晓,席彩云.北京十三陵不同林分枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2009,23(3):189-193.

[11] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等.森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J].水土保持学报,1998,4(2):23-28.

[12] 康艳萍,曲森.浅议公路土质边坡植树(紫穗槐)防护技术[J].黑龙江交通科技,2007,30(9):58-58.

[13] 卢鑫,周向睿,杜明新,等.不同年龄紫穗槐对沙化土壤的改良效应[J].草业科学,2013,30(07):994-1001.

[14] 李军健,吕刚,黄建国.紫色土旱坡地土壤水分时空分布特征[J].西南农业大学学报,2006,28(1):161-164.

[15] 张摇川.喀斯特坡面表层土壤含水量,容重和饱和导水率的空间变异特征[J].应用生态学报,2014,25(6):1585-1591.

[16] 胡伟,邵明安,王全九.黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J].水科学进展,2006,17(1):74-81.



(上接第 76 页)

[11] Ao C, Yang P, Ren S, et al. Efficacy of granular polyacrylamide on runoff, erosion and nitrogen loss at loess slope under rainfall simulation [J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(6):1-10.

[12] 王丽,王力,王全九.不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J].水土保持学报,2015,29(2):69-75.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 徐国策,李鹏,成玉婷,等.模拟降雨条件下丹江鸚鵡沟小流域坡面径流磷素流失特征[J].水土保持学报,2013,27(6):6-10.

[16] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.喀斯特坡地土壤地下侵蚀

模拟试验研究[J].水土保持学报,2015,29(6):7-13.

[17] 任秀文,李开明,刘爱萍,等.模拟降雨条件下红壤坡面硝态氮流失特征研究[J].中国环境科学,2013,33(2):119-124.

[18] 陈晓安,蔡强国,张利超,等.黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J].山地学报,2010,28(4):415-421.

[19] 水建国,柴锡周,张如良.红壤坡地不同生态模式水土流失规律的研究[J].水土保持学报,2001,15(2):33-36.

[20] 马广玉,李嘉薇,方青青,等.模拟降雨条件下典型土壤的可蚀性与养分流失特征[J].生态学杂志,2015,34(8):2267-2273.

[21] 郭新送,宋付朋,高杨,等.模拟降雨对 3 种类型土壤氮,磷素空间分布及其颗粒组成的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):41-45.