

不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程

王丽^{1,2}, 王力¹, 王全九²

(1. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用人工模拟降雨试验研究不同坡度的土壤侵蚀程度, 分析了土壤养分在不同坡度(5°, 10°, 15°, 20°, 25°)随坡面径流流失及水分入渗向下迁移的动态变化过程和机制。结果表明, 在恒定降雨强度下, 初始产流 10 min 内, 产流产沙量随时间迅速递增, 随后缓慢增加并逐渐趋于稳定, 总产流量大小为 15° > 10° > 20° > 5° > 25°; 10° 总产沙量最大, 15° 和 20° 总产沙量相近, 5° 和 25° 总产沙量接近。不同坡度条件下总产流量和总产沙量随坡度的变化趋势均可用二次函数拟合, 相关系数 R^2 为 0.65。10°~15° 坡度之间存在一个对径流中养分浓度变化有显著影响的转折点。硝态氮在湿润层内的迁移过程用幂函数描述, 铵态氮在湿润层内的浓度变化用三次多项式拟合, 速效磷浓度在湿润层内随深度变化并不明显; 硝态氮、铵态氮总流失量随坡度的变化趋势符合二次多项式变化, 相关系数 R^2 分别为 0.91 和 0.77。20° 时水溶性磷流失总量最大, 为 15° 坡面的 1.61 倍。径流中初始养分浓度主要受养分在径流中溶解度的影响, 在产流后期, 土壤流失量对径流养分浓度的影响程度加大。

关键词: 人工降雨; 坡度; 地表径流; 养分流失

中图分类号: S343.3; S157.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2015)02-0069-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2015.02.014

The Processes of Nitrogen and Phosphorus Loss and Migration in Slope Cropland Under Different Slopes

WANG Li^{1,2}, WANG Li¹, WANG Quanjiu²

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming of Loess Plateau,

Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water

Conservation Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Took artificial simulation rainfall to study soil erosion degree in different slopes (5, 10, 15, 20, 25 degrees) and analyzed process and mechanism of dynamic changes of the soil nutrient loss with runoff erosion and migration with water infiltration in different slopes. The results showed that under the constant rainfall intensity the runoff and sediment yield increased rapidly within the initial 10 minutes then increased slowly and gradually stabilized. The order of output flow was 15 degree > 10 degree > 20 degree > 5 degree > 25 degree. 10 degree total sediment yield was maximum, 15 degree and 20 degree of the total sediment yield were similar, 5 degree and 25 degree of the total sediment yield were close. Under the conditions of different slopes, the trend with the slope of total runoff and total sediment yield could be fitted with a quadratic function and the correlation coefficient R^2 was 0.65. And there was a critical value that had a significant effects on nutrient concentrations of runoff under slope degrees between 10 degree and 15 degree. In addition the migration process of nitrate nitrogen in wet layer could be described in the power function and the concentration change of ammonium nitrogen in wet layer was in agreement with cubic polynomial curve, while there was no significant change of the available P concentration with depth under the wet layer. The trend with the slope of the total loss amount of nitrate and ammonium were quadratic polynomial change, the correlation coefficient R^2 was 0.91 and 0.77 respectively. The total amount of water-soluble phosphorus loss was maximum on 20 degree, it was 1.61 times of 15 degree slope. Initial nutrient concentration in runoff influenced mainly by nutrient solubility and the quantity of soil loss had more effects on the nutrient concentration in the late runoff.

Key words: artificial rainfall; slope; surface runoff; nutrient loss

收稿日期: 2014-10-9

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51239009)

第一作者: 王丽(1990-), 女, 甘肃张掖人, 硕士研究生, 主要从事黄土坡地养分流失研究。E-mail: 626729317@qq.com

通信作者: 王力(1973-), 男, 山西吕梁人, 研究员, 主要从事土壤学和流域生态研究。E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn

水土流失是一个世界性的问题,严重的水土流失使土壤中养分大量损失,土壤肥力下降。黄土高原地区是目前世界上土壤侵蚀强烈和危害严重的地区之一^[1],是黄河泥沙的主要来源地,表土的流失,加速了旱作地区土地的沙漠化进程,降低了土地生产力。而我国坡耕地占总耕地面积的 34.3%,已有大量研究和资料显示^[2],在黄土高原有 50%~60%的泥沙来自坡耕地,长江等河流也有 60%~70%泥沙源于坡耕地,表明坡地是江河泥沙的主要来源。坡地水土流失和土壤侵蚀直接导致养分最为丰富的表土流失,使土地退化、生产力水平降低。为了增产增收,在农业生产活动中施用大量和过量的化肥,降雨条件下化肥在耕地表面释放并随水分运动而迁移,不仅造成浪费,而且对地表水和地下水的水质造成严重负面影响。因此,研究坡地养分流失不仅是农业问题,而且是生态环境问题^[3]。此外,坡地养分迁移与流失规律研究是土壤学、水文学、环境科学等多个学科领域的交叉点和研究热点^[3],氮、磷是 2 个对环境均有较大影响的营养元素,氮(主要是硝态氮)容易随径流迁移,而且对人体健康会构成直接威胁,磷素流失与侵蚀条件下土壤的退化过程具有较为密切的关系^[4],农业生产系统的养分状态,尤其是氮磷平衡状态,是决定作物产量、土壤肥力以及农业环境影响的重要因素^[5],氮、磷等养分的流失既导致土壤养分的退化,也是农业非点源污染的来源^[6],故研究氮、磷两大元素在坡耕地的流失情况具有重要现实意义。氮、磷元素在坡耕地的流失是一个量的积累过程,只有达到一定数量才能反映出土壤的贫瘠和退化,流失的氮、磷分散在径流和泥沙中,增加了监测和处理的困难^[7]。坡度通过影响坡地土壤侵蚀进而影响养分流失,黄土高原丘陵沟壑区明显的特点是千沟万壑,梁峁起伏,农田更是以坡耕地为主,所以本研究选取高原沟壑区的典型代表性流域耕层土壤,通过室内人工模拟降雨控制不同坡度条件,研究高原沟壑区坡耕地养分(氮、磷)随地表径流迁移特征以及入渗规律,并探讨养分在降雨—入渗—径流相互作用下的迁移过程。

1 材料与方法

1.1 试验材料

模拟降雨试验于 2013 年 7—9 月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行,采用侧喷式自动模拟降雨系统,喷头高度 16 m,雨滴降落终速可达到自然雨滴降落终速的 98%以上,降雨特性接近于天然降雨^[8]。人工模拟降雨所用土壤为陕西省长武县王东沟小流域耕地表层 0—20 cm 的耕层土,为黑垆土,原始硝态氮含量 10.42 mg/kg,铵态氮含量 0.48 mg/kg,速效磷含量 5.17 mg/kg。供试土壤风干后过 5 mm 筛,去除石块、植物根系等杂质备

用。土壤初始含水量为 10%左右,以便控制土壤容重。土壤装槽容重为 1.27 g/cm³。试验土槽规格:长、宽、高分别为 2.0 m×0.3 m×0.55 m,坡度可调节范围 0°~30°。在土槽的径流出口处安装“V”形钢槽收集径流,底部均匀打有小孔,模拟自然透水坡面。土壤装至 50 cm 处与出口齐平,另外 3 边有 5 cm 安全加高防止雨滴击溅使坡面物质流失。

1.2 试验方法

土壤制备与装槽:将风干去杂后的土壤混合均匀,按照预设容重分层装槽,共装 5 层,每层装土厚度为 10 cm,夯实并抓毛表面以防止土层之间分离。顶层 10 cm 土壤称重后进行晾晒,使含水量低于设计标准(含水量 10%),产生水量差供配肥用。

顶层肥土配置:根据长武当地农民施肥习惯,设计施肥标准 P 为 110 kg/hm²,K 为 300 kg/hm²,N 为 150 kg/hm²,用预设含水量水平与顶层干土实测含水量的差值乘以顶层土壤质量,计算出配肥所需水量,按照配肥标准将所需磷酸二氢钙、氯化钾和脲素的用量溶于计算所得水量,喷洒于顶层所需土壤并混合均匀,用塑料布覆盖静置 24 h 后装槽。装槽后用塑料布将土槽覆盖以防土壤蒸发使含水量发生变化,静置 24 h 后进行降雨试验。

降雨过程设定:降雨强度(雨强)定为 1.5 mm/min,降雨前多次率定雨强,当降雨大小和均匀度均达到要求时开始降雨试验,降雨历时 70 min,坡度设置为 5°,10°,15°,20°,25° 5 个坡度水平,每个水平重复 3 次。当径流槽地表产流后,记录初始产流时间,在均匀产流开始后,前 10 min 内每间隔 2 min 收集径流水样,之后每隔 5 min 收集径流水样,直到降雨结束,其余径流全部收集在径流大桶内。

取样过程:径流样静置后取上清液冷藏,测定水溶性磷、硝态氮和铵态氮。降雨结束 3 h 后,对每个径流槽挖剖面取样,挖好剖面后观察湿润锋位置并用尺子测量出入渗深度。在 0—4 cm 深度内每 2 cm 取 1 次样,每次取样横向纵向分别平行取 3 个重复,以后每 1 cm 取样 1 次,每次 3 个重复,直至取至湿润锋处。采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定土壤速效磷;1 mol/L KCl 浸提法流动元素分析仪测定土壤硝态氮和铵态氮^[9]。

数据处理用 Excel 和 SPSS 软件,标准差在括号内用正负表示。

2 结果与分析

2.1 不同坡度降雨—径流—产沙过程

降雨作用于表土,从而引起坡耕地水土流失,雨滴的溅蚀和地表径流的冲刷是造成土壤流失的直接原因。图 1 是径流量、产沙量及不同坡度总产沙量和总产流量变化情况。由图 1 可知,在均匀产流开始后

10 min 内,5 个坡度的产流量均随时间迅速递增,随后略有增加并逐渐趋于稳定。在 5~10 min 之间,存在产流量趋于稳定的转折点,且 5°,10°,20° 3 个坡度与 15°和 25°相比,转折点出现的时间相对较迟。不同坡度初始均匀产流时间对比发现,5°的初始产流所需时间最长,10°和 20°产流时间接近,15°的产流时间略小于 25°,且在 4 min 内,5 个坡度坡面均可以发生产流。

产沙量的多少可以衡量土壤侵蚀量的大小,在均匀产流前 10 min 内,产沙量随时间迅速递减,随后逐渐趋于稳定,稳定时间出现在产流开始后 7~8 min 处(图 1)。由此可知,在降雨初期 10 min 内,坡面侵蚀程度最大,随后趋于稳定,所以防止降雨初期的土壤流失,能有效减小土壤侵蚀。初始产沙量大小为 15°>10°>25°>20°>5°坡面,变化幅度范围为(17.77%±2.8%)~(268.13%±1.7%),15°坡面初始产沙量达到(145.78±0.03)g,5 个坡度初始产沙量之间均存在显著差异性($P<0.05$)。5°坡面的产沙量随产流历时变化相对稳定,15°坡面产沙量在前 10 min 内变化梯度最大,降雨结束后对不同坡度坡面总产沙量大小比较可知:10°坡面总产沙量最大,达到(2.31±0.04)kg,为 25°坡面的(1.27±0.24)倍。由图 1 还可以看出,总产流量大小为 15°>10°>20°>5°>25°坡面,不同坡度总产流量存在显著性差异($P<0.05$)。其中,15°坡面总产流量比 25°坡面多 11.91 L,总产流量最大增加幅度为 23.49%;10°坡面总产沙量最大,15°和 20°坡面总产沙量相近,5°和 25°坡面总产沙量接近,总产流量与总产沙量呈显著正相关,相关系数为 0.900($P<0.05$)。15°坡面总产流量最大,初始产沙量也最大,总产沙量却较低。此外,不同坡度条件下总产流量和总产沙量随坡度的变化趋势均可用二次函数拟合,相关系数 R^2 为 0.65。已有研究表明,径流量与土壤侵蚀量均存在临界坡度,且临界坡度是一个变量,与土壤颗粒组成、容重、坡面状况(坡面粗糙度、坡长、土壤入渗等)等因素密切相关。本研究得出,影响坡面产流产沙量的临界坡度范围为 10°~15°。

2.2 不同坡度径流中养分浓度变化

图 2 为径流中水溶性磷、硝态氮、铵态氮浓度随产流时间的变化。由图 2 可知,水溶性磷和硝态氮浓度随产流时间总体变化趋势相似,在 0~10 min 内迅速减小,随后虽存在波动,但总体趋于稳定。水溶性磷的这种变化趋势与陈玲等^[10]的研究结果一致。5 个坡度径流所含水溶性磷浓度均存在上下波动并相互交错,5°坡面水溶性磷浓度初始产流时最大,随后 10 min 内迅速减小;10°,15°,20°,25° 4 个坡面水溶性磷浓度在 0~5 min 内存在 1 个小的峰值,这是因为

5°坡面实际承雨面积最大,降雨开始时能够在坡面形成积水,土壤中磷能充分解吸进入径流,随着土壤中磷的减少径流中水溶性磷浓度也减小,而随着坡度增大,有效承雨面积减小,坡面积水少且积水势能大,降雨初期雨水多入渗和产流,土壤中的磷还不能与土壤解吸,随着降雨历时增加,在 3 min 左右,当坡面雨水量达到一定值,土壤中的磷才能充分进入径流,径流中的水溶性磷浓度也随之增加,出现峰值。不同坡度硝态氮浓度随时间的变化差异较大,5°,10°,15° 3 个坡度条件下,硝态氮浓度在 0~5 min 内减小,随后保持稳定,而 20°,25°坡面存在较大波动,0~10 min 内浓度增加并在 30 min 内保持较高浓度,随后浓度迅速减小并在 45 min 和 55 min 左右存在 2 个波峰,这是由于表土层土壤硝态氮含量较高,在初始产流时间内,随径流迅速流失,所以产流初期径流中浓度随时间增加。在产流开始后的 30 min 内,20°和 25°坡面承受的雨滴动能、击打角度、积水势能较大,径流带走大量表层土壤,所以硝态氮浓度一直保持最高。随着降雨历时增加,在 45 min 和 55 min 左右坡面出现浅沟侵蚀时,径流中硝态氮浓度再次增加。此外,5 个坡度铵态氮浓度变化均上下波动,相互交错,没有明显的差异。

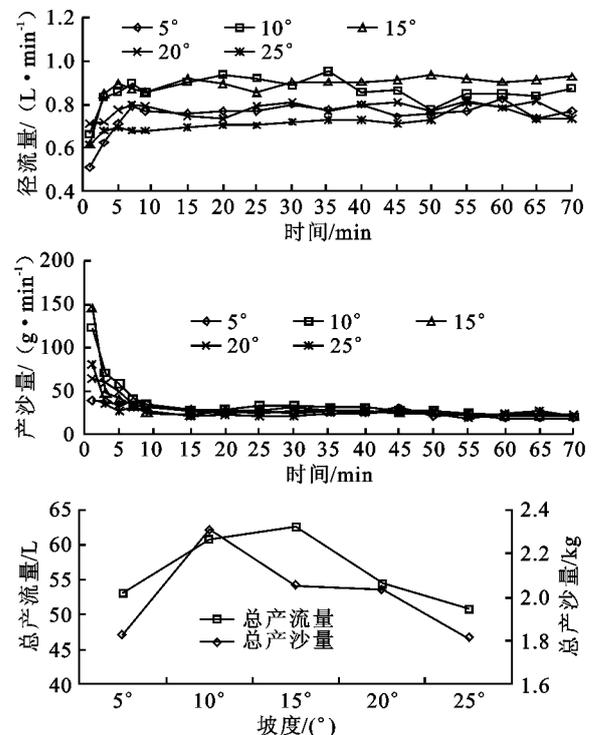


图 1 不同坡度产流—产沙情况

2.3 养分在湿润层的动态变化

从图 3 可以看出,5°,10°,15° 3 个坡度入渗率变化总体趋势为先急剧下降,然后存在小的波动但总体趋于稳定。20°,25°坡面下,0~5 min 内存在一个小的波峰,5 min 后入渗率略有减小并总体趋于稳定。5°坡面有效承雨面积最大,发生积水入渗,入渗雨量最多,入渗率最大;15°坡面在最初 5 min 内,入渗率

迅速减小,随着降雨时间的推移,入渗率几乎全为 0,坡面所承接雨量几乎全部在坡面形成产流,说明 15°坡面上积水势能最大,容易产流。不同坡度总体入渗率大小为 5°>25°>20°>10°>15°,5°坡面平均入渗率为 15°坡面的(22.7±1.07)倍,不同坡度的坡面土壤入渗能力均在降雨初期 10 min 左右趋于稳定,稳定时 10°和 20°坡面平均入渗率之间无显著性差异,但与其他坡度平均入渗率差异较显著。

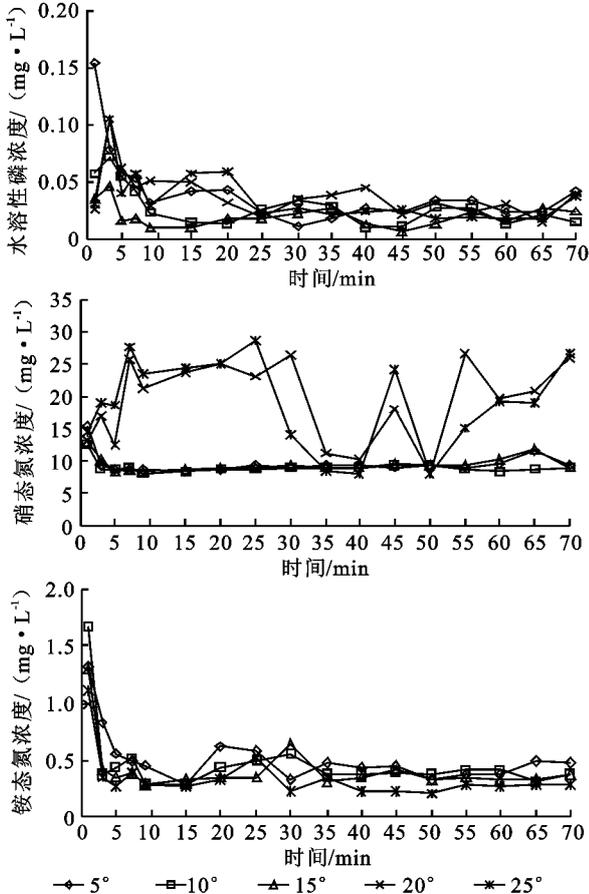


图 2 水溶性磷、硝态氮、铵态氮浓度随产流时间的变化

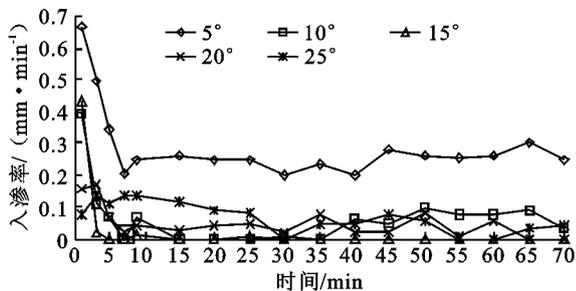


图 3 不同坡度入渗率变化

图 4 描述了不同坡度在湿润锋中含水量分布情况。通过对每个坡面上、下部挖剖面测湿润锋深度取平均后,得出 5°,20°,25°坡面的湿润峰深度为 11 cm,10°,15°坡面湿润锋为 10 cm。5 个坡度湿润锋深度无明显差异,土壤含水量随深度增加而减小,且减小趋势相似,这是因为 25°和 5°坡面入渗率较大,15°坡面入渗率最小,所以 25°和 5°坡面总体含水量最高,15°坡面总体含水量最低。用指数函数拟合 5 个坡度

含水量随深度的变化过程发现,相关系数 R^2 都能达到 0.8 以上。因此,指数函数可以较准确的描述降雨过程中湿润锋层内的含水量变化过程。

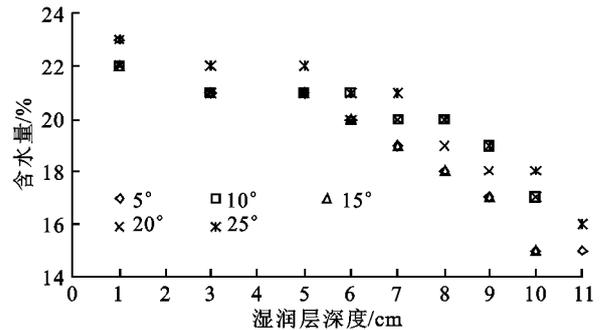


图 4 不同坡度湿润层水分随深度的变化

图 5 中分别为速效磷、硝态氮、铵态氮在不同坡度湿润层深度的动态分布过程。速效磷在湿润层内随深度变化并不明显,只是在上下波动的同时总体略有减小,这是因为磷容易被土壤固定,很少向土壤深层迁移,因此其流失强度较氮、钾等为弱^[11]。从 9 cm 开始,速效磷浓度随深度减小,说明速效磷随水分入渗迁移的深度为 9 cm,以下土层深度土壤中速效磷为本底浓度。

5 个坡度硝态氮浓度随深度变化趋势比较一致,0—4 cm 内浓度缓慢增加,4—7 cm 浓度增加程度较大,从 7 cm 到湿润锋浓度变化比较稳定,说明硝态氮随水分入渗向下迁移深度达到 7 cm 处,并在 0—4 cm 土层内主要发生流失,4—7 cm 土层内流失量逐渐减小,主要随水分向下迁移,7 cm 以下土层中,硝态氮不随水分入渗而迁移也未发生流失,保持本底浓度。

不同坡度条件下,铵态氮随深度的变化趋势也比较统一,在 0—5 cm 内浓度基本不变,5—9 cm 内浓度上下波动,并存在 1 个小的波峰,6—8 cm 土层中存在铵态氮浓度最高的土层,从 9 cm 到湿润锋铵态氮浓度随深度增加而减小。但是,在整个湿润层内,铵态氮浓度随深度的变化幅度并不明显,说明铵态氮浓度在 9 cm 处达到本底浓度不再发生迁移,且在湿润土层中随深度变异较小,这与魏孝荣^[12]的研究结果一致。不同坡度之间 3 种养分迁移浓度大小对比可知,15°时湿润层中速效磷和铵态氮浓度总体较低,而硝态氮总体浓度呈较高水平。

表 1 是对硝态氮、铵态氮浓度变化过程的拟合,用幂函数拟合硝态氮浓度的变化趋势,相关系数 R^2 值均在 0.85 以上,因此不同坡度条件下硝态氮在湿润层内的迁移过程能够用幂函数描述。用幂函数拟合铵态氮的变化过程效果不理想,但通过多项式拟合发现,铵态氮在湿润层内的浓度变化可以用三次多项式拟合,除 10°与 15°相关系数 R^2 未达到 0.8,其余坡度条件下, R^2 值均达到 0.8,也能较好的描述其动态变化过程。

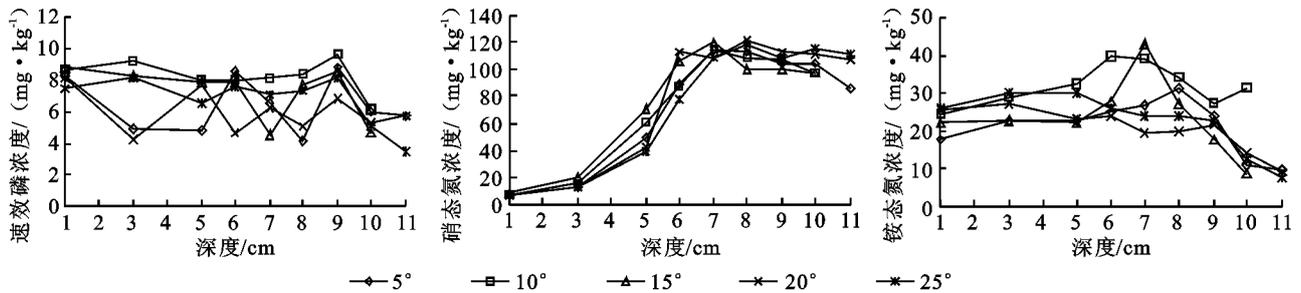


图 5 速效磷、硝态氮、铵态氮在不同坡度湿润层深度的动态分布

表 1 不同坡度湿润层内硝态氮、铵态氮浓度变化过程拟合

坡度/(°)	硝态氮		铵态氮	
	幂函数拟合 R^2	多项式拟合	多项式拟合	R^2
5	0.8837	$y = -0.0902x^3 + 1.0628x^2 - 1.8719x + 19.146$	$y = -0.0306x^3 + 0.0306x^2 + 3.6042x + 20.031$	0.8181
10	0.9198	$y = -0.2772x^3 + 3.8626x^2 - 13.542x + 33$	$y = -0.0226x^3 + 0.1868x^2 - 0.8465x + 26.844$	0.6654
15	0.9026	$y = -0.0135x^3 - 0.1866x^2 + 2.1812x + 24.48$		0.7192
20	0.8740			0.8957
25	0.9197			0.9375

2.4 径流养分流失率变化

地表径流中土壤养分流失量受两个方面的影响,一是径流量,二是径流中养分浓度。水溶性磷、硝态氮、铵态氮随产流时间流失率的变化如图 6 所示。3 种养分流失率随产流时间总体变化趋势为在 0~5 min 内浓度迅速减小,在 5~10 min 内微弱减小,随后虽存在波动,但总体趋于稳定,这种变化趋势是径流量和养分浓度共同影响的结果。5 个坡度水平下水溶性磷稳定流失率均保持在 0.02 mg/min,硝态氮稳定流失率大小为 $15^\circ > 10^\circ > 20^\circ > 5^\circ > 25^\circ$, 15° 坡面为 25° 坡面的 1.41 倍,增幅达到 $(40.89\% \pm 9.63\%)$;不同坡度铵态氮稳定流失率差距较小,变化幅度范围为 50%~66.75%, 25° 坡面稳定流失率最小, 10° 坡面最大,是 25° 坡面的 (1.67 ± 0.09) 倍。

从图 7 可以看出,径流中养分元素总流失浓度为硝态氮 > 铵态氮。 5° 个坡度水溶性磷流失总量分别为 $5^\circ (1.79 \text{ mg}), 10^\circ (1.43 \text{ mg}), 15^\circ (1.18 \text{ mg}), 20^\circ (1.89 \text{ mg}), 25^\circ (1.61 \text{ mg})$ 。不同坡度对比可知, 15° 坡面硝态氮流失量最大,铵态氮流失量较大,而水溶性磷流失量最小。同时,硝态氮、铵态氮、水溶性磷流失量均在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 之间随坡度增加而减小,减小幅度分别为 $(35.2\% \pm 0.29\%), (60.6\% \pm 5.28\%), (17.4\% \pm 1.6\%)$ 。因此,在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 范围内坡度的增加对铵态氮的流失量影响最为明显,流失量迅速减小。通过多项式拟合发现,硝态氮、铵态氮总流失量随坡度的变化趋势符合二次多项式变化,相关系数 R^2 分别为 0.91 和 0.77。 $0^\circ \sim 20^\circ$ 之间硝态氮、铵态氮变化趋势较小,而 $20^\circ \sim 25^\circ$ 变化剧烈,这是因为表层大量硝态氮在降雨初期被迅速淋洗到深层^[12],表层土壤硝态氮含量很低,因此坡度的增大对硝态氮的流失影响并不显著^[13],而唐克丽等^[14]研究提出发生浅沟侵蚀的

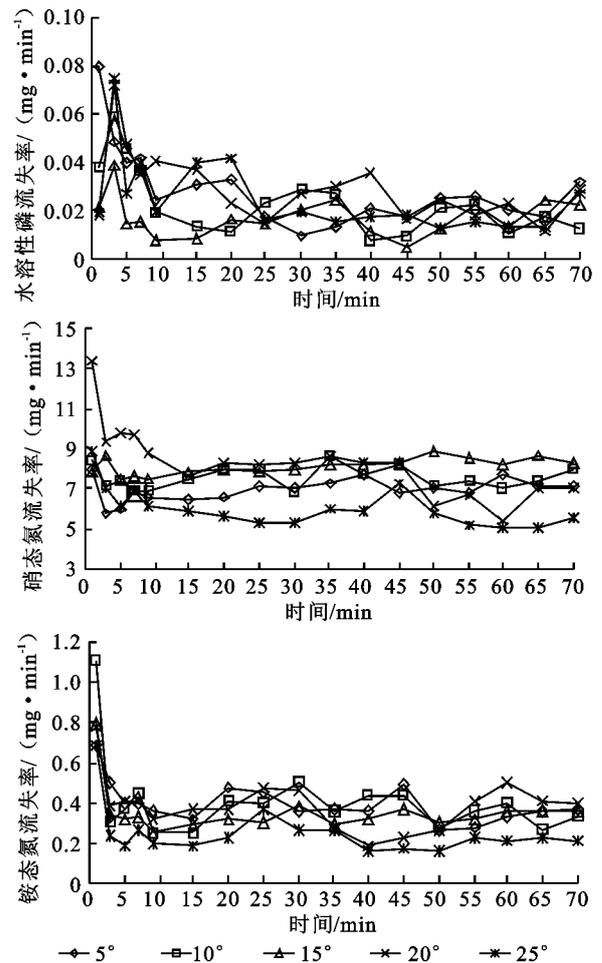


图 6 水溶性磷、硝态氮、铵态氮随产流时间流失率的变化
临界坡度为 $15^\circ \sim 20^\circ$ 坡面,所以,在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 坡面由于可能发生浅沟侵蚀,使径流中硝态氮含量随坡度的变化十分明显。硝态氮流失总量与总产流量在 0.01 水平上呈极显著正相关,相关系数为 1.000 ($P < 0.01$)。水溶性磷流失量在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 坡面随坡度增加而减小, $15^\circ \sim 20^\circ$ 坡面随坡度增加而增加, 20° 坡面水溶性磷流失总量最大,为 15° 坡面的 (1.61 ± 0.042) 倍,且磷流失总量

与初始产沙量呈显著负相关,相关系数为 0.936($P < 0.05$)。通过单因素分析得出,不同坡度水溶性磷、硝态氮、铵态氮总流失量存在显著差异性($P < 0.05$)。

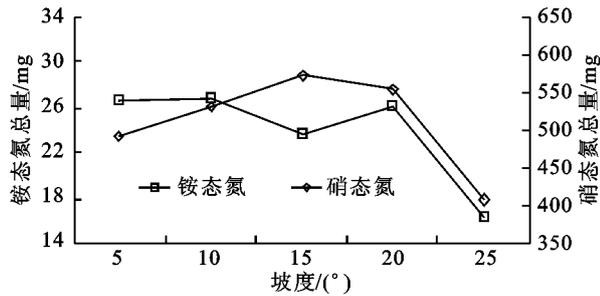


图 7 不同坡度硝态氮、铵态氮流失总量

3 讨论

在本研究中,不同坡度的产流时间、总产沙量、总产流量随坡度的变化并不是单一的递增或递减关系,当降雨强度、坡长、下垫面等条件均一致,只有坡度发生变化时,不同坡度产流产沙随时间的变化以及初始均匀产流时间、总产沙量、总产流量随坡度的变化趋势可从以下两点分析:一是入渗能力,降雨开始时,降雨强度小于入渗强度,坡面入渗能力大,降雨多入渗而少产流,随着降雨时间的推移,坡面土壤含水量逐渐增加并达到饱和,入渗能力随之减小,产流产沙量也随着降雨时间先增加后趋于稳定;另一个是实际承雨面积,坡度越大,实际承雨面积越小,坡面积水量和入渗量也发生变化。因此不同坡度的入渗、产流和产沙量会存在以上差异。从实际承雨面积的角度,5°坡面实际承雨面积最大,首先产生积水,发生了积水入渗,并未产流。从积水势能的角度来看,25°坡面积水势能最大,可能先产流,但由于其实际承雨面积小,雨量少,未能最早发生产流。所以,不同坡度坡面开始均匀产流的时间由坡面有效承雨面积和坡面积水势能共同作用。实际试验结果发现,10°坡面产流时间最早,这说明 5°到 10°坡面产流时间主要由积水势能决定,坡度越大,积水势能越大,产流时间越短。15°到 25°坡面产流时间主要由有效承雨面积决定,坡度越小,有效承雨面积越大,坡面承接雨量多,产流时间越早,并且在 10°左右存在一个使主导因子改变的临界坡度。王辉等^[12]的研究还发现,在坡度 15°左右,主导因素发生变化,与本试验结果存在差异。因此,转折坡度存在的范围大致是 10°~15°,具体临界坡度还有待进一步确定。不同坡度初始产流时间对比发现,20°坡面产流时间小于 25°坡面,这与李裕元^[15]的研究结论一致。

5 个坡度的入渗能力对比发现,本试验中 15°是影响坡面水分入渗的临界坡度,然而,有研究^[16]指出,坡面入渗率随坡度增加而减小。由于供试径流槽中土壤处理不同,所以本试验与野外试验的结果存在

差异,15°坡面水分入渗少,湿润层中速效磷、铵态氮随水分入渗迁移能力差,迁移量少,总体浓度较低,但硝态氮总体浓度却呈较高水平。通过对产流量、产沙量、水分入渗以及硝态氮在土壤中随水分的迁移程度等因素综合分析得出,与 20°~25°坡面相比,降雨作用于 20°~25°坡面的侵蚀力较大,所以硝态氮流失比 15°坡面严重,5°~10°坡面由于在产流过程中有效承雨面积较大,水分入渗多,导致硝态氮多随水分运移至土壤深层,因此,硝态氮在 15°坡面总体浓度较高。

从以上研究可以得出,黄土高原沟壑区耕层土壤中养分的流失总量随坡度的变化存在明显转折点,硝态氮、铵态氮、水溶性磷 3 种养分流失量的转折坡度范围为 10°~15°,与孔刚等^[18]的研究所得 20°附近存在转折的结果不同,本研究转折坡度较小;此外,不同养分随产流时间的增加,均在 10 min 左右趋于稳定,这一结论与王辉等^[12]的研究结论相比,稳定时间较早,产流产沙量的稳定时间也相对较早。出现此差异的主要原因一是本试验所采用的土壤为典型黄土高原沟壑区耕层土,而王辉的研究所用土壤为壤土,二是本次试验设计雨强标准比其研究标准大,坡面易发生板结,产流产沙量均受到影响而较早出现稳现象。在张小娜等^[18]的研究中发现相同雨强下铵态氮流失总量随坡度增加而减小,这与本试验研究结果虽然类似,但本研究还显示 15°左右存在养分流失量变化的坡度转折点。此外,影响养分流失量及泥沙流失量的具体转折坡度的确定有待进一步研究。

4 结论

(1)通过室内人工降雨试验研究,在恒定降雨强度下,均匀产流开始后 10 min 内,产流产沙量随时间迅速递增,随后增加缓慢并逐渐趋于稳定;水土流失程度随着坡度增加而加剧,土壤侵蚀导致养分流失,径流溶质浓度也随之增高。总产流量大小为 15° > 10° > 20° > 5° > 25°坡面,10°总产沙量最大,15°和 20°坡面总产沙量相近,5°和 25°坡面总产沙量接近。不同坡度条件下总产流量和总产沙量随坡度的变化趋势均可用二次函数拟合,相关系数 R^2 为 0.65。

(2)径流中水溶性磷、铵态氮浓度在均匀产流开始后几分钟内浓度很高,随后迅速衰减,不同坡度硝态氮浓度随时间的变化差异较大。3 种养分流失率随产流时间总体变化趋势为在 0~5 min 内浓度迅速减小,在 5~10 min 内微弱减小,随后产流时间内虽存在波动,但总体趋于稳定。在坡度 10°~15°之间存在一个对径流养分浓度变化有显著影响的临界坡度。硝态氮在湿润层内的迁移过程能够用幂函数描述,铵态氮在湿润层内的浓度变化可以用三次多项式拟合,速效磷浓度在湿润层内随深度变化并不明显。硝态

氮、铵态氮总流失量随坡度的变化趋势符合二次多项式变化,相关系数 R^2 分别为 0.91 和 0.77。20°坡面水溶性磷流失总量最大,为 15°坡面的 1.61 倍。

(3)径流中初始养分浓度大小主要受养分在径流中的溶解度的影响,主要是溶解态养分随径流迁移,在产流后期,随着径流发展,表层土壤养分浓度减少,但土壤流失量增加,使土壤流失量对径流养分浓度的影响程度加大,径流养分浓度主要受控于土壤流失程度。

综上所述,通过改修梯田等措施来降低坡耕地坡度,能有效减少土壤侵蚀,降低水土流失量,是减少养分流失的重要途径之一。幂函数能够有效地模拟非饱和水流条件下土流失严重的黄土坡面径流溶质迁移过程。

参考文献:

- [1] 刘玉平,王桥,王文杰,等. 中国西部地区水土流失状况[J]. 水土保持学报,2001,15(6):17-19.
- [2] Douglas C L, King K A, Zuzel J F. Nitrogen and phosphorus in surface runoff and sediment from a wheat-pea rotation in northeastern Oregon[J]. Journal of Environment Quality, 1998(27):1170-1177.
- [3] 邵明安,上官周平,康绍忠,等. 坡地水分养分动力学研究的基本思路[C]. 邵明安. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业. 西安:陕西科学技术出版社, 1999:1-9.
- [4] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等. 黄绵土坡耕地磷素迁移与土壤退化研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):1-7,11.
- [5] 许书军,魏世强,谢德体. 非点源污染影响因素及区域差异[J]. 长江流域资源与环境,2004,13(4):389-394.
- [6] 陈志良,程炯,刘平,等. 暴雨径流对流域不同土地利用土壤氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报,2008,22(5):30-33.
- [7] 陈敏鹏,陈吉宁. 中国区域土壤表观氮磷平衡清单及政策建议[J]. 环境科学,2007,28(6):1305-1310.
- [8] 周佩华,张学栋,唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报,2000,20(4):27-30.
- [9] 王辉,王全九,邵明安. 前期土壤含水量对黄土坡面氮磷流失的影响及最优含水量的确定[J]. 环境科学学报,2008,28(8):1571-1578.
- [10] 陈玲,宋林旭,崔玉洁,等. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究[J]. 农业环境科学学报,2013,32(1):49-55.
- [11] 魏孝荣,邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. 生态学报,2007,27(2):603-612.
- [12] 王辉,王全九,邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. 农业工程学报,2006,22(6):39-44.
- [13] 邵明安,张兴昌. 坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型[J]. 世界科技研究与发展,2001,23(2):7-12.
- [14] 唐克丽,张科利,雷阿林. 黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J]. 科学通报,1998,43(2):200-203.
- [15] 李裕元. 坡地土壤磷素与水分迁移试验研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2002.
- [16] 蒋定生,黄国俊. 地面坡度对降雨入渗影响的模拟试验[J]. 水土保持通报,1984,4(4):10-13.
- [17] 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.
- [18] 张小娜,冯杰,高永波,等. 不同雨强条件下坡度对坡地径流及溶质运移的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(2):119-123.
- [9] 崔丽娟,李伟,张曼胤,等. 不同湿地植物及其组合对污染物的净化效果[J]. 生态科学,2011,30(3):327-333.
- [10] 吴卿,王美,许吟波,等. 不同植物生物栅系统对富营养化景观水净化试验[J]. 水土保持学报,2013,27(4):171-175.
- [11] 郭爱红,牛福生,贾久满. 几种湿地植物对景观水体富营养化治理研究[J]. 北方环境,2010,22(1):37-39.
- [12] 蒋跃平,葛滢,岳春雷,等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报,2004,24(8):1720-1725.
- [13] Mungur A S, Shutest R B E, Revirt D M, et al. An assessment of metal removal by a laboratory scale wetland[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5):125-133.
- [14] 董昌华,杨肖娥,濮培民. 低温季节水生植物对污染水体的净化效果研究[J]. 水土保持学报,2003,17(2):159-162.
- [15] 李林锋,年跃刚,蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱磷除氮中的贡献[J]. 环境科学研究,2009,22(3):337-342.
- [16] 黄亚,傅以钢,赵建夫. 富营养化水体水生植物修复机理的研究进展[J]. 农业环境科学学报,2005,24(1):379-383.
- [17] 张家洋,陈丽丽,李慧. 水生植物对富营养化水体除磷去氮的研究概述[J]. 西北师范大学学报,2013,49(1):115-120.
- [18] Healy M G, Rodgers M, Mulqueen J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(12):2268-2281.

(上接第 64 页)