

不同雨强下黄土裸坡水-沙-氮磷流失耦合模拟

彭梦玲¹, 吴磊^{1,2,3*}, 乔闪闪¹ (1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.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; 3.西北农林科技大学, 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用室内人工模拟降雨试验研究 6 种雨强 3 种坡度下黄土裸露坡面水沙及氮磷养分流失规律。结果表明: 1) 降雨强度与土壤入渗速率、坡面产流产沙量的线性拟合决定系数均大于 0.8, 有较好的正相关关系; 2) 25°黄土坡面下: NO_3^- -N 初始浓度较高, 随降雨历时呈波动性减少, 具有明显的初期冲刷效应; NH_4^+ -N 初始流失浓度由 90mm/h 雨强下 0.6057mg/L 增至 120mm/h 的 1.3076mg/L, 但其浓度随降雨历时均不断减小; TN 流失浓度在雨强为 90, 105 和 120mm/h 时分别为 0.6056, 0.8011 和 1.3076mg/L, 随雨强增大而增大; TP 初始流失浓度在 105mm/h 时最大, 90mm/h 时最小, 且不同雨强下 TP 流失浓度相互交错, 不稳定; 3) 养分流失与坡面产流量具有较强的线性相关性, 与产沙量呈显著的幂函数关系。15°坡面时, 氮素流失在 6 种雨强下均以颗粒态为主, 平均约占 72%, 但在雨强增大过程中, 颗粒态所占比例先减少后增加; 而磷素流失颗粒态所占比例均大于 90%, 与降雨强度和坡度均没有直接关系。

关键词: 雨强; 黄土坡面; 裸地; 产流产沙; 氮磷流失

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)03-1109-08

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0132

Coupling simulation of runoff-sediment-nutrient loss on loess bare sloping land under different rainfall intensities.

PENG Meng-ling¹, WU Lei^{1,2,3*}, QIAO Shan-shan¹ (1.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3.Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China). *China Environmental Science*, 2018,38(3): 1109~1116

Abstract: The simulated rainfall experiment was conducted to explore the effect of rainfall intensity on coupling loss rules of runoff and sediment and nutrients under different loess bare slopes. Results showed that: 1) The linear fitting coefficients between rainfall intensity and soil infiltration rate, runoff or sediment were all greater than 0.8, there were strong positive correlations; 2) At 25° slope: The initial NO_3^- -N concentration was high, it was decreased with increased rainfall duration, the scouring effect was significant; The initial NH_4^+ -N concentration increased from 0.6057 to 1.3076mg/L with increased rainfall intensity from 90 to 120mm/h, but NH_4^+ -N concentration decreased with increased rainfall duration; TN concentrations were 0.6056, 0.8011 and 1.3076mg/L under rainfall intensities of 90, 105 and 120mm/h, which increased with increased rainfall intensity; The initial TP concentration had the maximum value in 105mm/h and the minimum value in 90mm/h, and TP concentrations in different rainfall intensities were intertwined and unstable. 3) There was a strong linear correlation between runoff yield and nutrient loss, while there was a significant power correlation between sediment and nutrient loss. At 15° slope: the loss forms of nitrogen was mainly in particulate state under six rainfall intensities, which approximately accounted for an average of 72%, but the proportion of particulate nitrogen decreased first and then increased with increased rainfall intensity; the contribution of particulate phosphorus accounted for more than 90%, which was no direct relation with rainfall intensity and slope.

Key words: rainfall intensities; loess slope; bare land; runoff and sediment; loss of nitrogen and phosphorus

收稿日期: 2017-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679206);陕西省青年科技新星项目(2017KJXX-91);“仲英青年学者”项目(Z111021720).

* 责任作者, 副教授, lw@nwsuaf.edu.cn
© Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

黄土高原区植被破坏严重,多呈裸露坡地,是目前世界上水蚀最严重的地区之一,部分地区土壤侵蚀速率高达 $15000\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,其中约有 9 万多 km^2 的区域超过 $8000\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ^[1].严重的水土流失不仅造成土壤肥力下降,随径流泥沙流失的氮磷对环境也存在潜在的威胁^[2-4].

黄土高原严重的水土流失主要由短历时,高强度的侵蚀性降雨引起^[5-6].已有研究表明,降雨径流是引发土壤侵蚀的关键因子;耕作方式和坡度是影响水蚀过程的重要条件;而降雨强度和降雨量则直接决定坡地水土与养分的流失程度^[7-9].模型模拟是研究区域产流产沙以及养分流失规律的重要手段.如 SWAT 模型^[10-12],改进的输出系数模型^[13],将单位负荷法,数学统计法与 SWAT 模型相结合^[14-15]以定量模拟流域非点源污染物从产生到入河的迁移变化规律,估算污染负荷,识别关键源区,评估其时空分布特征等.尽管模型能够较好的模拟变化环境下氮,磷等污染物的迁移过程与流失量,但不能详细描述不同降雨强度对坡地产流产沙及养分流失的影响.

基于此,模拟降雨试验成为更好地掌握次降雨条件下水土与养分流失机理的重要方法.在野外原位模拟降雨试验研究中,有探索横坡与顺坡垄作下径流,氮磷输出规律^[16],有基于田间尺度进行实地监测并分析产流,产沙量与营养物浓度间关系^[17],还有设置不同作物覆盖和不同坡度条件研究氮磷随地表径流流失的相关规律等^[18].野外原位模拟降雨试验能较好地解析径流小区、坡地乃至小流域的水土和养分流失规律,但其耗时长,人力、物力投入大.而室内人工模拟降雨方法易于控制、效率高,能较好的表达降雨-入渗-侵蚀-养分流失过程,逐渐成为探索水土与养分流失规律的主流方法.邬燕虹等^[19]基于室内人工模拟降雨试验,发现降雨强度与红壤裸坡各形态氮素流失量有明显的正相关性;李中原等^[20]发现雨强对豫西南山区径流,泥沙和有机质流失皆有显著的影响,雨强越大流失量越多.此外,针对黄土高原坡地土壤侵蚀与养分流失的研究亦有很多,如:盛贺伟等^[21]基于人工模拟降雨揭示黄土区塬土和旱塬土坡面片蚀稳定态含沙量与雨强和坡度

存在密切的幂函数关系;Liu 等^[22]采取人工模拟降雨方法发现径流和泥沙是黄褐土坡地氮素流失的主要途径,且合理调整作物种植结构和密度能较好的控制径流,泥沙和氮素流失;陈晓鹏等^[23]通过室内变雨强模拟试验,发现粘黑垆土坡面产流产沙量随雨强增加而逐渐增大,养分流失也有类似规律;王丽等^[24]采用室内人工模拟降雨试验分析发现黄土区粘黑垆土坡面产流量,硝态氮和总磷流失量均随雨强增大而增大,而产沙量和氨态氮流失量在 $1.7\text{mm}/\text{min}$ 雨强时达到最大.

综上,就不同土壤类型、地理环境以及不同区域气候条件下的水沙氮磷流失规律已有相关研究,但针对黄土高原坡地土壤侵蚀与养分流失的研究多集中于黑垆土与壤土,黄绵土类型研究较少;测试指标通常为水沙、硝态氮、氨氮和速效磷,总氮在浑水样中不稳定,测试难度大,以坡面总氮、总磷及氮磷流失形态为对象的研究较少.考虑到黄土区气候、地形与非饱和土壤的典型性决定了水沙、氮磷流失机理相对其他地区更复杂,因此,开展黄土坡地水土养分流失特征研究对黄土区农业面源污染控制具有重要意义.本文采用室内人工模拟降雨试验研究不同雨强下黄土裸坡水-沙-氮磷耦合流失特征,以期为多尺度水-沙-非点源氮磷流失模拟与调控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

试验于黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行.采用侧喷式自动模拟降雨系统,降雨高度为 16m ,均匀度大于 80% ,调节率定后的雨滴到达地面的速度满足天然降雨特性.试验采用可调坡钢槽,尺寸为:长 \times 宽 \times 高= $200\text{cm}\times 100\text{cm}\times 45\text{cm}$.在出口处安装 V 形槽收集径流,其他三边焊接 15cm 高的钢板,防止槽内物质受雨滴打击溅出槽外.槽底均匀打孔,便于土壤水自由下渗.供试土壤为陕西省安塞县纸坊沟小流域的黄绵土,土壤初始总氮含量 $0.14\text{g}/\text{kg}$,总磷含量 $1.31\text{g}/\text{kg}$,颗粒组成中黏粒($<0.001\text{mm}$)含量为 11.63% ,粉粒($0.005\sim 0.05\text{mm}$)含量为 64.57% ,砂粒($>0.05\text{mm}$)含量为 23.80% ,这与吴凤

至等^[25]在研究不同降雨下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律中测得黄绵土相关属性数据较为接近.

1.2 实验方法

1.2.1 供试土壤处理与填装

为了使供试土壤肥力均等,本试验采用人工拌肥法,并进行分层装填确保供试土壤均匀,对每层土壤抓毛以防止土壤分层.设计坡度为 10°,15°和 25°,坡度范围基本符合黄土高原旱地实际坡度^[26].降雨强度设计分别为 45,60,75,90,105,120mm/h,符合我国黄土高原地区降雨特征^[27-28].同时控制土壤含水量为 10%左右,土壤容重为 1.30g/cm³左右.

1.2.2 测定内容与与方法

试验于 2017 年 3~6 月完成,测定的内容主要有 2 个部分.一是坡面水沙流失情况,即初始产流时间,各阶段产流量和产沙量;二是坡面养分流失情况,主要包括地表径流中的总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)以及总磷(TP)含量.试验过程中,记录初始产流时间,待产流均匀后,前 10min 每分钟收集水沙样持续 30s,测量并记录径流体积(mL);此后每 10min 接水沙样持续 30s,至降雨结束,并记录产流结束时间.降雨结束后,将收集的水沙样品各自混匀取部分带回实验室测定水样中的相应氮磷指标(6 个平行样绘制标准曲线,mg/L).剩余水样转移至铝盒中用烘箱烘干,按比例计算各阶段产沙量(g).

2 结果与讨论

2.1 不同雨强下坡面入渗和产流产沙特征

降雨不仅为入渗提供物质来源,也为其提供动力,雨强对土壤水分入渗率也有着重要的影响^[29].根据裸地坡面水量平衡原理,忽略水分蒸发,利用雨强和坡面产流率可以求出土壤稳定入渗率^[30],见式(1):

$$f = I - 3.6D / (S \times \cos \alpha) \quad (1)$$

式中: f 为土壤稳定入渗速率,mm/h; I 为降雨强度,mm/h; D 为坡面产流率,mL/h; S 为试验小区面积,m²; α 为坡度,°.此计算过程忽略径流中的泥沙体积.由图 1 分析所得,同一坡度时的土壤稳定入

稳定入渗速率进行拟合,发现其线性关系最佳,决定系数均大于 0.9,说明降雨强度与土壤入渗速率有很强的相关性.这与李受升等^[31]研究雨强对黄土边坡入渗性能影响的结论一致.

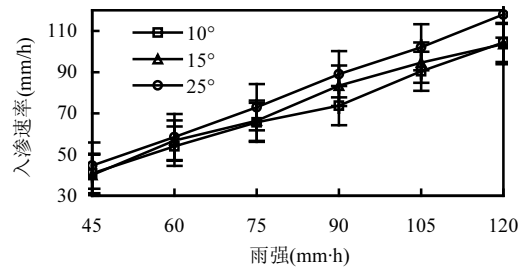


图 1 雨强与土壤入渗速率的关系

Fig.1 Relationship between rain intensity and soil water infiltration rate

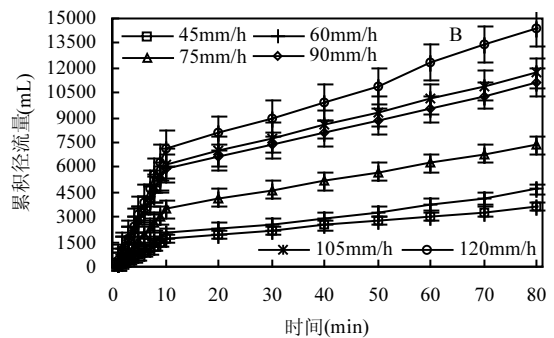
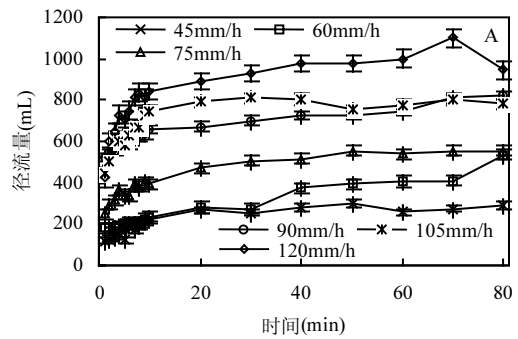


图 2 不同雨强下坡面径流量和累积径流量变化趋势
Fig.2 Variation trend of runoff and cumulative runoff of different rainfall intensity

A 10°坡面径流量 ;B 10°坡面累积径流量

降雨强度由 45 增至 120mm/h 时,单位时间降雨量增加,径流槽瞬时入渗量以及稳定入渗量随之增加.基于此,雨强越大,径流槽内土壤越易

饱和,坡面产流时间提前;同时,雨强不断增大形成超渗产流,对坡面径流量和累积径流量有很大影响.本节主要探讨不同雨强下 10°坡面的径流变化情况,如图 2 所示.坡面稳定产流后的 10min 内,径流量不断增加,趋势明显,随后渐趋平稳,仍有较小的波动,可能是小部分区域雨强不均和自然风干扰所致.而坡面积径流量在 10min 左右出现明显转折,10min 后虽继续增加,但趋势减缓.

坡度为 10°时,随着雨强增加,裸地坡面平均径流率不断变大(见表 1).当雨强以 15mm/h 为基准增加时,坡面平均产流率增加的倍数依次为:1.29、1.59、1.51、1.05、1.23,这是因为雨强增加,单位时间有效降雨量增加,坡面承雨量变大,土壤入渗速率加快,土壤达到饱和状态的时间缩短,而有更多的雨水形成坡面径流.这与许

多学者^[32-33]的研究结论类似,即降雨强度与坡面径流量有很强的相关性,降雨强度越大,坡面产流量越大.

裸地坡面降雨-入渗-产流-产沙-溶质迁移过程十分复杂.将实测产沙结果进行统计分析如表 2,发现随着雨强的增大,10°坡面产沙量不断增加.将不同雨强与坡面产沙量进行函数拟合,发现其指数函数的相关性最好,决定系数为 0.87,表明雨强对坡面产沙量有较大影响.坡面土壤流失的主要动力为雨滴击溅侵蚀和径流冲刷,前者受雨滴动能影响较大,而雨滴动能与降雨强度成正相关关系^[34];随着雨强不断增加,雨滴对坡面的滴溅作用加强,使松散的土壤颗粒增多,更容易被暴雨径流冲刷带走,所以雨强越大,径流含沙量也越大.

表 1 不同雨强下 10°裸坡面平均径流率

Table 1 The average runoff rates under different rain intensity at slope of 10°

坡度	不同雨强下的平均径流率 (L/min)					
	45mm/h	60mm/h	75mm/h	90mm/h	105mm/h	120mm/h
10°	0.045	0.058	0.092	0.139	0.146	0.180

表 2 不同雨强下产沙量分析

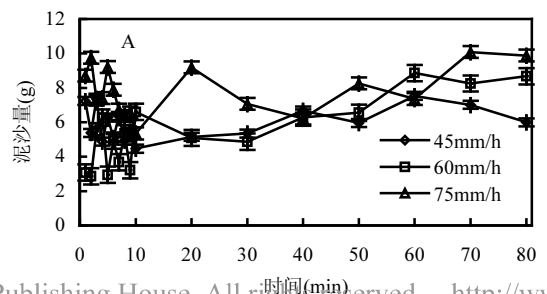
Table 2 The analysis of accumulation sediment yield under different rain intensity

坡度	不同雨强下产沙量(g)						拟合函数	决定系数 R ²
	45mm/h	60mm/h	75mm/h	90mm/h	105mm/h	120mm/h		
10°	101.10	113.01	133.39	120.30	148.72	160.87	$S = 79.317e^{0.0058t}$ (n=6, P<0.01)	0.87

注:S:产沙量;t:降雨强度.

图 3 描述了 10°坡面时不同雨强下的产沙量随降雨历时的变化趋势.当雨强为 45、60 和 75mm/h 时(图 3A),坡面产沙量在前 10min 内波动性减小随后缓慢增加;而当雨强为 105 和 120mm/h 时(图 3B),随着降雨时间延长坡面产沙量不断减小,尤其前 10min 减小趋势明显,后期有较小波动.总体而言,裸地坡面泥沙损失随雨强增加而增大.不同雨强下泥沙流失量的差异可能是由于当雨强较小时,坡面产流缓慢且量少,对泥沙的裹挟能力较弱;雨滴击溅力度小,使土壤剥离量少,且水沙不同步,故形成坡面产沙量波动大,不

稳定.但当雨强足够大时,坡面径流形成速度快、流量大,对坡面冲刷剧烈,能带走大量泥沙,随着降雨延长,坡面疏松土壤不断减少,逐渐趋于平稳.



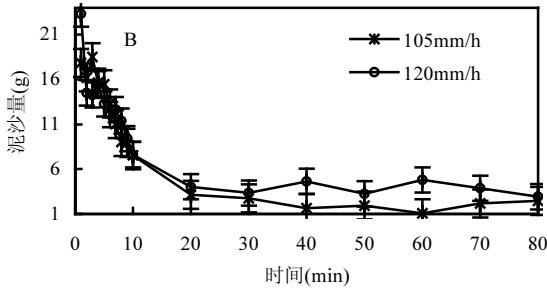


图3 10°坡面时产沙随降雨历时变化过程

Fig.3 The transformation of sediment production with rainfall duration over the 10° slope

A 雨强为 45,60 和 75mm/h 时的坡面产沙量;B 雨强为 105 和 120mm/h 时的坡面产沙量

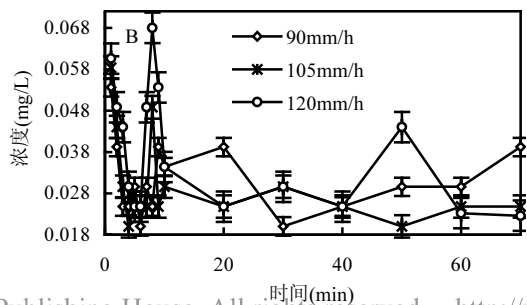
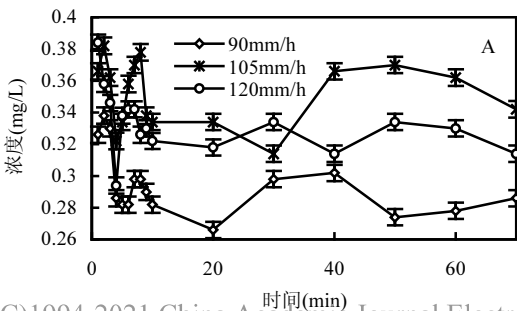
2.2 不同雨强下氮磷流失特征

分析了不同雨强下 25°坡面 NO_3^- -N, NH_4^+ -N, TN 和 TP 浓度随降雨历时变化规律.当雨强由 45mm/h 不断增大到 105mm/h 时, NO_3^- -N 流失总量依次增加的倍数为 1.20, 1.08, 1.35 和 1.45, 雨强越大, NO_3^- -N 流失总量越大.如图 4A 所示,当坡度为 25°时, NO_3^- -N 浓度在降雨过程中随时间延长呈波动性减少,尤其在前 10min 内波动幅度尤为明显.当雨强为 90mm/h 时, NO_3^- -N 初始浓度为 0.326mg/L;105mm/h 时为 0.366mg/L;120mm/h 时浓度最高,为 0.384mg/L.降雨强度越大,坡面的瞬时有效承雨量也会越来越大,而产流初期小区坡面的疏松土壤较多,随径流裹挟的泥沙流失量越多,有学者认为疏松土壤的养分含量较高,因此硝态氮在水沙流失初期即出现浓度峰值,表现出明显的初期冲刷效应^[35].

图 4B 描述了 25°时 NH_4^+ -N 浓度随降雨历时延长的衰减过程. NH_4^+ -N 在 90,105,120mm/h

雨强下的初始流失浓度分别为:0.0536,0.0584 和 0.0606mg/L,表现为雨强越大, NH_4^+ -N 初始流失浓度愈大.虽然 NH_4^+ -N 浓度随降雨时间延长呈衰减趋势,但其浓度在不同雨强下相互交错,表现极不稳定,尤其前 10min 浓度变化剧烈,随后亦呈减缓趋势.说明雨强对黄绵土裸地 NH_4^+ -N 流失的影响较为复杂,影响因素不单一.

如图 4C 所示,当坡度为 25°,雨强为 90,105,120mm/h 时的 TN 初始浓度分别为 0.4625,0.9134 和 1.259mg/L;随着降雨进行,TN 的总流失浓度分别为:0.6065,0.8011 和 1.3076mg/L,增长的倍数分别为 1.32 和 1.63,说明随着雨强增大,TN 流失浓度也随之增大,这与李瑞^[36]就太湖缓坡丘陵区雨强对非点源污染物迁移影响的结论一致.TP 在坡度为 25°时的浓度随降雨时间变化情况见图 4-D,在产流初期其流失浓度表现为雨强 105mm/h 时最大,90mm/h 时最小.各雨强下 TP 流失浓度在前 10min 内均随降雨时间延长出现剧烈波动,但不同雨强下 TP 浓度却各有高低,规律较为复杂.10min 后,雨强为 105 和 120mm/h 时 TP 浓度总体呈下降趋势,随后趋于平稳;而雨强为 90mm/h 的 TP 浓度却波动性增加.这可能与不同雨强下的复杂产流产沙机制有关:一是因为降雨初期雨水入渗较多,产流相对较小,携沙能力较弱,而磷主要以颗粒态流失为主^[37-38];再者土壤表层进行了抓毛处理使部分土壤疏松,所以初期径流较小仍能携带部分泥沙,导致泥沙流失不稳定,对坡面养分流失有较大影响^[39].综上,不同雨强下的 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TN 和 TP 流失量存在显著的差异,但其流失浓度均与降雨强度有明显的正相关关系,这与马东等^[40]就崂山水库流域研究降雨特征与径流养分迁移的结论吻合.



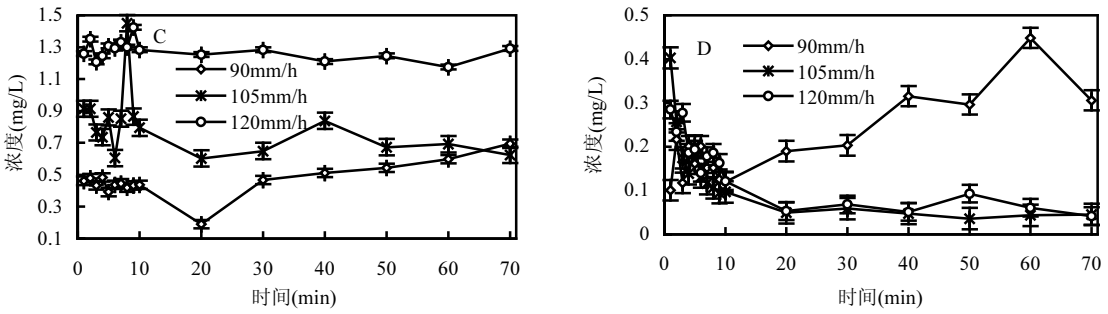


图4 不同雨强下各形态氮素以及总磷随降雨历时流失情况

Fig.4 The loss of nitrogen and total phosphorus under different rainfall intensity

A 25°硝态氮;B 25°氨态氮;C 25°总氮;D 25°总磷

2.3 径流、泥沙对坡面养分流失量影响规律

径流为坡面养分流失提供动力,泥沙是其主要载体^[41-42].表3显示10°坡面的径流量与TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、溶解态氮(DN)、TP及溶解态磷(DP)的线性拟合决定系数均大于0.7,表明径流量越大对坡面养分流失贡献越大.这是由于雨强增加能够加大雨滴的打击力度,使土壤薄层的径流紊动增强,而强化径流对养分的裹挟能力^[43-44].这与王国重等^[45]在豫西南山区研究雨强对坡面养分流失影响规律得出的结论一致.就相关性而言,径流量对总氮的影响最大,对溶解态磷影响小.对数据进行显著性差异分析得到10°时所有场次降雨产生的径流量与其养分流失量均具有较高的显著性水平($P < 0.05$).

表3 10°坡面养分流失量与径流量的关系

Table 3 The relationship between nutrient loss and runoff at 10° slope surface

养分类型	养分流失量与径流量的拟合函数	决定系数(R^2)
总氮	$Y_{总氮} = 1.1189x - 5.9047 (n=6, P < 0.01)$	0.95
硝态氮	$Y_{硝态氮} = 0.0213x - 0.0941 (n=6, P < 0.01)$	0.86
铵态氮	$Y_{铵态氮} = 0.0029x + 0.0256 (n=6, P < 0.05)$	0.75
溶解态氮	$Y_{溶解态氮} = 0.0679x - 2.8168 (n=6, P < 0.01)$	0.94
总磷	$Y_{总磷} = 0.5233x - 22.702 (n=6, P < 0.05)$	0.84
溶解态磷	$Y_{溶解态磷} = 0.0002x + 0.0039 (n=6, P < 0.05)$	0.74

注:y表示养分流失量,mg;x表示径流量,mL.

10°坡面条件下6场降雨的产沙量与养分流失量的幂函数关系最佳,从表4可以看出,TP流失量和产沙量相关性最好,溶解态磷与泥沙流失

的相关性最差,这是因为磷主要吸附在泥沙表面随径流流失.同样的,氨氮流失主要靠径流转移,所以与产沙量相关性较低.

同时表4反应当雨强分别为45,60,75,90,105,120mm/h时10°坡面产沙量与养分流失的显著性差异值p均小于0.05,具有较高的显著性水平.

表4 10°坡面养分流失量与泥沙量的关系

Table 4 The relationship between nutrient loss and sediment at 10° slope surface

养分类型	养分流失量与泥沙量拟合函数	决定系数(R^2)
总氮	$Y_{总氮} = 1.1069x^{0.3732} (n=6, P < 0.05)$	0.73
硝态氮	$Y_{硝态氮} = 0.0712x^{0.7836} (n=6, P < 0.05)$	0.61
氨态氮	$Y_{氨态氮} = 0.0707x^{0.2187} (n=6, P < 0.05)$	0.55
溶解态氮	$Y_{溶解态氮} = 0.0874x^{0.5829} (n=6, P < 0.05)$	0.70
总磷	$Y_{总磷} = 0.0089x^{0.8763} (n=6, P < 0.05)$	0.91
溶解态磷	$Y_{溶解态磷} = 0.0062x^{0.1979} (n=6, P < 0.05)$	0.50

注:y表示养分流失量,mg;x表示径流量,mL.

从氮素流失形态来看(图5A),15°坡度时,雨强由45增大到120mm/h,颗粒态氮始终占绝对比例,说明黄土坡面氮素流失以泥沙吸附态为主.图5A显示,当降雨强度由45增加至120mm/h时,溶解态氮流失量先增加后减少,这可能和该区降雨类型有关^[46].当降雨为中雨(45~75mm/h)时,坡面土壤的雨滴滴溅和径流冲刷作用随雨强的增大而加强,促使坡面径流与土壤养分充分混合,并随径流量增大而被稀释,所以溶解态氮比例会不断降低.但暴雨的(90~120mm/h)雨滴击溅强度大,

产流迅速,吸附养分的土壤颗粒快速地被暴雨剥蚀而随径流迁移,故该过程颗粒态氮比例增加。

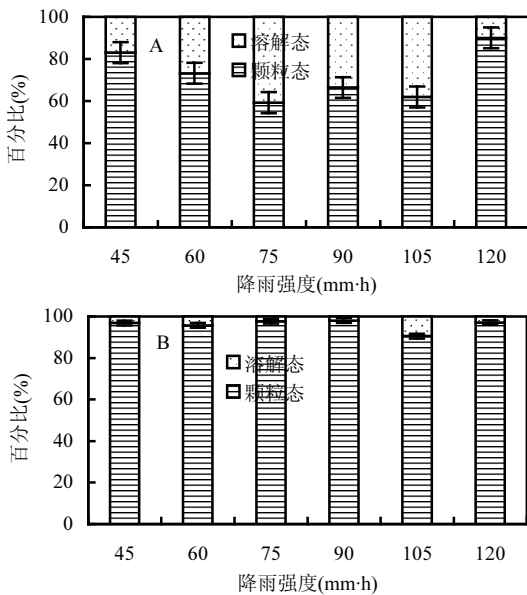


图5 15°坡度条件下不同雨强的养分流失形态分析
Fig.5 The analysis about loss of nutrient form under different rain intensity with the slope of 15°

A 颗粒态氮与溶解态氮的比例;B 颗粒态磷与溶解态磷的比例

图5B描述了15°坡面不同雨强下磷素流失形态比例构成,各雨强下颗粒态磷随径流泥沙流失比例皆大于90%;颗粒态磷与产沙量的幂函数拟合系数达0.91,说明黄绵土裸坡磷素流失以颗粒态为主^[47-48]。此外,坡度为10°和25°时所有场次降雨的径流磷素流失皆以泥沙吸附态为主,所占比例甚至高于95%。

3 结论

3.1 10°坡面时,当雨强以15mm/h为基数增加,坡面产流量不断增大,径流对坡面的冲刷不断增强,产沙量越来越多。当雨强小于75mm/h的坡面产沙过程波动剧烈;而当雨强为105和120mm/h时,坡面产沙随降雨历时不断减小并渐趋平缓。

3.2 25°坡面的硝态氮流失量随雨强的增加而增加,其浓度随产流历时波动性减少。氨氮初始流失浓度由0.054增至0.061mg/L,随雨强增加而增

大,浓度随降雨历时波动减小。总氮浓度受雨强影响显著,有明显的正相关关系。总磷在90mm/h时最小,浓度波动性增加,而在105mm/h时浓度最大,且当雨强为105和120mm/h时,总磷总体呈先下降后渐趋平稳的趋势。

3.3 10°坡面的径流量与TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、DN、TP及DP均存在明显正相关关系;产沙量与养分流失的幂函数关系最佳。15°坡面的氮流失均以颗粒态为主;当雨强为45~120mm/h时,溶解态氮比例总体呈先增加后减小趋势。颗粒态磷流失量与产沙量相关性较高,流失比例在各雨强和坡度下均高于90%。

参考文献:

- [1] Li P, Mu X, Holden J, et al. Comparison of soil erosion models used to study the Chinese Loess Plateau [J]. Earth-Science Reviews, 2017,(170):17-30.
- [2] 高扬,朱波,汪涛,等.人工模拟降雨条件下紫色土坡地生物可利用磷的输出[J]. 中国环境科学, 2008,28(6):542-547.
- [3] 王国重,李中原,田颖超,等.雨强和土地利用类型对豫西南山区产流产沙的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017,50(2): 182-186.
- [4] Xu G, Cheng Y, Li P, et al. Effects of natural rainfall on soil and nutrient erosion on sloping cropland in a small watershed of the Dan River, China [J]. Quaternary International, 2015,(380-381): 327-333.
- [5] 王占礼,王亚云,黄新会,等.黄土裸坡土壤侵蚀过程研究[J]. 水土保持研究, 2004,11(4):84-87.
- [6] 张岩,朱清科.黄土高原侵蚀性降雨特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006,20(6):99-103.
- [7] 崔斌,张瑜,许晓鸿,等.人工模拟降雨条件下坡面产沙规律及侵蚀泥沙颗粒特征研究[J]. 中国水土保持, 2015,(4):43-45.
- [8] 吴淑芳,刘政鸿,霍云云,等.黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J]. 土壤学报, 2015,52(1):48-56.
- [9] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. 农业机械学报, 2015,46(7):162-170.
- [10] 高正,黄介生,曾文治,等.基于SWAT模型的清江长阳段非点源污染及其控制方案研究[J]. 中国农村水利水电, 2016,(9): 174-177.
- [11] 马放,姜晓峰,王立,等.基于SWAT模型的阿什河流域非点源污染控制措施[J]. 中国环境科学, 2016,36(2):610-618.
- [12] 耿润哲,王晓燕,庞树江,等.潮河流域非点源污染控制关键因子识别及分区[J]. 中国环境科学, 2016,36(4):1258-1267.
- [13] 任玮,代超,郭怀成,等.基于改进输出系数模型的云南宝象河流域非点源污染负荷估算[J]. 中国环境科学, 2015,35(8): 1555-1562.

- 2400-2408.
- [14] 李文超, 翟丽梅, 刘宏斌, 等. 流域磷素面源污染产生与输移空间分异特征 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(2): 711-719.
- [15] 罗倩, 任理, 彭文启, 等. 辽宁太子河流域非点源氮磷负荷模拟分析 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 178-186.
- [16] 于兴修, 马骞, 刘前进, 等. 横坡与顺坡垄作径流氮磷输出及其富营养化风险对比研究 [J]. 环境科学, 2011, 32(2): 428-436.
- [17] Ma X, Li Y, Li B, et al. Nitrogen and phosphorus losses by runoff erosion: Field data monitored under natural rainfall in Three Gorges Reservoir Area, China [J]. CATENA, 2016, 147: 797-808.
- [18] Wu X Y, Zhang L P, Yu X X. Impacts of surface runoff and sediment on nitrogen and phosphorus loss in red soil region of southern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(7): 1939-1949.
- [19] 郭燕虹, 张丽萍, 陈儒章, 等. 坡长和雨强对氮素流失影响的模拟降雨试验研究 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 7-12.
- [20] 李中原, 王国重, 屈建钢, 等. 雨强和土地利用方式对豫西南山区有机质流失的影响 [J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 29-33.
- [21] 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.
- [22] Liu Q, Li Z, Li P, et al. Nitrogen loss by runoff and sediment in different vegetation covers/patterns under simulated rainfall conditions [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2013, 22(3): 681-688.
- [23] 陈晓鹏, 周蓓蓓, 陶汪海, 等. 变雨强对黄土坡地水土养分流失机制研究 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 33-37.
- [24] 王丽. 黄土坡地土壤氮磷流失人工降雨模拟实验研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [25] 吴凤至, 史志华, 方怒放, 等. 不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律 [J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2497-2502.
- [26] 刘军, 张正福, 胡燕凌. 应用 DEM 数据进行耕地坡度分级量算方法研究 [J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 691-697.
- [27] 韩勇. 侵蚀性降雨雨型对黄土区浅沟坡面侵蚀特征的影响 [D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- [28] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 104-112.
- [29] 邵莲芬, 曾红彪, 李雄峰, 等. 矿山边坡坡度对降雨入渗与侵蚀过程影响试验 [J]. 人民黄河, 2016, 30(4): 74-78.
- [30] 傅斌, 王玉宽, 朱波, 等. 紫色土坡耕地降雨入渗试验研究 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 39-43.
- [31] 李守升, 张俊云. 降雨强度对黄土边坡入渗性能影响的研究 [J]. 四川建筑, 2009, 29(2): 138-140.
- [32] 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.
- [33] 张会茹, 郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 40-43.
- [34] 陈浩, 王占礼, 刘俊娥, 等. 黄土坡面细沟水流含沙量变化过程试验研究 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 8-11.
- [35] 秦华, 李晔, 李波, 等. 人工模拟降雨条件下石灰土养分流失规律 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 1-4.
- [36] 李瑞玲, 张永春, 刘庄, 等. 太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响 [J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1220-1226.
- [37] 袁溪, 潘忠成, 李敏, 等. 雨强和坡度对裸地径流颗粒物及磷素流失的影响 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3099-3106.
- [38] Foster I D L, Chapman A S, Hodgkinson R M, et al. Changing suspended sediment and particulate phosphorus loads and pathways in underdrained lowland agricultural catchments; Herefordshire and Worcestershire, U.K [J]. Hydrobiologia, 2003, 494(1): 119-126.
- [39] 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.
- [40] 马东, 杜志勇, 吴娟, 等. 强降雨下农田径流中溶解态氮磷的输出特征—以崂山水库流域为例 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(7): 1228-1233.
- [41] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰, 等. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 38(2): 131-140.
- [42] 杨帆, 蒋轶锋, 王翠翠, 等. 西湖北泓流域暴雨径流氮磷流失特征 [J]. 环境科学, 2016, 37(1): 141-147.
- [43] 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.
- [44] 孙彭成, 高建恩, 王显文. 柳枝稷植被过滤带拦污增效试验初步研究 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 2(35): 314-321.
- [45] 王国重, 李中原, 田颖超, 等. 雨强和土地利用对豫西南山区氮磷流失的影响 [J]. 人民长江, 2016, 47(7): 18-22.
- [46] 张攀, 姚文艺, 魏鹤举, 等. 黄丘区坡面细沟流速分布特征试验研究 [J]. 水利学报, 2017, 48(5): 1-7.
- [47] 杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰. 施磷对太湖流域典型蔬菜地磷素流失的影响 [J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 518-523.
- [48] 左继超, 郑海金, 奚同行, 等. 自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征 [J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4178-4186.

作者简介: 彭梦玲(1993-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为非点源污染模拟与控制. 发表论文 1 篇.