

放水冲刷条件下工程边坡产流产沙及氮磷输出特征

樊桐桐, 王冬梅, 张泽洲, 张 鹏, 刘鑫裕

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 为揭示工程堆积体平台汇流造成的水沙及氮磷养分流失特征,以矿区堆土场为研究对象,采用室内放水冲刷试验,研究不同上方来水流量(1.7, 2.3, 2.9 L/min)和坡度(25°, 30°, 35°)下地表径流、壤中流及侵蚀泥沙产生过程,分别测定氮磷养分浓度并计算流失量及贡献占比。结果表明:蒙东地区覆土排土场边坡产流方式主要为地表径流,随坡度和冲刷流量的增大,地表径流量增大,壤中流量减小。产沙量随坡度的增大先增大后减小,侵蚀产沙的临界坡度在 30°附近。地表径流中铵态氮及磷酸盐流失浓度均大于壤中流,硝态氮浓度在冲刷流量较大(2.9 L/min)时低于壤中流。径流中磷酸盐及侵蚀泥沙中氮磷损失均随坡度的增大先增大后减小。冲刷流量越大,地表径流及侵蚀泥沙中的氮、磷流失量越多。径流中养分流失量表现为硝态氮>铵态氮>磷酸盐。侵蚀泥沙是磷酸盐的主要输出途径,占流失总量的 59.69%以上;氮素流失量仅在坡度 30°时表现为侵蚀泥沙中最大,在 25°, 35°坡面,地表径流为氮素的主要流失途径,小流量(1.7, 2.3 L/min)时壤中流输出的氮素次之。

关键词: 径流; 工程边坡; 壤中流; 泥沙; 氮磷流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0101-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.04.014

Characteristics of Runoff, Sediment and Nitrogen and Phosphorus Output of Steep Slope of Abandoned Soil Deposits Under Scouring Flow

FAN Tongtong, WANG Dongmei, ZHANG Zezhou, ZHANG Peng, LIU Xinyu

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In order to reveal the characteristics of runoff and sediment and nutrient loss path of on steep slope caused by platform inflow of engineering soil deposits, a laboratory scouring experiment, designed to have three scouring inflow rates (1.7, 2.3, 2.9 L/min) and three slope gradients (25°, 30°, 35°), was conducted on disposal sites in opencast coal mine to research the processes of surface runoff, interflow and sediment and measure the concentration of nitrogen and phosphorus in these for calculating the nutrient loss and contribution. The results indicated as follows: Surface runoff was the main type of runoff generation in earth-covered engineering slope in eastern Inner Mongolia. With the increase of slope gradient and scouring inflow rates, surface runoff increased but interflow decreased. The sediment yield rose first and then decreased with the increase of slope gradient, and the critical slope gradient was about 30°. The loss concentrations of ammonium nitrogen and phosphate in surface runoff were higher than those in interflow, and the concentrations of nitrate nitrogen were lower when the scouring flow was larger (2.9 L/min). The loss of phosphate in runoff and nitrogen and phosphorus in eroded sediment firstly increased and then decreased with the increase of slope gradient. The loss of nitrogen and phosphorus from surface runoff and sediment increased with the increase of scouring inflow rates. The amount of nutrient loss in runoff was nitrate nitrogen > ammonium nitrogen > phosphate. Erosion sediment was always the main export route of phosphate, accounting for more than 59.69% of the total loss. The maximum nitrogen loss occurred only when the slope gradient was 30°, while on the 25° and 35° slope, surface runoff was the main route of nitrogen loss, at low inflow rates (1.7, 2.3 L/min), the nitrogen output from interflow was the second.

Keywords: runoff; engineering slope; interflow; sediment; nitrogen and phosphorus loss

收稿日期: 2022-12-10

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504604-04)

第一作者: 樊桐桐(1998—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀及生态修复研究。E-mail: 1538305095@qq.com

通信作者: 王冬梅(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持、生态修复研究。E-mail: dmwang@126.com

工程堆积体是因交通、工矿、水利工程等生产建设活动所产生的弃土弃渣堆置而成的一种特殊地貌^[1],具有多级连续的“平台—陡坡”独特构造^[2]。平台汇集的上方来水作为坡面径流能量的传输纽带以及泥沙输移载体,直接作用于坡面,调节径流侵蚀力的分配,加速坡面水土流失的发展,是中国现阶段人为加速水土流失的重要来源^[3]。其次,工程边坡坡度较陡,在 $26^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ^[4],土壤层序混乱,结构松散,降雨和上方来水易沿土层内部垂直或侧向迁移形成壤中流^[2],壤中流的加剧使径流不断填充土壤空隙和软弱结构面,加剧堆积体的变形,对于堆积体的稳定性产生隐患^[2]。同时,径流及其携带的泥沙作为土壤养分流失的重要载体,坡面发生水土流失后往往造成氮磷养分在地表发生横向迁移,或随壤中流造成淋滤损失^[5],加之工程堆积体自身土壤养分贫瘠,保水保肥能力低下^[6],导致植被成活率低,生态恢复困难。

坡度和上方来水流量可以通过影响落在坡面上的有效降雨量及水流能量,改变水流的入渗、径流和输沙量,进而对氮磷流失途径产生影响,影响生态恢复的难度和土壤侵蚀的程度^[7]。随着坡度的增大,地表径流的重力分力增大,阻力系数减小,土壤的抗蚀能力减弱^[8],地表径流量及侵蚀产沙量也逐渐增多^[9]。但有研究^[8]认为,径流剪切力随坡度的增大先增大后减小,导致坡度对产沙量的影响存在临界效应;而 Chen 等^[10]研究表明,地表产流产沙总量随坡度的增大而持续下降。地上、地下径流和侵蚀泥沙是土壤养分损失的主要途径,很多研究表明氮素主要是以硝态氮和铵态氮等无机氮的形式流失^[11],流失途径以地表径流为主^[12];但也有研究^[11]认为,壤中流是氮素的主要流失途径。土壤颗粒对磷具有很强的吸附性^[13],侵蚀泥沙被普遍认为是磷素流失最主要的途径^[14];而 Ma 等^[15]研究表明,大部分磷素随径流迁移,随侵蚀泥沙损失的磷几乎可以忽略。

目前,对于工程边坡的研究主要采用放水冲刷或人工模拟降雨方法,探究其水动力学特性、地表产流产沙过程以及坡面侵蚀形态演变特征等^[8,10]。而上方来水条件下,针对 $>25^{\circ}$ 的工程边坡地上、地下径流和侵蚀泥沙造成的养分淋失与流失特征鲜有研究,给陡坡堆积体的养分损失评估和非点源污染防治带来了挑战,基于生态恢复的实际需求,这一问题亟待解决。因此,本研究以矿区堆土场边坡为研究对象,通过放水冲刷试验,研究薄层径流驱动下堆土场边坡的水土流失及氮磷损失过程,分析不同坡度和冲刷流量下地表径流、壤中流、侵蚀泥沙及其携带的氮磷养分特征,探究养分流失路径,为陡坡工程堆积体土壤养分流失防治及生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验土壤取自内蒙古锡林浩特市胜利矿区($115^{\circ}24'26''\sim 116^{\circ}26'30''E, 43^{\circ}54'15''\sim 44^{\circ}12'52''N$)。将土壤分层(每层 5 cm)装袋并运回室内,风干后过 5 mm 筛去除根系和较大的石块,以保证下垫面的相对均一性,减小试验误差。供试土壤以 >0.05 mm 的细沙为主,pH 为 8.99,土壤容重为 1.36 g/cm^3 ,全氮含量为 1.36 g/kg ,铵态氮含量为 23.23 mg/kg ,硝态氮含量为 22.69 mg/kg ,全磷含量为 0.63 g/kg ,速效磷含量为 9.00 mg/kg 。

试验装置包括变坡径流槽和放水冲刷设备(图 1)。径流槽尺寸为 $2\text{ m}\times 1\text{ m}\times 0.4\text{ m}$,坡度可在 $0\sim 45^{\circ}$ 自由调节。放水冲刷装置主要由蓄水装置、水泵、阀门和水管组成,水泵可以通过阀门控制流量,坡面顶端有稳流槽使水流均匀平稳流入试验土槽,径流槽底端有上下 2 个出水口,分别用于接取坡面径流含沙水样和壤中流水样。

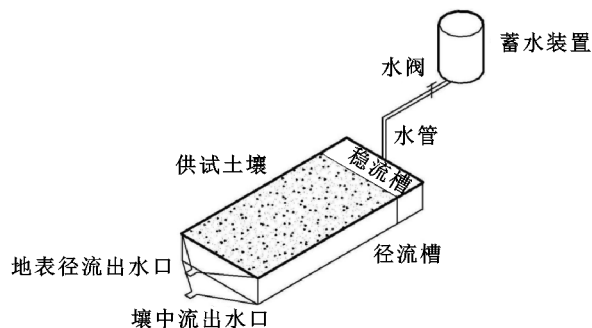


图 1 试验装置示意

1.2 试验设计

根据前人^[4]研究,并结合实地调查数据,矿区堆土场边坡坡度范围在 $25^{\circ}\sim 46^{\circ}$,故本研究设计坡度为 $25^{\circ}, 30^{\circ}, 35^{\circ}$ 。参照锡林浩特市多年降雨情况,设计 60, 80, 100 mm/h 3 种雨强,乘以径流槽投影面积(计算时取平均坡度),得到 1.7, 2.3, 2.9 L/min 3 个流量水平,每次冲刷试验历时 45 min,每场试验重复 3 次,共进行 27 次冲刷试验。

冲刷试验于 2021 年 9—12 月在北京林业大学苗圃进行。装填供试土壤前在土槽底部铺设每层 5 cm 厚的细沙并用纱布隔开,以模拟天然降雨入渗过程。采用分层填土法,每层 5 cm 按照取土顺序依次装填土槽,下层为 5 cm 厚煤矸石层,上层为 30 cm 厚栗钙土层,层与层之间抓毛以防止冲刷过程中发生滑塌,表层 10 cm 不压实只整平,坡面无植被覆盖,用来模拟矿区覆土后工程堆积体边坡土层结构。为保证试验前期含水量一致,采用喷雾器对坡面进行预降雨至坡面即将产流,自然沉降 48 h 后开始正式试验。打开供水装置,调节阀门控制上方来水流量与试验设定水平误差不超过 5%后进行试

验。产流开始后,每隔 5 min 收集该时段内全部径流泥沙样,上方停止来水后坡面径流几乎同步停止,但壤中流继续产流,因此继续收集壤中流样品直至其减少趋势趋于稳定。试验结束后将接取的样品带回实验室,测定地表径流量、产沙量、壤中流量以及三者中的硝态氮、铵态氮和磷酸盐含量。

1.3 样品分析

用全自动间断化学分析仪定水样中养分含量(经 0.45 μm 的滤膜过滤后测定,未能及时测定的加酸保存),其中 NH₄⁺-N 采用水杨酸光度法测定;NO₃⁻-N 采用酚二磺酸分光光度法测定;PO₄³⁻-P 采用磷钼钒黄分光光度法^[16]测定。泥沙样品经过滤、风干后测定其中养分含量,其中 NH₄⁺-N 含量采用 2 mol/L 氯化钾浸提—靛酚蓝比色法进行测定,NO₃⁻-N 含量采用硫酸肼还原—重氮化偶合比色法测定,PO₄³⁻-P 含量采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法^[17]测定。

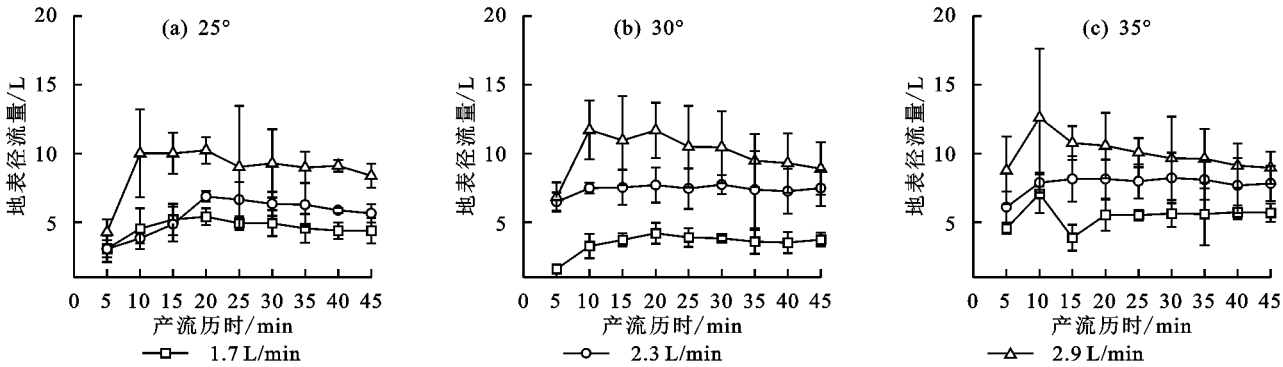


图 2 不同坡度和冲刷流量下地表径流量随冲刷历时的变化

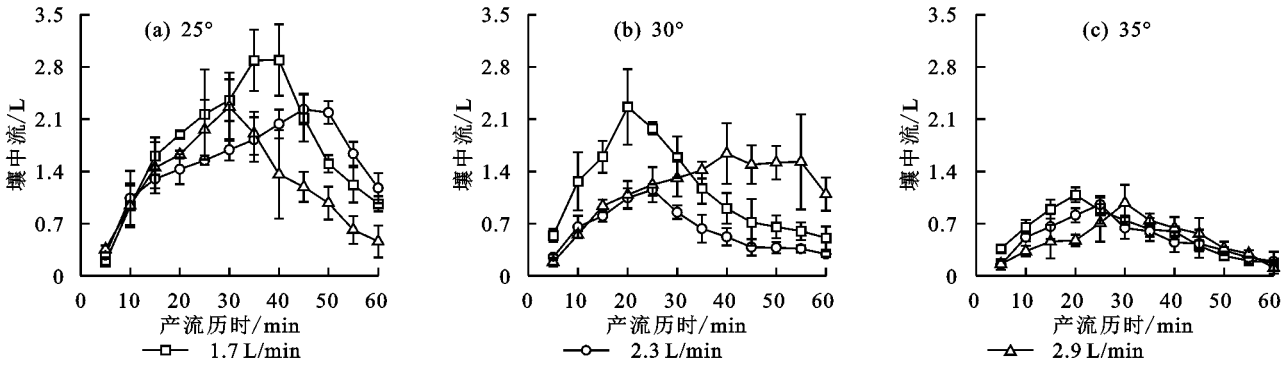


图 3 不同坡度和冲刷流量下壤中流产流过程

表 1 不同坡度和冲刷流量下产流产沙特征

坡度/ (°)	不同冲刷流量下地表径流/L			不同冲刷流量下壤中流/L			不同冲刷流量下产沙量/kg		
	1.7 L/min	2.3 L/min	2.9 L/min	1.7 L/min	2.3 L/min	2.9 L/min	1.7 L/min	2.3 L/min	2.9 L/min
25	41.41±1.43Ac	49.42±1.66Bb	79.34±1.78Ba	20.72±1.24Aa	18.38±0.8Aa	15.11±0.61Ab	0.17±0.01Cb	0.19±0.02Cb	0.95±0.09Ba
30	31.36±2.28Bc	66.52±2.58ABb	89.86±0.69Aa	13.78±1.19Ba	7.31±0.51Bb	13.97±1.87Aa	1.64±0.06Ab	1.91±0.06Ab	3.79±0.35Aa
35	49.23±3Ac	70.05±8.2Ab	90.15±2.32Aa	6.87±0.3Ca	5.98±0.46Ba	5.82±0.2Ba	1.11±0.06Bb	1.34±0.02Bb	3.11±0.4Aa

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示同一冲刷流量不同坡度间差异显著($p<0.05$);同行不同小写字母表示同一坡度不同冲刷流量间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.1.2 坡面产沙特征 不同冲刷流量下的产沙量随产流历时的延长有一定波动性但整体呈下降趋势,其中坡度>30°时 2.9 L/min 冲刷流量下的波动性最强(图 4)。2.9 L/min 时的产沙总量分别比 1.7,2.3 L/min

1.4 数据分析

采用 SPSS 25.0 软件对数据进行单因素方差分析(one-factor analysis of variance)及双因素方差分析(two-way analysis of variance)、多重比较(LSD)和 Pearson 相关性分析,并用 Origin 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同坡度和冲刷流量下产流产沙特征

2.1.1 坡面径流及壤中流产流特征 由图 2、图 3 可知,随着产流历时的延长,地表径流先上升后趋于稳定,壤中流先上升达到峰值后迅速下降。结合表 1 来看,坡度和冲刷流量对地表径流与壤中流的影响不同,随着坡度和冲刷流量的增大,壤中流总量逐渐减小,地表径流量显著增加,当冲刷流量从 1.7 L/min 增至 2.9 L/min 时,25°,30°,35°坡面地表径流量分别增加 7.82,20.63,10.81 L。不同冲刷流量下地表径流量分别占径流总量的 66.65%~87.75%,72.89%~92.13%和 84.00%~93.94%。

增加 131.29%~470.97%和 98.35%~388.28%,1.7,2.3 L/min 产沙量间无显著差异(表 1)。产沙量随坡度的增大表现为先增大后减小,30°坡面分别比 25°和 35°提高 2.99~8.84,0.22~0.48 倍。

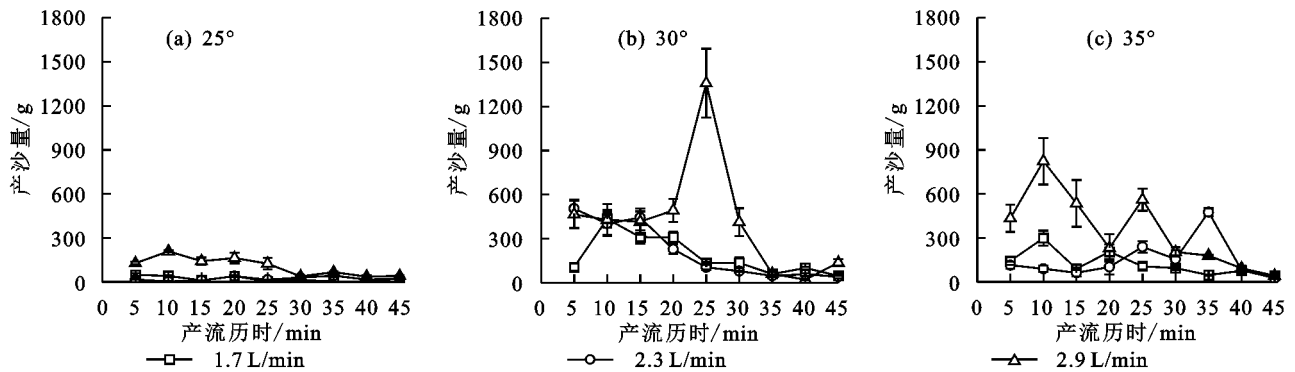


图 4 不同坡度和冲刷流量下产沙过程

2.2 不同冲刷流量和坡度下氮磷流失特征

2.2.1 地表径流及壤中流氮磷流失特征 由图 5、图 6 可知,不同冲刷流量和坡度下,地表径流中铵态氮和硝态氮浓度在产流初期(0~20 min)较高,随后减小并趋于稳定,存在初期冲刷效应(除放水流量为 1.7 L/min 时的铵态氮浓度),而磷酸盐浓度没有明显的规律性;壤中流中的氮、磷浓度均表现为在产流前 30 min 快速升高,30~45 min 逐渐降低,45 min 后又又有不同程度的上升。氮磷流失量均呈先增大后减小最终趋于稳定的趋势(除 35°坡面的硝态氮流失量)。

随着冲刷流量的增大,地表径流中的硝态氮浓度逐渐降低,壤中流中硝态氮浓度升高,并在大流量(2.9 L/min)时较地表径流高 0.10~0.33 mg/L,磷酸盐浓度均表现为 2.9 L/min 时最大。坡度对径流中硝态氮平均浓度的影响规律不明显,铵态氮平均浓度整体上表现为 35°坡面显著大于 25°和 30°,磷酸盐浓度在坡度为 30°时最大,比 25°,35°高 0.007~0.021, 0.001~0.02 mg/L。径流中铵态氮和磷酸盐流失以地表径流为主,分别为壤中流的 1.15~6.06, 1~3.50 倍(表 2)。

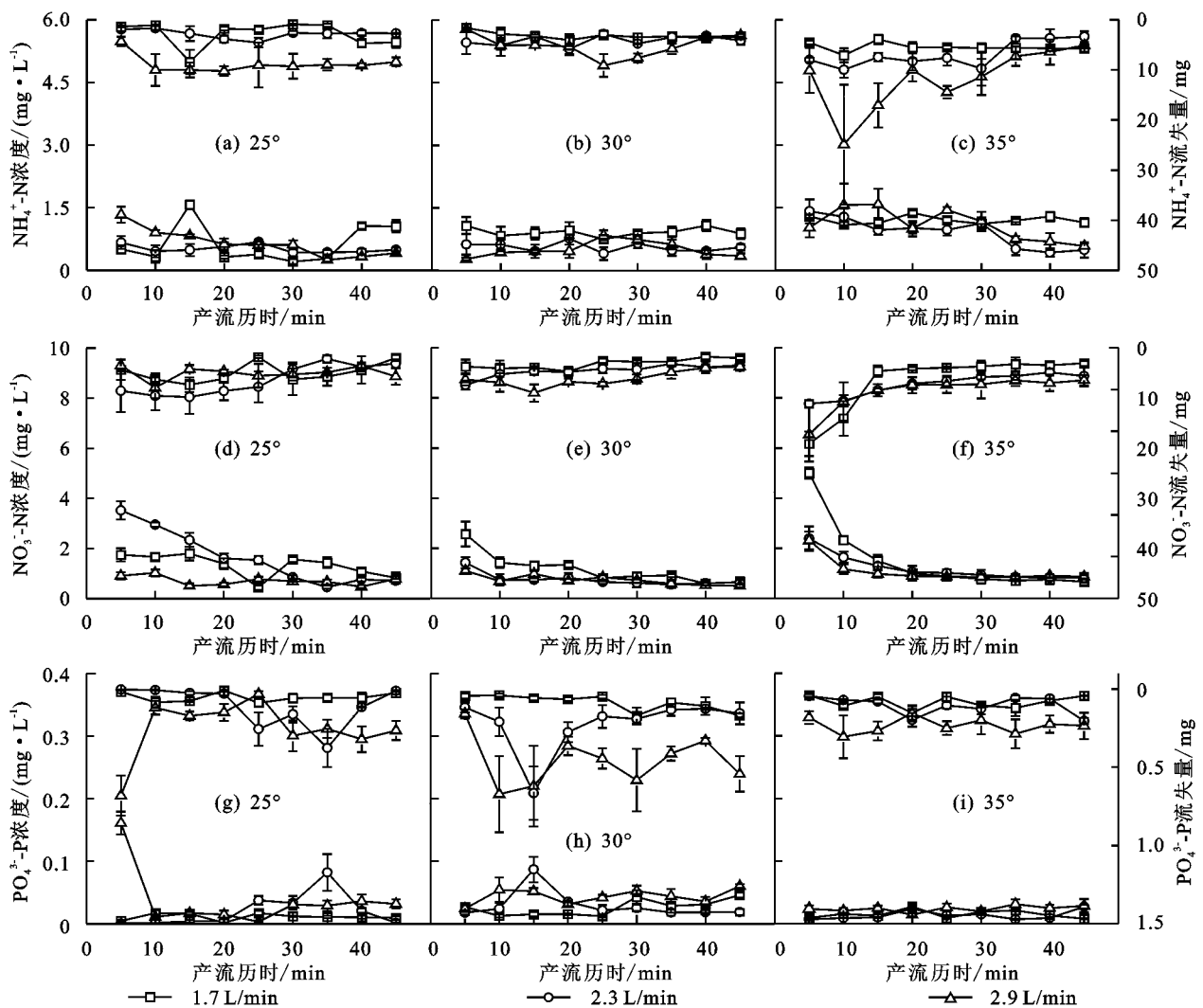


图 5 不同坡度和冲刷流量下地表径流氮、磷输出过程

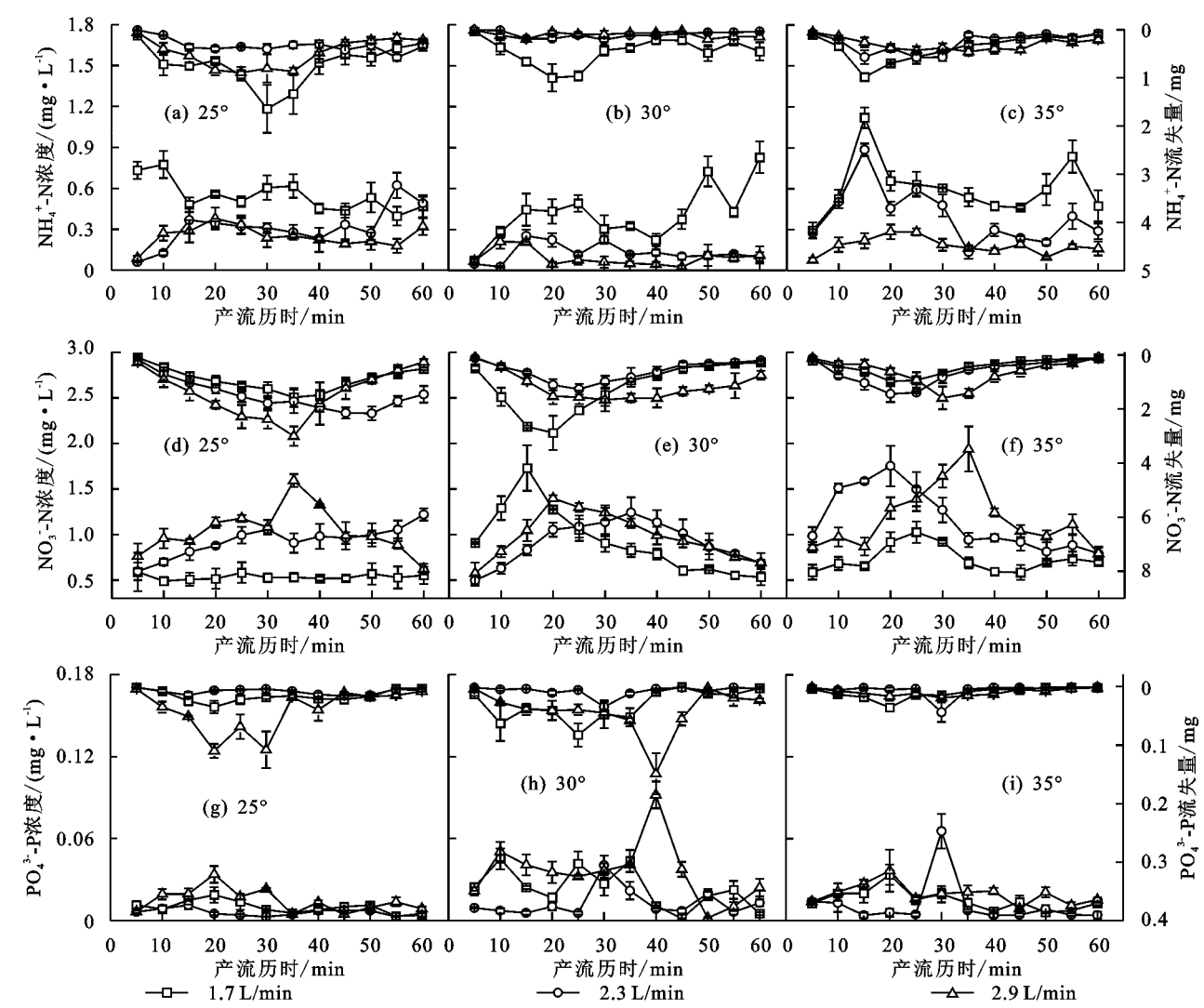


图 6 不同坡度和冲刷流量下壤中流氮、磷输出过程

表 2 不同坡度和冲刷流量下地表径流及壤中流中养分的平均浓度

养分	坡度/ (°)	地表径流中养分平均浓度/(mg·L ⁻¹)			壤中流中养分平均浓度/(mg·L ⁻¹)			地表径流中养分占径流养分浓度比/%		
		1.7 L/min	2.3 L/min	2.9 L/min	1.7 L/min	2.3 L/min	2.9 L/min	1.7 L/min	2.3 L/min	2.9 L/min
NO ₃ ⁻ -N	25	1.33±0.03ABb	1.64±0.02Aa	0.71±0.04Bc	0.54±0.01Cc	0.93±0.02Bb	1.04±0.02Ba	71.12	63.81	40.57
	30	1.16±0.09Ba	0.76±0.09Cb	0.74±0.04Bb	0.92±0.03Aa	0.91±0.01Ba	0.98±0.01Ba	55.77	45.51	43.02
	35	1.51±0.06Aa	1.20±0.08Bb	1.08±0.02Ab	0.73±0.01Bb	1.16±0.07Aa	1.18±0.06Aa	67.41	50.85	47.79
NH ₄ ⁺ -N	25	0.63±0.05Ca	0.52±0.05Ba	0.66±0.02Ba	0.55±0.01Aa	0.31±0.01Bb	0.25±0.01Ac	53.39	62.65	72.53
	30	0.92±0.01Ba	0.56±0.01Bb	0.51±0.02Bc	0.41±0.02Ba	0.13±0.01Cb	0.09±0.02Cb	69.17	81.16	85.00
	35	1.20±0.02Aa	0.91±0.06Aa	1.09±0.14Aa	0.60±0.03Aa	0.40±0.02Ab	0.18±0.02Bc	66.67	69.47	85.83
PO ₄ ³⁻ -P	25	0.011±0.001Bb	0.021±0.004Bb	0.037±0.004Aa	0.010±0Cb	0.006±0.001Bc	0.014±0.001Ba	52.38	77.78	72.55
	30	0.026±0.003Ab	0.030±0.003Ab	0.044±0.003Aa	0.023±0.001Ab	0.013±0.002Ac	0.035±0.002Aa	53.06	69.77	55.70
	35	0.015±0.001Bb	0.013±0.0Bb	0.024±0.002Ba	0.015±0.001Bb	0.012±0.001Ac	0.019±0.001Ba	50.00	52.00	55.81

2.2.2 侵蚀泥沙氮磷流失特征 随着冲刷历时的延长,侵蚀泥沙中的氮磷流失浓度呈波动性变化,流失量在冲刷后期出现下降的趋势(图 7)。由表 3 可知,不同冲刷流量下泥沙中硝态氮和磷酸盐平均浓度均表现为 2.9 L/min>2.3 L/min>1.7 L/min。2.3,2.9 L/min 冲刷流量下硝态氮平均浓度随坡度的增大而减小,铵态氮和磷酸盐随坡度先升高后降低,30°坡面分别是 25°和 35°的 1.04~1.38,1.04~3.39 倍。

2.3 不同坡度和冲刷流量下氮磷养分流失量特征

地表径流、壤中流和侵蚀泥沙造成的氮磷流失量均随冲刷流量的增大而增大(表 4)。不同坡度下,侵蚀泥沙中氮磷流失量表现为坡度 30°>坡度 35°>坡度 25°。对于径流中养分流失量而言,地表径流携带磷酸盐流失量随坡度先增大后减小,铵态氮逐渐增大,坡度 35°时是 25°的 2.20~2.43 倍;壤中流中养分流失量随坡度增大没有明显规律。

结合图 8 来看,工程边坡径流造成的养分流失量表现为硝态氮>铵态氮>磷酸盐。磷酸盐主要随侵蚀泥沙流失,占流失总量的 59.69% 以上。氮素主要流失途径受坡度影响较大,当坡度为 30° 时,氮素流

失量表现为侵蚀泥沙>地表径流>壤中流,从地表输出的氮素占 80% 以上;在 25°, 35° 坡面,地表径流为其主要流失途径,但在小流量(1.7, 2.3 L/min)下壤中流输出的氮素次之,是侵蚀泥沙的 1.40~2.54 倍。

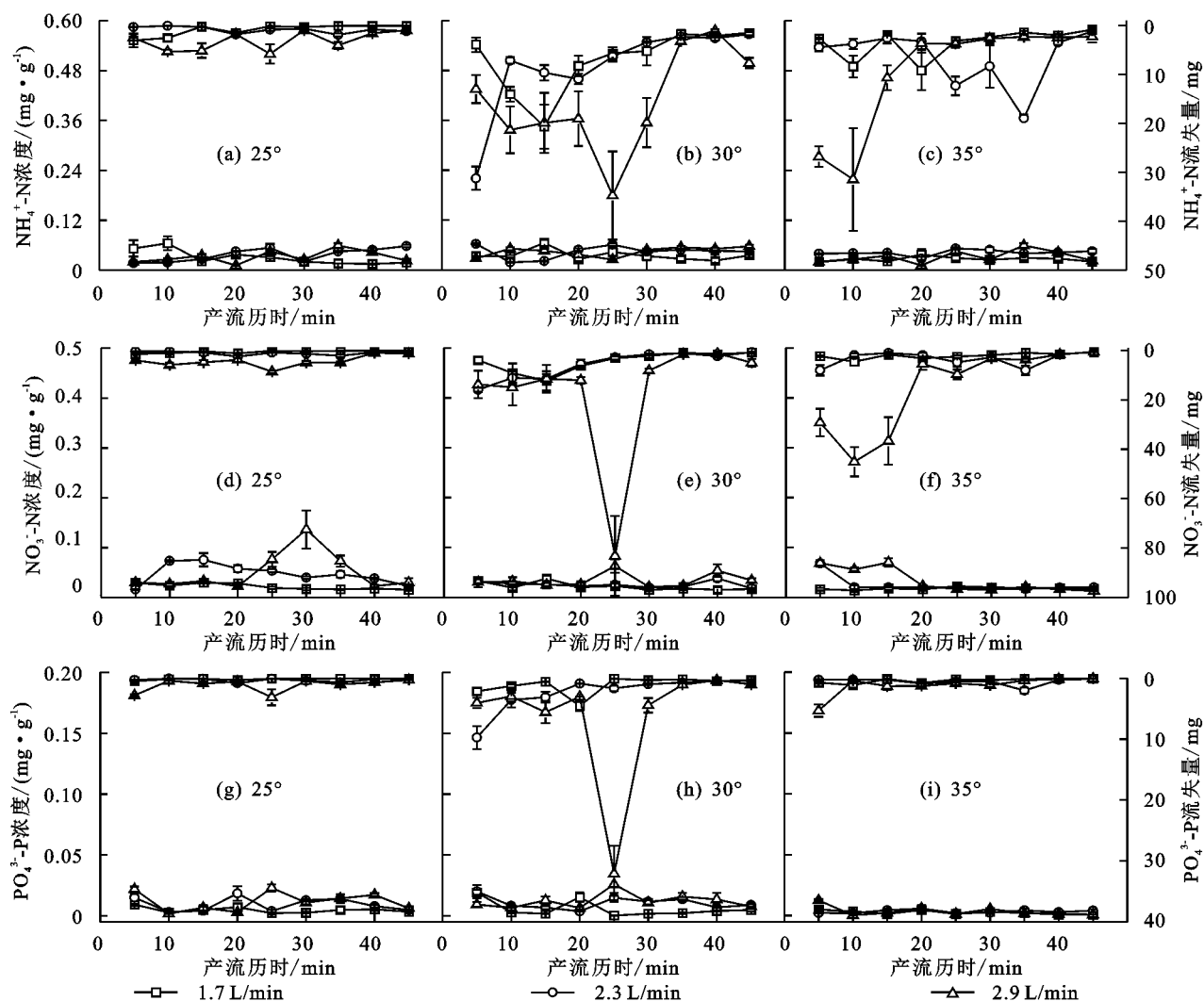


图 7 不同坡度和冲刷流量下泥沙氮、磷输出过程

表 3 不同坡度和冲刷流量下侵蚀泥沙中养分的平均浓度

养分	坡度/ (°)	泥沙养分平均浓度/(mg·g ⁻¹)		
		1.7 L/min	2.3 L/min	2.9 L/min
NO ₃ ⁻ -N	25	22.35±0.83Ab	47.50±3.07Aa	50.49±1.12Aa
	30	22.27±1.55Ab	25.84±1.01Bb	34.46±1.82Ba
	35	18.25±0.96Ac	24.72±0.63Bb	33.51±1.91Ba
NH ₄ ⁺ -N	25	30.71±4.26Aa	37.13±2.07Ba	31.97±0.6Ba
	30	35.30±0.99Ab	43.89±1.62Aa	44.14±0.28Aa
	35	26.42±2.64Ab	42.18±1.31ABa	27.45±4.19Bb
PO ₄ ³⁻ -P	25	4.69±0.07Ab	9.33±1.25Aa	11.64±0.36Aa
	30	5.77±0.61Ab	10.53±1.11Aa	12.07±1.36Aa
	35	2.53±0.47Ba	3.36±0.18Ba	3.56±0.13Ba

2.4 径流量、产沙量及其氮磷流失量综合分析

由表 5 可知,冲刷流量、坡度及二者的相互作用均显著影响工程边坡地表径流、壤中流、侵蚀产沙量及其养分流失量($p < 0.01$)。对上述因素进行相关分析见表 6,结果表明,地表径流量与冲刷流量间具有

极显著相关关系,而侵蚀产沙量与坡度具有极显著正相关关系,壤中流量与坡度呈极显著负相关。径流中各养分流失量与冲刷流量、地表径流量、径流总量相关性显著,其中磷酸盐流失量与侵蚀泥沙量也显著相关。侵蚀泥沙中养分流失量与冲刷流量、地表径流量、侵蚀泥沙量均有极显著相关关系。

3 讨论

3.1 不同坡度和冲刷流量对产流产沙的影响

坡面产流产沙过程受径流冲刷的直接影响^[2]。本研究中,随冲刷流量的增大,地表径流量和产沙量增大,而壤中流量减少,这与已有研究^[18]结果一致。主要原因是冲刷流量增大,使地表径流的挟沙能力高于土壤抗蚀力,坡面形成细沟有利于径流的集中并为其提供通道,导致大部分上方来水快速被排出坡面,同时,这也为输移土壤颗粒提供了载体^[19],造成地表产流量

和产沙量增大、壤中流量减小。本研究中,坡面产流以地表径流为主,这与朱晓锋等^[20]壤中流为主的径流分配方式不同,可能是因为工程边坡坡度较陡,径流流速快^[8],加之细沟侵蚀发育,加速地表径流,减少入渗^[18]。此外,蒙东地区主要覆土层为栗钙土,其中

难溶于水的 Ca^{+} 在水分入渗过程中转化为次生盐,以碳酸钙的形式沉淀在土壤中,形成钙积层附着在土壤团粒表面,钙积层土壤质地紧实、通透性差,干燥时硬度极大,遇水后呈软糊状,导致水分和空气不易穿过^[21],造成壤中流量较小。

表 4 不同坡度和冲刷流量下径流及泥沙的养分流失量

养分	坡度/ (°)	地表径流养分流失量/(mg·h ⁻¹ ·m ⁻²)			壤中流养分流失量/(mg·h ⁻¹ ·m ⁻²)			侵蚀泥沙养分流失量/(mg·h ⁻¹ ·m ⁻²)		
		1.7 L/min	2.3 L/min	2.9 L/min	1.7 L/min	2.3 L/min	2.9 L/min	1.7 L/min	2.3 L/min	2.9 L/min
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	25	35.30±7.36Aa	45.95±2.02Aa	36.03±2.81Ba	7.24±0.30Ab	11.76±0.53Aa	11.21±0.62Aa	2.85±0.14Cb	5.91±0.92Cb	25.58±1.78Ba
	30	22.73±1.33Ac	32.96±2.31Bb	43.94±2.37Ba	9.50±1.17Aa	4.79±0.28Bb	9.30±1.08Aa	26.77±1.99Ab	35.01±2.39Ab	100.89±16.46Aa
	35	47.58±5.01Ab	52.79±2.40Aab	62.85±1.85Aa	3.52±0.13Bb	5.04±0.08Ba	5.02±0.21Ba	12.78±1.12Bb	20.34±1.34Bb	90.17±13.37Aa
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	25	17.18±1.90Bb	16.94±1.24Cb	32.33±1.56BBa	7.27±0.58Aa	4.09±0.11Ab	2.60±0.22Ac	5.20±0.54Cb	5.16±0.95Cb	18.72±3.83Ca
	30	18.77±1.47Bc	24.65±0.60Bb	30.68±1.68Ba	3.65±0.17Ba	0.72±0.09Cb	0.84±0.29Bb	42.25±3.11Ab	50.40±1.98Ab	93.35±8.15Aa
	35	39.50±1.86Ab	41.22±1.81Ab	71.11±8.58Aa	2.88±0.06Ba	1.79±0.21Bb	0.73±0.12Bc	21.23±0.93Bb	38.85±6.94Bb	57.28±0.46Ba
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	25	0.31±0.07Bc	0.65±0.10Bb	1.52±0.08Ba	0.13±0.01Bb	0.07±0.01Ac	0.16±0.01Ba	0.65±0.08Bb	1.59±0.38Bb	6.54±1.03Ba
	30	0.52±0.06Ac	1.36±0.13Ab	2.75±0.23Aa	0.25±0.03Ab	0.06±0.01Ac	0.34±0.03Aa	6.29±0.79Ac	14.05±2.70Ab	36.16±1.67Aa
	35	0.50±0.05ABb	0.63±0.06Bb	1.40±0.06Ba	0.08±0.01Ba	0.05±0.01Ab	0.08±0.02Ca	2.24±0.53Bb	3.25±0.41Bb	7.16±0.93Ba

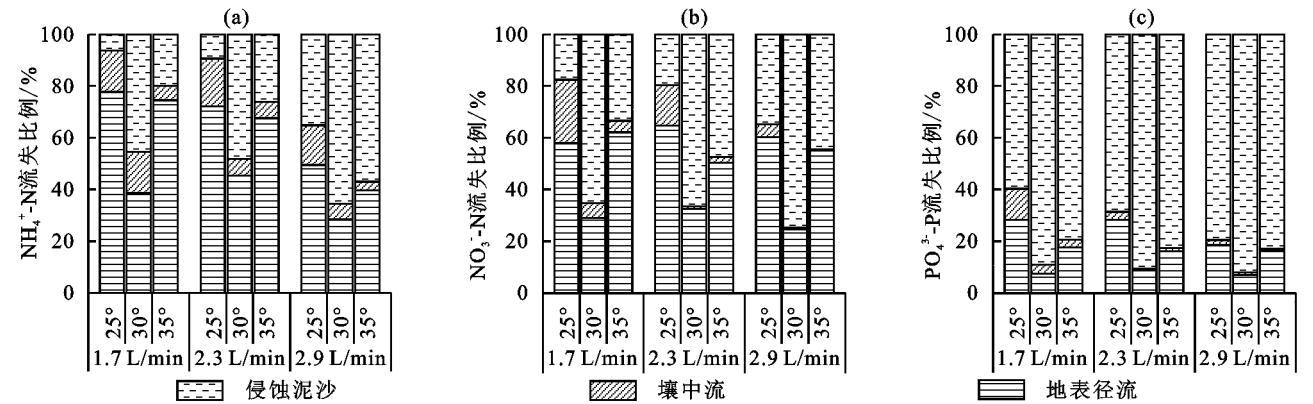


图 8 地表径流、壤中流及侵蚀泥沙氮磷迁移比例

表 5 冲刷流量和坡度对产流产沙及养分流失量影响的双因素方差分析

因子	地表径流		壤中流		产沙量		铵态氮流失量		硝态氮流失量		磷酸盐流失量	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
冲刷流量	11.386	0.001***	117.599	0***	95.917	0***	123.607	0***	17.262	0***	167.299	0***
坡度	139.125	0***	9.081	0.002**	73.334	0***	91.954	0***	53.938	0***	119.156	0***
冲刷流量×坡度	4.906	0.007**	8.100	0.001***	4.804	0.008**	5.580	0.004**	6.650	0.002**	37.737	0***

注:***表示在 0.001 水平(双侧)上显著相关;**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。下同。

表 6 径流及泥沙养分流失量与各指标间的相关性分析

指标	坡度	冲刷 流量	地表 径流量	产沙量	壤中 流量	径流 总量	径流 铵态氮	径流 硝态氮	径流 磷酸盐	泥沙 铵态氮	泥沙 硝态氮
地表径流量	0.259	0.906**									
产沙量	0.490**	0.569**	0.662**								
壤中流量	-0.879**	-0.160	-0.381*	-0.419*							
径流总量	0.026	0.927**	0.964**	0.591**	-0.123						
径流铵态氮	0.664**	0.424*	0.563**	0.432*	-0.623**	0.426*					
径流硝态氮	0.341	0.494**	0.564**	0.255	-0.205	0.547**	0.610**				
径流磷酸盐	-0.018	0.760**	0.738**	0.751**	-0.054	0.777**	0.121	0.153			
泥沙铵态氮	0.437*	0.499**	0.604**	0.966**	-0.380	0.539**	0.246	0.144	0.757**		
泥沙硝态氮	0.345	0.676**	0.717**	0.955**	-0.269	0.693**	0.459*	0.375	0.781**	0.891**	
泥沙磷酸盐	0.050	0.523**	0.552**	0.774**	-0.058	0.576**	-0.051	-0.008	0.914**	0.836**	0.738**

在一定坡度范围内,坡度越大,径流的重力分力越大,在相同的径流冲刷作用下产沙量越多,但当坡度增大到某一临界值后,径流阻力系数增大,克服坡面阻力耗能增多,对土壤的剥离和输送能力下降,造成产沙量随坡度的增大而减小^[10]。本研究中,坡度从 25°增至 30°时,产沙量增大至临界点,但当坡度由 30°增至 35°,产沙量呈下降趋势,说明本研究中工程边坡侵蚀产沙的临界坡度在 30°附近,这与陈晓安等^[22]的研究结果相似。

3.2 不同坡度和冲刷流量下氮磷流失特征

径流是土壤养分流失的主要驱动力,也是养分输出的载体和溶剂^[12],对土壤养分流失有重要影响。已有研究^[9]表明,地表径流中氮、磷养分流失存在明显的初期冲刷效应,本研究中,径流中铵态氮和硝态氮浓度在冲刷初期较高(图 5),但磷酸盐并没有明显的初期冲刷效应,可能是与无机氮离子不同,土壤中可溶态 PO_4^{3-} 含量相对较低,大多数 PO_4^{3-} 与 Fe、Al 等金属阳离子结合形成沉淀,且极难溶解或溶解过程需要一定的时间,短期内对土壤溶液中 PO_4^{3-} 贡献度较低^[23]。本研究泥沙中 PO_4^{3-} 的浓度远高于地表径流和壤中流也有力地说明了这一点。此外,小流量时(1.7 L/min)的铵态氮也未表现出明显的下降趋势,原因可能是小流量时较小的地表径流量与土壤养分的作用程度不高,且由于土壤颗粒的吸附性, NH_4^+ 向水中扩散速度小于 NO_3^- ,故此时铵态氮来不及充分溶解,导致其初期浓度变化不大^[24]。壤中流氮、磷流失浓度与其产流过程曲线相似,但在上方来水停止后(产流 45 min 后),壤中流流量迅速下降,导致其中养分浓度又有略微的上升,该过程与邬燕虹等^[9]的研究结果相似。

本研究中,硝态氮在地表径流中的平均浓度随冲刷流量的增大逐渐降低,但在壤中流以及侵蚀泥沙中逐渐升高,这与 Luo 等^[25]的研究结果类似。主要是因为矿区堆土场微碱性土壤颗粒带负电荷,与同样带负电荷的 NO_3^- 相互排斥,导致 NO_3^- 易随壤中流淋溶至深层^[24];同时,冲刷流量的增大使地表径流流速加快,产流时间缩短,没有足够时间充分溶解 NO_3^- ,而具有更大动能和更强冲刷能力的快速径流将携带大量泥沙颗粒,导致侵蚀泥沙中硝态氮浓度逐渐升高^[26]。此外,在 2.9 L/min 冲刷流量下壤中流携带硝态氮流失浓度高于地表径流,说明对于堆土场边坡地下径流硝态氮流失的预防同样不容忽视。地表径流及侵蚀泥沙中磷酸盐均表现为 2.9 L/min 冲刷流量时最大,这与 Sun 等^[7]的研究结果相似。可能是因为土壤团聚体含有大量的磷,较大的冲刷流量可以提供更大的能量用于破坏团聚体结构,导致土壤团聚体被分解为吸附性更强的细颗粒^[27];同时,此条件下

更大的产流量增强径流与土壤细颗粒之间的相互作用强度,进而增大磷酸盐流失浓度^[13]。与养分流失浓度的变化趋势略有不同,地表径流、壤中流及侵蚀泥沙中的氮磷流失量均随冲刷流量的增大而增大,这与很多研究^[26]结果一致。主要是因为养分流失量是其浓度与径流量共同作用的结果,养分流失量的增大说明地表径流氮素损失受径流量影响大于养分流失浓度,He 等^[28]研究也表明,随径流量的增大,养分流失的控制因素从养分浓度转变为径流量。

坡度通过影响径流流速、切应力等对坡面养分流失产生影响^[26],已有研究^[13]表明,磷酸盐与土壤颗粒间存在专性吸附关系,其流失途径主要为吸附于土壤细颗粒表面随侵蚀泥沙流失,或在径流溶解和冲刷作用下从土壤颗粒中解吸进而流失^[29],因此,磷酸盐损失的本质是径流的冲刷能力和土壤流失程度。本研究中,坡度由 25°增至 35°时,存在径流剪切力和侵蚀产沙量的临界值,导致径流及泥沙中磷酸盐损失量随坡度的增大先增大后减小,说明控制坡面土壤流失对于减缓磷酸盐损失至关重要。有研究^[26]表明,坡度对氮素流失的影响小于冲刷流量,本研究中,各冲刷流量下硝态氮随坡度的增大变化不明显,铵态氮在坡度由 25°增长为 30°时也没有明显变化,但增至 35°时却显著增大,说明坡度 $> 30^\circ$ 时对径流中铵态氮损失的影响逐渐增大。这可能是因为不同于硝态氮受壤中流影响较大,铵态氮主要受地表径流的影响^[30],坡度为 35°时的地表径流量显著大于 25°和 30°,因此导致溶解的铵态氮量明显增加。

3.3 不同坡度和冲刷流量下各养分流失途径特征

已有研究^[16]表明,径流中氮磷流失量表现为硝态氮 $>$ 铵态氮 $>$ 磷酸盐,本研究也得到相似的结论,主要是因为土壤中的铵态氮本身性质不稳定,极易发生硝化反应转化为硝态氮随径流流失^[31]。另外,磷主要以不溶性磷酸盐络合物的形式存在于土壤中,磷酸根极易被土壤颗粒(黏土矿物表面氢氧化物)吸持,被常见的土壤阳离子(Al、Ca、Fe)沉淀,或在一系列化学、生物和物理反应后被微生物固定^[14],因此径流中损失的磷酸盐较少。同时,土壤颗粒对磷的强吸附性也导致土壤剖面对磷具有很强的吸持滤减作用^[12],本研究中,仅有不到 5% 的磷酸盐随壤中流发生淋滤损失,Wang 等^[14]研究也表明,磷素的浓度在土壤剖面 2—4 cm 深度处迅速下降,土壤中的磷很难垂直浸出。这也导致地表侵蚀泥沙成为本研究中磷酸盐的主要输出途径,这与很多研究^[14]结果相同,但与 Ma 等^[15]磷素流失的主要形式是溶解态磷的结果不同,这可能是因为以上研究位于流域内,地表有凋落物及较好的植被盖度,降低径流对坡面的冲刷能

力,从而减少吸附态磷的损失。本研究中,在 25° 、 35° 坡面,各途径氮素流失比例表现为地表径流最高,壤中流次之(在 1.7 、 2.3 L/min 冲刷流量下),是侵蚀泥沙的 $1.40\sim 2.54$ 倍;但当坡度为 30° 时,受到产沙量的影响,氮素输出量表现为侵蚀泥沙 $>$ 地表径流 $>$ 壤中流,说明产沙量的增大导致氮素流失的主要路径改变。总体来看,对堆土场坡面磷素流失的防治应以控制坡面土壤流失为主,对于氮素输出的控制主要应减少地表及地下径流的产生。

4 结论

(1)蒙东地区覆土排土场边坡产流方式主要为地表径流,随冲刷流量的增大,地表径流及泥沙量逐渐增大,壤中流量逐渐减小。排土场边坡侵蚀产沙的临界坡度在 30° 附近。

(2)地表径流中铵态氮及磷酸盐流失浓度始终大于壤中流、硝态氮浓度在冲刷流量较大(2.9 L/min)时表现为壤中流高于地表径流。随冲刷流量增大,地表径流及侵蚀泥沙中的氮磷流失量逐渐增大。坡度对径流中氮素损失的影响小于磷素,磷酸盐损失表现为随坡度的增大先增大后减小。

(3)径流中养分流失量表现为硝态氮 $>$ 铵态氮 $>$ 磷酸盐。泥沙中养分输出主要受产沙量控制。侵蚀泥沙始终是磷酸盐的主要输出途径,氮素流失量在坡度 30° 时表现为侵蚀泥沙 $>$ 地表径流 $>$ 壤中流,在 25° 、 35° 坡面,地表径流为氮素的主要流失途径,小流量(1.7 、 2.3 L/min)时壤中流输出的氮素次之。对于矿区堆土场边坡养分流失的防治应结合临界坡度配置相应措施以减少坡面水土流失,同时,应兼顾对于地下径流氮素输出的预防。

参考文献:

- [1] Hu J M, Ye B Y, Bai Z K, et al. Remote sensing monitoring of vegetation reclamation in the Antaibao Open-Pit Mine[J]. Remote Sensing, 2022, 14(22): e5634.
- [2] 牛耀彬, 吴旭, 高照良, 等. 降雨和上方来水条件下工程堆积体坡面土壤侵蚀特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 69-77.
- [3] Zhang L T, Gao Z L, Yang S W, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap[J]. Catena, 2015, 128: 108-121.
- [4] Gilley J E, Gee G W, Bauer A, et al. Runoff and erosion characteristics of surface-mined sites in western North Dakota[J]. Transactions of the ASAE, 1977, 20(4): 697-700.
- [5] Wang G Q, Wu B B, Zhang L, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses

- under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2014, 514: 180-191.
- [6] Lou Y C, Wu T, Sun G F, et al. Effect of combined rainfall and inflow on soil erosion of spoil tips[J]. Journal of Soils and Sediments, 2022, 22: 2229-2245.
- [7] Sun L Y, Zhou J L, Cai Q G, et al. Comparing surface erosion processes in four soils from the Loess Plateau under extreme rainfall events[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(4): 520-531.
- [8] 白玉洁, 张凤宝, 杨明义, 等. 急陡黄土坡面薄层水流水力学参数变化特征[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 641-649.
- [9] 郭燕虹, 张丽萍, 邓龙洲, 等. 坡面氮素流失的坡度和雨强效应模拟研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 27-33.
- [10] Chen T, Shu J S, Han L, et al. Modeling the effects of topography and slope gradient of an artificially formed slope on runoff, sediment yield, water and soil loss of sandy soil[J]. Catena, 2022, 212: e106060.
- [11] Huang R, Gao X S, Wang F H, et al. Effects of bio-char incorporation and fertilizations on nitrogen and phosphorus losses through surface and subsurface flows in a sloping farmland of Entisol[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 300: e106988.
- [12] 王荣嘉, 高鹏, 李成, 等. 模拟降雨下麻栎林地地表径流和壤中流及氮素流失特征[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2732-2740.
- [13] Wang L Q, Liang T, Zhang Q. Laboratory experiments of phosphorus loss with surface runoff during simulated rainfall[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70: 2839-2846.
- [14] Wang L Q, Liang T, Chong Z Y, et al. Effects of soil type on leaching and runoff transport of rare earth elements and phosphorous in laboratory experiments[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2011, 18(1): 38-45.
- [15] Ma X, Li Y, Li B L, 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.
- [16] 黄薇, 王冬梅, 李平, 等. 青海高寒区典型植被地表径流及氮磷流失特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 92-100.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 42-50.
- [18] Yi X S, Dai Q H, Yan Y J, et al. Effects of concentrated flow changes on runoff conversion and sediment yield in gently sloping farmland in a karst area of SW China[J]. Catena, 2022, 215: e106331.
- [19] Sun J M, Huang C H, Han G N, et al. Effects of cover on soil particle and associated soil nutrient redistribution on slopes under rainfall simulation[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(2): 729-740.

- 坡度坡耕地水保措施的适宜性分析[J].资源科学, 2009, 31(12): 2157-2163.
- [15] 罗先启, 葛修润. 滑坡模型试验理论与实践[M]. 北京: 水利电力出版社, 2008.
- [16] 许峰, 蔡强国, 吴淑安. 等高植物篱在南方湿润山区坡地的应用: 以三峡库区紫色土坡地为例[J]. 山地学报, 1999, 17(3): 193-199.
- [17] 赵娅君, 吴发启, 徐宁, 等. 不同雨强下各生育期玉米坡耕地的侵蚀产沙研究[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 23-28, 35.
- [18] Liu P L, Tian J L, Zhou P H, et al. Stable rare earth element tracers to evaluate soil erosion[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 76(2): 147-155.
- [19] Zhang X C, Liu G, Zheng F L. A simple enrichment correction factor for improving erosion estimation by rare earth oxide tracers[J]. Vadose Zone Journal, 2017, 16(12): 1-10.
- [20] 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.
- [21] 贾莲莲, 刘雅丽, 朱冰冰, 等. 不同草带空间分布对坡面细沟侵蚀调控机制[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 145-148, 153.
- [22] 龙琪, 韩剑桥, 何育聪, 等. 黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及形态分异特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 1-7.
- [23] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 黄土坡面细沟侵蚀形态试验[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5514-5521.
- [24] 湛芸, 何丙辉, 练彩霞, 等. 三峡库区陡坡根—土复合体抗冲性能[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5173-5181.
- [25] 杨维鸽, 郑粉莉, 王占礼, 等. 地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 572-581.
- [26] 王全辉, 胡国庆, 董元杰, 等. 磁性示踪条件下坡面土壤侵蚀产流、产沙及侵蚀空间分异特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 21-23, 28.
- (上接第109页)
- [20] 朱晓锋, 陈洪松, 付智勇, 等. 喀斯特灌丛坡地土壤—表层岩溶带产流及氮素流失特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2197-2206.
- [21] 席沁. 典型栗钙土区工程造林地土壤钙积次生化及适宜造林技术探究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [22] 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.
- [23] 王光火, 朱祖祥. pH 对土壤吸持磷酸根的影响及其原因[J]. 土壤学报, 1991, 28(1): 1-6.
- [24] 王建中, 刘凌. 坡面氮、磷流失特征分析及预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(4): 359-363.
- [25] Luo C Y, Gao Y, Zhu B, et al. Sprinkler-based rainfall simulation experiments to assess nitrogen and phosphorus losses from a hillslope cropland of purple soil in China[J]. Sustainability of Water Quality and Ecology, 2013, 1/2: 40-47.
- [26] Wu L, Qiao S S, Peng M L, et al. Coupling loss characteristics of runoff-sediment-adsorbed and dissolved nitrogen and phosphorus on bare loess slope[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(14): 14018-14031.
- [27] Vaezi A R, Abbasi M, Keesstra S, et al. Assessment of soil particle erodibility and sediment trapping using check dams in small semi-arid catchments[J]. Catena, 2017, 157: 227-240.
- [28] He Z G, Weng H X, Wu T, et al. Impact of moving rainfall events on hillslope pollutant transport[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(7): 5989-5999.
- [29] 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.
- [30] 陈晓安, 杨洁, 郑太辉, 等. 赣北第四纪红壤坡耕地水土及氮磷流失特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 162-167.
- [31] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China[J]. Ambio, 2010, 39: 376-384.