

径流冲刷条件下冻融坡面产沙时空分布

张凯, 王瑄, 周丽丽, 鲍永雪

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110161)

摘要: 为确定冲刷条件下冻融坡面侵蚀产沙时空分布特征, 利用稀土元素(REE)示踪技术, 采用 2 个坡度(10° , 15°), 4 个初始解冻深度(2, 5, 10, 15 cm), 4 个流量(4.5, 6.5, 8.5, 10.5 L/min)进行径流小区冲刷试验, 分析冻融坡面侵蚀产沙时空变化规律。结果表明: 相同初始解冻深度条件下土壤侵蚀产沙量随着坡度和流量的增大而增大, 坡面第 1 坡段发生侵蚀最大, 占总产沙量的 68.24%, 第 3 坡段产沙量一直趋于平稳状态; 坡度相同时, 侵蚀产沙量随着起始解冻深度和流量的增大而增大; 冻融坡面侵蚀产沙量沿坡面方向和沿土壤深度方向逐渐降低; La 元素示踪区产沙量随时间变化呈先增大后减小的趋势, 其他各稀土元素示踪区产沙量随侵蚀时间变化的趋势与 La 元素示踪区产沙量的变化趋势基本一致。

关键词: 冻融坡面; 初始解冻深度; 稀土元素示踪技术; 产沙量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0139-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.022

Spatio-temporal Distribution of Slope Sediment Yield in Under the Condition of Freezing and Thawing

ZHANG Kai, WANG Xuan, ZHOU Lili, BAO Yongxue

(College of water conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161)

Abstract: In order to determine the temporal and spatial distribution of slope soil erosion and sediment yield under the condition of freeze-thaw cycle, rare earth element (REE) tracing technology was used in the study. Specifically, two gradients (10° , 15°), four initial thawing depths (2, 5, 10 and 15 cm) and four water flows (4.5, 6.5, 8.5 and 10.5 L/min) were designed to analysis the temporal and spatial variation of soil erosion and sediment yields. The results showed that the soil erosion and sediment yield increased with the increase of gradient and flow under the condition of the same initial thawing depth. The harvest soil erosion occurred in the first slope segment, which accounted for 68.24% of the total sediment yield, while the sediment yield was steady in third slope segment. The erosion and sediment yield increased with the increase of initial thawing depth and flow under the same slope gradient. The erosion and sediment yield reduced gradually with the slope and soil depth directions in freeze-thaw slope; In the La element tracer area, the sediment yield increased firstly, and then decreased, in other element tracer areas, the change of sediment yield was basically consistent with that of the La element tracer area.

Keywords: freezing and thawing slope; initial thawing depth; rare earth element tracing technology; sediment yield

近年来, 稀土元素示踪技术被广泛应用于土壤坡面侵蚀和泥沙来源等方面的研究, 为水土流失定量研究提供了一种精度较高的方法^[1]。目前, 对于该方法的研究和应用已取得了丰富的研究成果。丁文峰等^[2]对几种坡面土壤侵蚀测量方法进行比较研究发现 REE 示踪法具有其他测量方法无法比拟的优势,

它可以给出坡面任意断面在侵蚀过程中某一时刻的侵蚀量。杨春雨^[3]、Stevens 等^[4]对中子活化分析技术的基本原理做了详细的介绍。尚佰晓等^[5]对 REE 示踪技术及示踪元素布设方法进行了探讨。Polyakov 等^[6]利用 REE 示踪研究了流域泥沙运移过程。Michaelides 等^[7]研究坡面突变处的侵蚀泥沙迁移、

沉积及时空演变规律,研究发现,在上坡段坡度大于下坡段时,坡面形态的改变通过坡面上端的切蚀传播引起的,然后慢慢切割示踪区,最终导致泥沙在坡面突变处沉积。王瑄等^[8]采用 3 个坡度(15°,18°,21°)和 3 个流量(3.5,4.5,5.5 L/min)交叉组合进行室内冲刷试验,并利用 REE 示踪法系统分析细沟发生和发展过程,研究发现坡面上部细沟侵蚀最为剧烈。赵艳茹等^[9]利用变坡土槽模拟降雨试验,研究发现含沙量随坡度增加呈先增加后减小趋势,24°为临界坡度。郑良勇等^[10]将 REE 元素沿坡面垂直分层布设并结合室内模拟降雨试验,研究了次降雨条件下面蚀和细沟侵蚀的转变和动态发育过程。周丽丽等^[11]、刘佳等^[12]分别通过室内模拟试验,研究了白浆土和黑土解冻期土壤侵蚀特征,结果表明由于冻融作用,坡面解冻不完全,降雨侵蚀力较强,导致坡面土壤侵蚀严重。范昊明等^[13]通过野外模拟融雪水冲刷试验,研究了土壤侵蚀量与融水量和解冻深度间的关系,结果表明解冻深度对土壤侵蚀量的影响非常显著。

尚佰晓等^[14]通过沿坡面垂直分段和分层结合布设不同稀土元素,采用室内放水冲刷试验系统,分析了各坡段侵蚀产沙量和侵蚀率变化过程。刘彦辰等^[15]通过室外放水试验研究了不同初始解冻深度对坡面土壤剥蚀率影响关系。王爱娟等^[16]采用可变坡的 3 m×1 m 土槽进行人工降雨和放水冲刷试验,对紫色土坡面的产流产沙特征进行了研究。尚佰晓等^[17]利用放水冲刷试验得出水流中的泥沙含量来源于水流对土壤的剥蚀,即当水流剪切力大于土壤临界剪切力时土壤颗粒被剥蚀。李聪等^[18]通过土槽放水冲刷试验并结合稀土元素(REE)示踪技术,采用沿坡面分层分段布设方式,基于坡面不同部位产沙贡献率的动态变化规律,得出细沟侵蚀水平方向发展速率大于垂直方向发展速率的结论。据彤军等^[19]提出利用 REE 示踪法不仅可以准确地测定坡面不同地形部位的相对侵蚀量,还可通过对侵蚀过程样的分析,较为客观揭示降雨侵蚀过程中坡面各部位相对侵蚀量的时空变化趋势。王瑄等^[20]采用不同流量和坡度的径流冲刷试验结合 REE 示踪法分析了坡面径流冲刷条件下侵蚀产沙的时空分布规律。综上所述,目前对于稀土元素示踪技术和冻融坡面土壤侵蚀研究已取得相当优异的成果,多集中在降雨条件下的土壤侵蚀产沙过程研究,对冻融条件下坡面侵蚀产沙规律研究较少,因此本试验在冻融坡面上进行径流冲刷试验,结合稀土元素示踪技术对坡面侵蚀产沙分布规律进行研究,探索坡面各个部位侵蚀产沙变化规律,为冻融坡面的土壤侵蚀的进一步研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在沈阳市沈河区东陵路沈阳农业大学水利学院综合试验基地水土保持室外径流小区进行,位于北纬 41°44′,东经 123°27′,海拔 44.7 m。试验小区坡面为裸坡,坡面朝向为西,坡度设计 10°和 15°两个水平,试验土壤采用当地土,土壤类别为棕壤土,土壤颗粒组成以中砂粒土(0.5~0.25 mm)和细砂粒土(0.25~0.05 mm)为主,分别占 45.26%和 41.27%。试验前将土壤风干并过边长为 10 mm 的筛孔,除去植物根系和块石等杂物。

1.2 试验设计

采用 10°和 15°两个坡度,4 个流量(4.5,6.5,8.5,10.5 L/min),4 个初始解冻深度(2,5,10,15 cm)进行径流冲刷试验,试验设计如表 1 所示。

表 1 试验设计

坡度/ (°)	解冻 深度/cm	流量/(L·min ⁻¹)				
10	2	4.5	6.5	8.5	10.5	
	5	4.5	6.5	8.5	10.5	
	10	4.5	6.5	8.5	10.5	
	15	4.5	6.5	8.5	10.5	
15	2	4.5	6.5	8.5	10.5	
	5	4.5	6.5	8.5	10.5	
	10	4.5	6.5	8.5	10.5	
	15	4.5	6.5	8.5	10.5	

本试验在长 8 m,宽 1 m,深 0.4 m 的土槽内进行,把土槽从上到下分成 4 段,每段长 2 m,选用镧(La)、铈(Ce)、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镨(Pr) 7 种稀土元素,其布设如图 1 所示。将 7 种稀土元素的粉末状氧化物与土壤逐级稀释混合,配置好示踪土样,在 2015 年 11 月初按照设计要求逐层填示踪土样并压实,土壤容重控制在 1.26 g/cm³。

本试验于 2016 年 3 月 15 日开始,3 月 22 日结束,冲刷期间室外温度平均 2°,冲刷用水为当地井水(冰水混合物),水温在 0~4 °C。冲刷过程由水泵向定水头供水箱供水,使水箱保持满状态以稳定水压,采用阀门控制流量,用水表计时标定流量,水流经过稳流槽均匀流入土槽,土槽底端设置集流槽,采集坡面径流和泥沙。2 月中旬在坡面上铺设棉被,其上盖遮阴网,防止坡面解冻过快。试验开始前,用测针监测坡面上、中、下 3 个坡段解冻深度,当坡面平均解冻深度达到设计值时开始试验。试验开始后观测记录径流冲刷过程中细沟产生的位置及时间,试验过程中用钢尺每分钟在 6 个固定位置量(坡上、坡中、坡下各两点)测坡面径流深度及宽度,每分钟接取 1 个径流泥沙样,为避免冲刷时间过长导致土壤下部冻层融化过多而影响试验结果,整个试验过程持续约 10~15 min,因室外

径流小区条件有限,故本试验无重复。每次试验后,用量筒测定各个泥沙样品的体积,用置换法测定各个样品的泥沙量,并用 105 ℃烘箱烘干 12 h。将样品烘干均匀混合后,利用网格法取 100 g 研磨后过 100 目筛,最后取 100 mg 的样品,样品中 REE 实际浓度分析是在北京原子能科学研究院原型微反应堆上采用 INAA(仪器中子活化分析)方法进行。

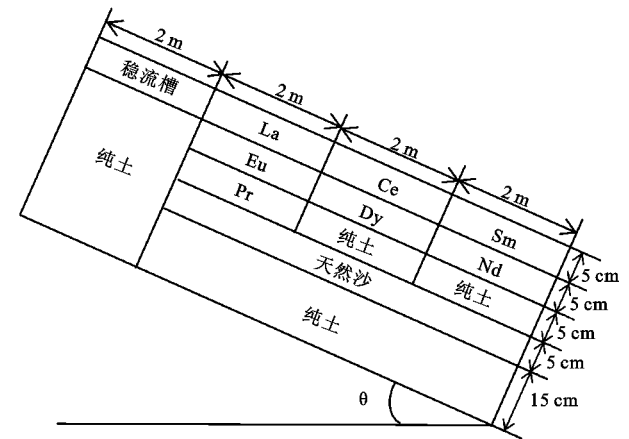


图 1 稀土元素示踪区布设示意

1.3 计算方法

通过分析各个泥沙样品中各稀土元素含量,坡面各稀土元素示踪区不同时段 的产沙量计算公式为:

$$A_j = \frac{K_j B_j}{R_j}, j=1,2,3,\cdots,n \tag{1}$$

$$E_j = W \times \frac{C_j - B_j}{A_j}, j=1,2,3,\cdots,n \tag{2}$$

式中: A_j 为第 j 种元素的施放浓度(mg/kg); K_j 为检测灵敏度的保证系数; B_j 为第 j 重元素的土壤背景值(mg/kg); R_j 为第 j 种稀土元素施放部位相对侵蚀量的最小期望值; E_j 为第 j 种元素的施放区的产沙量(g); W 为每个样品的总泥沙量(g); C_j 为泥沙中

第 j 种元素的浓度(mg/kg)。
在本试验中,为提高分析精度,综合保证系数各层修正为: $K_{La}=2.5, K_{Eu}=3, K_{Ce}=3, K_{Nd}=3, K_{Sm}=3, K_{Dy}=3, K_{Pr}=3$ 。
各层的相对侵蚀量最小期望值由上到下依次取: $R_{La}=0.2, R_{Eu}=0.2, R_{Ce}=0.3, R_{Nd}=0.4, R_{Sm}=0.5, R_{Dy}=0.4, R_{Pr}=1$ 。

各示踪元素的土壤背景值: $B_{La}=30\text{ mg/kg}, B_{Eu}=1\text{ mg/kg}, B_{Ce}=70\text{ mg/kg}, B_{Nd}=28\text{ mg/kg}, B_{Sm}=5.2\text{ mg/kg}, B_{Dy}=4.6\text{ mg/kg}, B_{Pr}=7.5\text{ mg/kg}$ 。

2 结果与分析

2.1 坡面产沙量随时间变化特征

2.1.1 各坡段产沙量随时间变化特征 由图 2 可知,在相同坡度、流量、不同初始解冻深度的条件下,各坡段产沙量随时间变化呈先增大后减小,最后趋于稳定的变化趋势,前 7 min 变化较明显。在第 3 min 时,第 1 坡段产沙量最大值达到 1.302 kg;第 2 坡段产沙量最大值达到 0.41 kg;在第 5 min 时,第 3 坡段产沙量最大值达到 0.33 kg;第 7 min 之后,各坡段产沙量逐渐趋于稳定,是因为此时坡面侵蚀深度达到未解冻层,沿坡面垂直方向产沙减少,侵蚀细沟开始向两侧发展,剥蚀泥沙能力减弱,所以产沙量逐渐趋于稳定。在整个坡面冲刷试验过程中,第 1 坡段发生细沟侵蚀,产沙量变化规律最为剧烈,产沙较多,为主要产沙坡段,第 2、第 3 坡段主要为面蚀,产沙量较少。因为进入第 1 坡段水流为清水,势能较大,水流剥蚀泥沙能力强,所以第 1 坡段为主要泥沙侵蚀坡段。随着初始解冻深度的逐渐增大,坡面各坡段产沙量也逐渐增大,坡面侵蚀越严重。

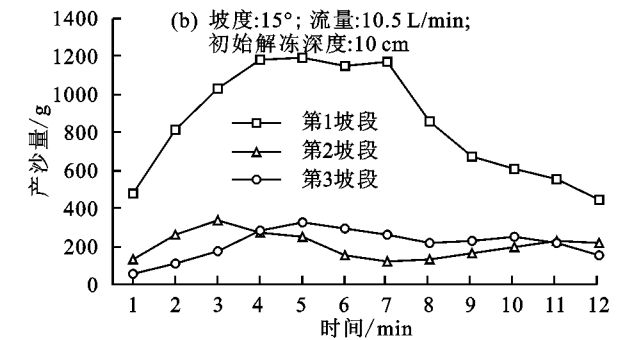
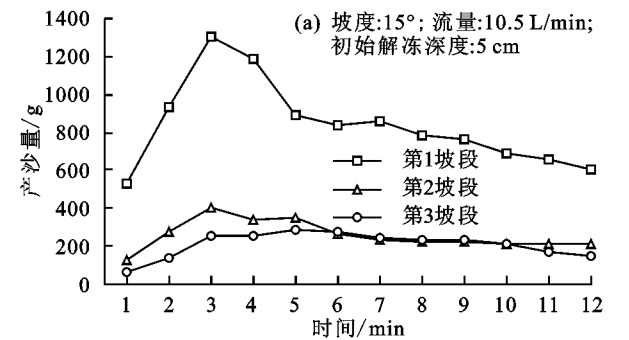


图 2 各坡段产沙量变化规律

2.1.2 坡面产沙量随时间变化特征 由图 3 可知,不同坡度、流量和解冻深度下,前 3 min 产沙量都比较小,且逐渐增加,是因为在前 3 min 坡面产生面蚀,故产沙量较小;4 min 时产沙量达到最大,之后随时间增加而逐渐降低,是因为当产沙量达到最大值时水流含沙量接近饱和,进而使水流对土壤的剥蚀能力降

低,产沙量随之减少,当水流含沙量达到饱和时,水流不在剥蚀土壤,因此水流的含沙量趋于稳定。从试验观察中可以看出,随着坡面侵蚀细沟的逐渐加深,径流宽逐渐减小,细沟的沿土层深度方向产沙能力逐渐减弱。坡面产沙量的计算值与实测值曲线变化趋势一致,接近重合。

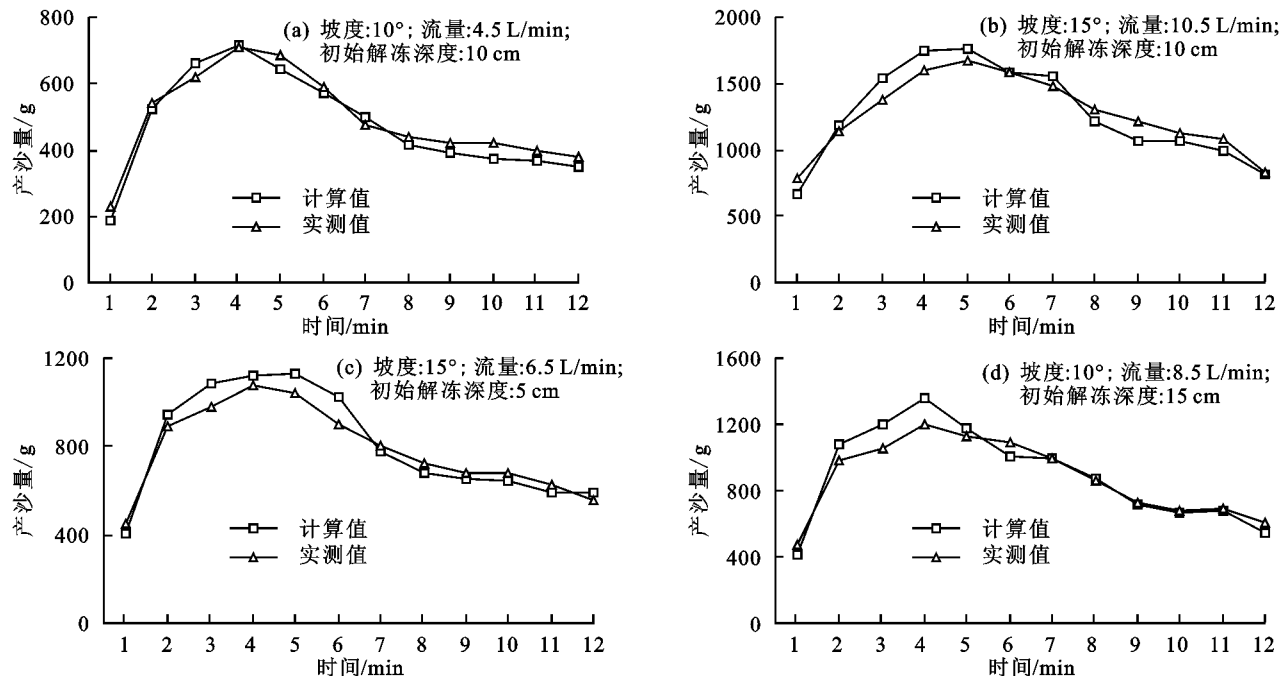


图3 坡面产沙量随时间变化关系

2.2 坡面产沙量随空间变化特征

2.2.1 坡面产沙量沿土层深度方向变化特征 在径流冲刷条件下,只有第1坡段发生细沟侵蚀,第2坡段为面蚀,因此仅对第1坡段研究产沙量沿土层深度方向的变化特征。由于在初始解冻深度为2 cm时,La元素示踪区下层是冻土状态,水流只能侵蚀到La元素示踪区,因此在研究坡面沿土层深度方向产沙规律时不对解冻深度为2 cm进行分析。由图4可知,各稀土元素示踪区对应第1坡段从上到下的第1至2层产沙量可以看出,在相同坡度和流量条件下,不同初始解冻深度下,各稀土元素示踪区产沙量变化趋势基本一致,呈先增大后减小趋势。第3—6 min时,第1层La元素示踪区产沙量达到最大值1.302 kg,侵蚀深度达到5 cm,开始侵蚀第2层Eu元素示踪区,由于初始解冻深度未达到第2层Eu元素示踪区,其为冻土状态,所以第1层La元素示踪区侵蚀细沟达到5 cm时,第2层Eu元素示踪区只有少量土壤被侵蚀;第7 min左右第2层Eu元素示踪区产沙量达到最大值0.813 kg,此时侵蚀深度在10 cm左右,达到第3层Pr元素示踪区,且开始产沙,11 min左右,第1层La元素示踪区产沙量趋近于零,说明第1层La元素示踪区形态稳定。当流量较大时,细沟的发展过程为直接形成细沟,与李聪等^[18]研究结论一致。当从侵蚀细沟中观测到坡面底部的纱布时,说明侵蚀深度达到15 cm,水流到达土层底部,试验停止。从上述试验过程可以得知,第1坡段产沙量从第1层到第3层呈逐渐减小的趋势。

从图4中还可以看出,La元素示踪区为第1坡段主要泥沙侵蚀区。随着初始解冻深度的增加,相同

条件下各稀土元素示踪区的产沙量逐渐增加,由此可见,在放水冲刷冻融坡面过程中,初始解冻深度是坡面侵蚀产沙的重要因素。在解冻深度为15 cm时,将第1坡段各示踪区产沙量分别相叠加,并与第1坡段产沙量累计值相比,La元素示踪区产沙量占第1坡段总产沙量的53.75%,Eu元素示踪区产沙量占第1坡段总产沙量的29.91%,Pr元素示踪区产沙量占第1坡段总产沙量的16.34%。各稀土元素示踪区产沙量都有峰值产生,且沿土层深度方向峰值越来越小,是因为随着水流不断入渗,细沟的逐渐加深,径流宽减小,细沟的下切产沙能力逐渐减弱,水流主要侵蚀产沙部位逐渐下移,侵蚀能力逐渐减弱。

2.2.2 坡面产沙量沿坡面方向变化特征 由表3可知,在同一初始解冻深度条件下,各坡段产沙量随流量的增大而增大,第1坡段产沙量最大,远远超过同一坡度或同一流量条件下第2坡段和第3坡段的总产沙量。经分析,在同条件下,第1坡段产沙量>第2坡段产沙量>第3坡段产沙量,第1坡段产沙量占总产沙量的62%~71%,第2坡段产沙量占总产沙量的15%~22%,第3坡段产沙量占总产沙量的7%~17%,第1坡段、第2坡段的、第3坡段的平均产沙量比例为5:3.6:1。这个结果说明坡面在径流冲刷过程中,产沙区域主要发生在坡面上坡段,而坡面下坡段由于坡面上坡段和坡面中坡段的泥沙堆积,没有产生细沟或仅产生面蚀,所以产沙量很小,结合径流冲刷试验后对坡面形态的观测,与上述产沙量分布趋势与实际状况相符。从表3还可以看出,计算值与实测值平均误差不超过10%。

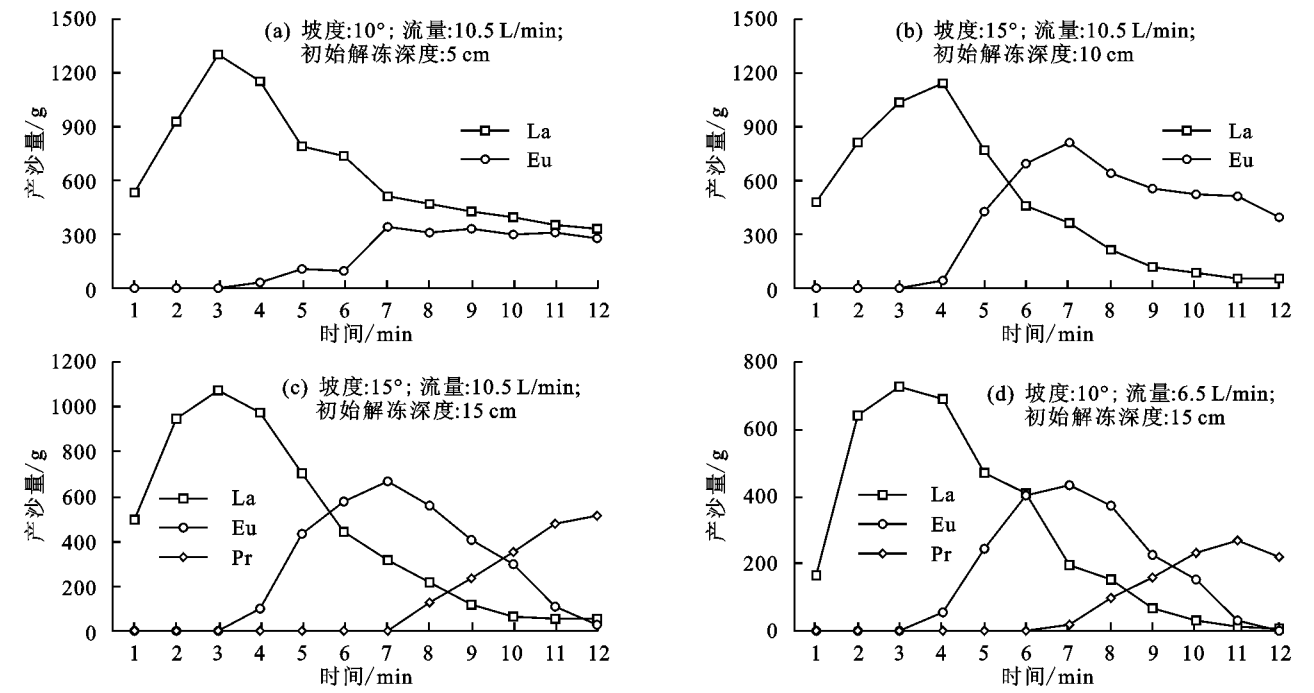


图 4 各稀土元素示踪区沿土层深度方向产沙量与时间关系

表 3 坡面各坡段产沙量

解冻深度/cm	坡度/°	流量/(L·min ⁻¹)	第 1 坡段产沙量/g	第 2 坡段产沙量/g	第 3 坡段产沙量/g	坡面产沙量计算值/g	坡面产沙量实测值/g	相对误差/%
2	15	4.5	4144.43	1465.09	475.36	6084.88	6064.40	0.34
		6.5	6659.97	2105.63	1109.71	9875.31	9210.50	7.22
		8.5	8023.21	2462.01	1745.56	12230.78	11178.00	9.42
		10.5	10397.81	3226.01	2277.02	15900.84	15157.10	4.91
	10	4.5	3268.50	1010.17	349.64	4628.32	4764.40	2.86
		6.5	5466.87	1745.06	930.57	8142.50	7910.50	2.93
		8.5	6481.26	2011.98	1017.11	9510.35	9328.00	1.95
		10.5	8936.89	2672.30	1968.43	13577.62	12937.10	4.95
5	15	4.5	5064.76	1534.93	766.00	7365.69	6923.00	6.39
		6.5	6321.78	2080.63	1242.85	9645.25	9404.00	2.57
		8.5	7786.12	2695.86	2065.40	12547.37	12199.70	2.85
		10.5	10038.88	3075.23	2512.92	15627.04	14919.90	4.74
	10	4.5	3930.83	1122.32	574.60	5627.76	5443.00	3.39
		6.5	5438.22	1714.87	1163.89	8316.97	8664.00	4.01
		8.5	6435.90	2240.40	1682.82	10359.11	10399.70	0.39
		10.5	8085.14	2660.25	2079.58	12824.98	13049.90	1.72
10	15	4.5	4700.98	1332.30	1021.57	7054.85	7214.20	2.21
		6.5	6163.09	1592.44	1363.23	9118.75	9036.90	0.91
		8.5	7475.30	2040.22	1751.48	11267.00	10906.10	3.31
		10.5	10182.05	2450.78	2573.53	15206.35	15219.30	0.09
	10	4.5	3800.99	1076.88	817.51	5695.39	5914.20	3.70
		6.5	5561.24	1438.26	1243.74	8243.25	8406.90	1.95
		8.5	6790.68	1790.45	1690.64	10271.76	10346.10	0.72
		10.5	9467.17	2419.46	2306.68	14193.32	13869.30	2.34
15	15	4.5	5640.36	1260.05	1151.66	8052.06	7736.68	4.08
		6.5	6780.78	1532.49	1455.04	9768.31	9129.50	7.00
		8.5	8552.28	1852.21	1894.37	12298.86	11221.50	9.60
		10.5	10347.43	2369.09	2445.82	15162.34	14115.20	7.42
	10	4.5	4371.71	1012.33	853.90	6237.94	6306.68	1.09
		6.5	6478.35	1462.12	1397.72	9338.19	9169.50	1.84
		8.5	7283.89	1751.94	1692.36	10728.19	10491.50	2.26
		10.5	9142.91	2197.29	1920.77	13260.98	12685.20	4.54

3 结论

(1)不同解冻深、坡度和流量下,坡面产沙量的计算值与实测值随时间的变化规律基本一致,平均误差不超过 10%。

(2)在放水冲刷冻融坡面过程中,第 1 坡段产沙量沿土层深度方向从第 1 层到第 3 层呈逐渐减小的变化趋势,La、Eu 及 Pr 元素示踪区产沙量分别占第 1 坡段总产沙量的 53.75%,29.91%,16.34%,可以看出产沙量主要来自第 1 层 La 元素示踪区。

(3)在相同坡度、初始解冻深度下,随着流量的增加,各坡段产沙量随之增大。第 1 坡段、第 2 坡段、第 3 坡段的平均产沙量比例为 5:3.6:1,坡面第 1 段产沙量最大,是坡面侵蚀泥沙的主要来源。

(4)在相同坡度、流量下,随初始解冻深度的增加,坡面各坡段产沙量随之增大,坡面侵蚀越严重,初始解冻深度是影响坡面侵蚀产沙的重要因素之一。

参考文献:

- [1] 汤振权,刘刚,许文年.稀土元素示踪技术及其在土壤侵蚀研究中的应用[J].中国稀土学报,2011,29(5):515-522.
- [2] 丁文峰,张平仓,王爱娟,等.几种坡面土壤侵蚀测量方法的比较研究[J].长江科学院院报,2015,32(11):14-18.
- [3] 杨春雨.稀土元素示踪法对黑土侵蚀过程的应用研究[D].长春:东北师范大学,2007.
- [4] Stevens C J, Quinton J N. Investigating source areas of eroded sediments transported in concentrated overland flow using rare earth element tracers[J]. Catena, 2008, 74(6):31-36.
- [5] 尚佰晓,王瑄,王莉.利用 REE 示踪技术研究土壤侵蚀的进展[J].核农学报,2008,22(1):111-115.
- [6] Polyakov V O, Kimoto A, Nearing M A, et al. Tracing sediment movement on a semiarid watershed using rare earth elements[J]. Soil Science Society of America Jour-

nal, 2009, 73(5):1559-1565.

- [7] Michaelides K, Lbraim L, Nord G, et al. Tracing sediment redistribution across a break in slope using rare earth elements[J]. Earth Surface Process landforms, 2010, 35(5):575-587.
- [8] 王瑄,李占斌,尚佰晓.利用 REE 示踪法分析坡面放水冲刷的侵蚀过程[J].沈阳农业大学学报,2008,39(2):218-222.
- [9] 赵艳茹,王瑄,丘野,等.模拟降雨下土壤剥蚀率和水流含沙量的关系[J].水土保持学报,2010,24(5):97-100.
- [10] 郑良勇,李占斌,李鹏,等.稀土元素示踪坡面次降雨条件下的侵蚀过程[J].农业工程学报,2010,26(3):87-91.
- [11] 周丽丽,范昊明,武敏,等.白浆土春季解冻期降雨侵蚀模拟[J].土壤学报,2010,47(3):574-578.
- [12] 刘佳,范昊明,周丽丽,等.春季解冻期降雨对黑土坡面侵蚀影响研究[J].水土保持学报,2009,23(4):64-67.
- [13] 范昊明,武敏,周丽丽,等.草甸土近地表解冻深度对融雪侵蚀影响模拟研究[J].水土保持学报,2010,24(6):28-31.
- [14] 尚佰晓,王瑄,李占斌,等.稀土元素示踪坡面冲刷侵蚀过程的室内模拟试验研究[J].中国稀土学报,2008,26(4):510.
- [15] 刘彦辰,王瑄,周丽丽,等.冻融坡面土壤剥蚀率与侵蚀因子关系分析[J].农业工程学报,2016,32(8):136-141.
- [16] 王爱娟,丁文峰,王万君.人工降雨和放水冲刷条件下紫色土坡面产流产沙特征分析[J].长江科学院院报,2015,10(3):31-34.
- [17] 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.
- [18] 李聪,李鹏,李占斌,等.REE 示踪坡面径流侵蚀演变过程试验研究[J].水土保持学报,2014,28(3):19-22,28.
- [19] 据彤军,刘普灵.坡面侵蚀分布特征动态变化过程的 REE 示踪法研究[J].核农学报,2005,19(1):58-61.
- [20] 王瑄,李占斌.坡面水蚀输沙动力过程试验研究[M].北京:科学出版社,2009.

(上接第 138 页)

- [4] 白更,严海军,王敏.喷洒水滴直径面粉测定法改进[J].农业机械学报,2011,42(4):76-80.
- [5] 吴光艳,郝民利,刘超群,等.天然降雨与人工降雨特性的研究[J].人民珠江,2013,18(1):48-51.
- [6] 罗琳,王忠静,刘晓燕,等.黄河流域中游典型支流汛期降雨特性变化分析[J].水利学报,2013,44(7):848-855.
- [7] 吴光艳.陕西杨凌人工林内外天然降雨雨滴特性[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [8] 吴光艳,吴发启,尹武君,等.陕西杨凌天然降雨雨滴特性研究[J].水土保持研究,2011,18(1):48-51.
- [9] 赵嘉莹,张富,郭嘉,等.南小河沟流域侵蚀沟道特征研究[J].人民黄河,2016,38(3):76-79.
- [10] 郭东静,陈锡云,马晶,等.基于雨滴谱的人工降雨系统

效能评估[J].水土保持学报,2015,29(4):85-90.

- [11] 王友生.北京山区典型小流域土地利用森林植被变化的水文生态响应研究[D].北京:北京林业大学,2013.
- [12] 罗德,余新晓,董磊.密云山区林冠层对天然降雨能量影响的初步研究[J].水土保持学报,2008,22(3):60-63.
- [13] 李维,余新晓,岳永杰.黄土地区主要树种的林冠降雨特征分析[J].中国水土保持科学,2009,7(2):42-47.
- [14] 万龙,马芹,张建军,等.黄土高原降雨量空间插值精度比较—KRIGING 与 TPS 法[J].中国水土保持科学,2011,9(3):79-87.
- [15] 尚佰晓,王瑄,陶伟,等.沈阳市天然降雨雨滴特征研究[J].水土保持研究,2008,15(6):139-141.