

水蚀过程中土壤重金属元素的迁移特征

徐蝶^{1,2}, 赵士杰^{1,2}, 蔡雄飞^{1,2}, 王济^{1,2}, 谢刚³, 郁鑫杰^{1,2}, 赵帅^{1,2}

(1.贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2.贵州省喀斯特山地生态环境
国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550001; 3.贵州省山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001)

摘要: [目的] 探索水蚀过程坡耕地表层土壤重金属元素迁移特征, 为中国喀斯特水土侵蚀地区的土壤质量保护和防控重金属元素迁移扩散研究提供指导。[方法] 用人工模拟降雨试验, 研究不同雨强(50, 70, 90, 120 mm/h), 不同坡度(10°, 15°, 20°和 25°)下坡耕地表层土壤重金属元素(Cu, Ni, Cd 和 Cr)随径流及侵蚀过程中的迁移特征。[结果] ①产流产沙量随降雨强度、坡度的增加而增加并逐渐趋于稳定, 不同降雨强度和坡度下产沙量临界坡度为 20°。②表层土壤重金属在侵蚀过程中主要以颗粒态形式存在, 且迁移量与降雨强度成正比。在雨强 120 mm/h 和坡度 20°下, 颗粒态重金属最先达到流失量峰值; 溶解态重金属随降雨强度呈波动变化, 除溶解态 Ni 在 50 mm/h 下达到最大变化范围 0.004 4 mg/L, Cu, Cd 和 Cr 均在 70 mm/h 达到流失最大变化范围, 其中 Cr 变化范围最大(为 0.009 8 mg/L)。溶解态重金属流失量随坡度变化无明显规律。③颗粒态重金属流失量与产沙量拟合结果显示 Cr($R^2=0.99$)的拟合度好, 因此产沙量可以较好地预测颗粒态 Cr 的流失量。[结论] 20°是产沙量的临界坡度, 重金属迁移主要以颗粒态形式迁移且产沙量与重金属元素(Cu, Ni, Cd 和 Cr)拟合效果好, 说明重金属元素(Cu, Ni, Cd 和 Cr)与产沙量之间存在较强的相关性。

关键词: 坡耕地; 水土侵蚀; 模拟降雨; 重金属迁移

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0083-10

中图分类号: S157.2, X53

文献参数: 徐蝶, 赵士杰, 蔡雄飞, 等. 水蚀过程中土壤重金属元素的迁移特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 83-92. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.012; Xu Die, Zhao Shijie, Cai Xiongfei, et al. Migration characteristics of heavy metals in soil during water loss process [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 83-92.

Migration Characteristics of Heavy Metals in Soil During Water Loss Process

Xu Die^{1,2}, Zhao Shijie^{1,2}, Cai Xiongfei^{1,2}, Wang Ji^{1,2}, Xie Gang³, Yu Xinjie^{1,2}, Zhao Shuai^{1,2}

(1.School of Geographic and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang,

Guizhou 550025, China; 2.The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of

Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China; 3. Guizhou Institute of Mountain Resources, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] The migration characteristics of heavy metals in the surface soil of sloping farmland during water erosion process were analyzed in order to provide guidance for soil quality protection and for defense strategies against heavy metal migration and diffusion in karst soil erosion areas in China. [Methods] A simulated rain experiment was used to study loss characteristics of heavy metals (Cu, Ni, Cd, and Cr) from runoff and erosion in farmland under different slope conditions (10°, 15°, 20°, and 25°) and rainfall intensities (50, 70, 90, and 120 mm/h). [Results] ① Initial runoff and sediment yield increased with increasing of rainfall intensity and slope, then tended to gradually become stable. The critical slope for sediment yield was 20° under different rainfall intensities and slopes; ② Heavy metals mainly existed in granular form in the erosion process of topsoil, and migration amount was proportional to rainfall intensity. Heavy metal loss in granular form first reached a peak value under a rainfall intensity of 120 mm/h and a slope of 20°. Dissolved heavy metals varied with rainfall intensity, except for dissolved Ni that reached a

收稿日期: 2021-07-23

修回日期: 2021-09-29

资助项目: 贵州科技计划支撑计划项目“喀斯特山区坡耕地作物套种模式的水土保持机理研究”(2019]1231); 贵州省教育厅学科建设经费“环境科学与工程学术学位点建设资金”(2021)

第一作者: 徐蝶(1999—), 女(汉族), 贵州省毕节市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: wangji@gznu.edu.cn.

通信作者: 蔡雄飞(1982—), 男(汉族), 贵州省盘县人, 博士, 副教授, 研究生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持教学与研究。Email: wangji@gznu.edu.cn.

maximum variation range of 0.0044 mg/L at 50 mm/h. Cu, Cd, and Cr all reached a maximum variation range of loss at 70 mm/h, and the maximum variation range of Cr was 0.0098 mg/L. The loss of dissolved heavy metals had no obvious relationship with slope change. ③ The heavy metal particle loss was related to sediment yield, and the high coefficient of determination for Cr ($R^2 = 0.99$) indicated that sediment yield could well predict Cr particle loss. [Conclusion] 20° is the critical slope for sediment yield, and that migration of heavy metals is mainly in granular form. The fitting effect between sediment yield and heavy metal elements (Cu, Ni, CD, and Cr) is good, indicating that there is a strong correlation between heavy metal elements (Cu, Ni, CD, and Cr) and sediment yield.

Keywords: sloping farmland; soil and water erosion; simulated rainfall; heavy metal migration

水土流失问题是影响人类社会可持续发展的全球性环境问题之一,世界上大约 90% 的农业土地受到轻微或严重的侵蚀^[1]。根据 2018 年贵州省水土保持公报,全省水土流失面积为 48 268.16 km²,占土地面积 27.40%。云贵高原区是中国六大水蚀区之一^[2],山地丘陵在云贵高原区水蚀区广泛分布,使得坡耕地成为重要的耕地资源。由于中国水蚀区重金属矿藏丰富,人类开采重金属行为频繁,重金属开采和冶炼过程中,废气、废水、废渣排放易造成坡耕地土壤重金属污染^[3-4];此外,重金属还会通过径流或降雨进入土壤中可能造成土壤重金属污染且其在土壤中移动性差、滞留时间长、不能被微生物降解^[5]。因此,坡耕地一旦发生重金属污染,径流和坡度都会成为重金属污染物运移的主要动力不仅会造成土壤质量下降同时也增加了重金属污染风险。

土壤水蚀是世界范围广泛分布的土壤侵蚀类型。土壤水蚀包括在雨滴击溅、地表径流冲刷等作用下发生的土壤矿物质和有机土壤颗粒的剥蚀、运移和沉积等方式^[6]。中国西南喀斯特地区是著名的重金属元素地球化学异常区^[4,7],有关喀斯特重金属可能带来的问题受到广泛学者的关注。近年来,科研工作者对喀斯特重金属污染特征及风险评价^[8],重金属含量特征^[9],重金属污染物来源解析^[10],土壤重金属富集特征^[11]和土地利用方式对土壤重金属的影响等^[12]领域开展了研究。在喀斯特地区,人类活动及自然降雨可能造成土壤侵蚀情况严重,重金属会随土壤侵蚀发生迁移。Liu 等^[13]对雨强、产流产沙与重金属元素的迁移进行研究,得到重金属元素往往在雨滴打击和径流冲刷作用下伴随着径流和泥沙进行迁移,且侵蚀量和元素迁移量与降雨强度成正比;杨洋等^[14],王衡等^[15]采用模拟降雨研究的土壤重金属流失规律发现颗粒态重金属流失量占到重金属流失总量的 80% 以上并被认为是重金属流失的主要途径。

综合已有研究发现^[16-19],针对不同雨强和不同坡度情景下喀斯特地区的重金属迁移效应研究较少。因此,本研究选择典型的喀斯特地区坡耕地为研究对

象,进行一系列人工降雨模拟试验,探究不同坡度和雨强下水蚀过程中坡耕地土壤重金属迁移特征,以期为中国喀斯特水土侵蚀地区的土壤质量保护和防控重金属元素迁移扩散指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区域位于贵州省贵阳市白云区某坡耕地(106°39'18"E,26°42'26"N),属于亚热带湿润季风气候,年降雨量可达(800~1 500 mm),位于某铝厂附近。

供试土壤,0—20 cm 的表层土壤作为模拟降雨试验土壤。供试土壤类型为贵州省主要耕地土壤类型^[20],黄壤土,pH 值为 7.38,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 40.10%,34.85%和 25.05%。表层土壤重金属含量及重金属背景值见表 1。

表 1 样品重金属含量及贵州省重金属背景值 mg/kg

项目	Ni	Cr	Cu	Cd
样品重金属含量	12.51	97.31	18.66	0.28
贵州省重金属背景值	33.70	86.60	25.70	0.13

1.2 室内模拟降雨试验

1.2.1 试验装置 模拟降雨试验模拟降雨装置为上海城市规划设计总院设计的大型人工模拟降雨系统(NLJY-10),主要由降雨器和试验钢槽构成,包括 6 组喷嘴。喷嘴降雨高度为 2~6 m,有效降雨面积为 6.0 m×9.0 m,降雨均匀度高于 86%。降雨设备调节精度为 0.1 mm/h,调节变化时间低于 30 s,所模拟雨滴粒径、降雨过程等与自然降雨十分接近。模拟降雨试验土槽为手动变坡土槽,规格为长 1.2 m×宽 0.8 m×高 0.40 m,坡度在 5°~40°可调,土槽下端设有集流槽,用于收集径流泥沙。

1.2.2 试验设计 在本试验中,模拟降雨事件持续时间为 60 min 且降雨模拟器中产生的风暴的性质与相应强度的自然风暴相似。基于气象统计资料、结合贵州省不同暴雨频率^[21]再根据水土保持综合治理规

划通则(GB15772-2008),结合岩溶地区地形地貌特征^[22]分别设计相应的降雨强度和坡度(详见表 2)。试验于 2020 年 8 月 4 日至 2020 年 10 月 11 日进行降雨试验与分析,坡面土地利用方式为裸坡。供试土壤风干后,剔除石块、植物根茎等杂物,过筛后按照 1.22 g/cm^3 的田间土壤容重标准填装土槽将土层分为 20 cm 和 10 cm,填土过程中保证容重均一性,土槽边缘土壤用手指反复按压处理,防止在试验过程中土槽周围出现裂隙影响试验结果,初始含水量设定在 15% 左右,装填完成后,整平土壤表面,调试管路系统和模拟降雨系统,进行降雨预试验。

本研究中所使用的土壤于 2020 年 7 月 9 日采集于贵阳市白云区位于某铝厂的某坡耕地。将试验土槽底端填 3 cm 厚的粗砂,参考坡耕地容重进行模拟土壤的填装填土厚度 30 cm。根据设计的 5 个雨强分别对 10° , 15° , 20° 以及 25° 坡面进行模拟,进行交叉

模拟降雨试验,每次试验更换表层 10—12 cm 厚度新土。同一雨强每个坡度处理连续降雨 3 场,每场降雨间隔 24 h 即每场降雨设置 3 场平行试验,共计 60 场降雨,具体试验见表 3。每次降雨,观察坡面记录初始产流时间 t_p ,产流开始后每 5 min 接一次样,用专用集流瓶收集每个时间段的径流样品,直至降雨结束。将每个时间段收集到的径流量分别转移至 1 L 量筒中,测定该时间段产流量。泥沙量的测定按照《水土保持试验规范》执行,即测定接取水沙样总质量后澄清,沉淀物经过 24 h 以上的沉淀后沉淀在瓶中,过滤上层清液将泥沙烘干并称重。

表 2 室内模拟降雨试验参数设计

项目	模拟降雨场次				
	1	2	3	4	5
坡度($^\circ$)	10	15	20	25	—
降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	30	50	70	90	120

表 3 室内模拟降雨试验设计

降雨场次	降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	坡度/ $(^\circ)$	进行重金属过程监测	降雨场次	降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	坡度/ $(^\circ)$	进行重金属过程监测
1	30	10		11	70	20	√
2	30	15		12	70	25	√
3	30	20		13	90	10	√
4	30	25		14	90	15	√
5	50	10	√	15	90	20	√
6	50	15	√	16	90	25	√
7	50	20	√	17	120	10	√
8	50	25	√	18	120	15	√
9	70	10	√	19	120	20	√
10	70	15	√	20	120	25	√

1.2.3 重金属采集与测定 根据《水和废水监测分析方法》^[23],污水中的悬浮物或固体颗粒物,是污水样的一个组成部分,可能会吸附污染物,分析前必须摇匀样品。故降雨结束后将收集到的径流样品充分摇匀,一部分用于溶解态重金属测定,具体方法为:用注射器吸取 10 ml 径流样品,安装注射式 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜,将抽滤过后的水样置于 10 ml 离心管中测定;另取 10 ml 径流样品用于重金属全量分析测定,具体方法为四酸熔样法 [HCl (GR), HNO₃ (GR), HF (GR), HClO₄ (GR)] 参照中华人民共和国国家环境保护标准 (HJ491-2019)^[24]。颗粒态重金属用差减法计算得出,即颗粒态重金属含量 = 重金属全量 - 溶解态重金属含量,并收集降雨过程中的雨水作为空白对照。

1.3 数据处理与统计分析

所有试验数据使用 Excel 2016 进行计算整理,相关分析采用 SPSS 22.0 进行处理,相关图件绘制运用

Origin 2017 完成。本研究采用以下公式^[25]计算:

根据水动力学原理,将过水断面视为矩形,得到径流剪切应力公式:

$$\tau = rRJ \quad (1)$$

式中: τ 为水流剪切力 (Pa); r 为水比重,取值 $9\ 800 \text{ N/m}^3$; R 为水力半径,近似等于径流深 (m); J 为水力坡度,取值 $\sin(\alpha)$ 。

水流功率按下列公式计算:

$$\omega = \tau v \quad (2)$$

式中: ω 为水流功率 (W/m); τ 为水流剪切力 (Pa); v 为水流流速 (m/s)。

坡面径流阻力其计算公式为:

$$f = \frac{8gRJ}{v^2} \quad (3)$$

式中: f 为阻力系数; g 为重力加速度,一般用 9.8 N/m^3 ; R 为水力半径,近似等于径流深 (m); J 为水面能坡,其值为坡度的正弦值; v 为水流流速 (m/s)。

2 结果与分析

2.1 不同雨强和坡度下产流产沙特征分析

降雨强度为 30 mm/h 时面不产生径流,而是下渗到土壤深层,故只分析 4 个雨强(50, 70, 90, 120 mm/h)和 4 个坡度(10° , 15° , 20° , 25°)下产流产沙过程。

试验过程中坡面产流量随降雨历时变化的过程如图 1 所示。总体上看,降雨强度和坡度对坡面产流量具有显著的影响。坡面产流的时间变化趋势在不

同雨强和坡度条件下基本一致,径流量均随降雨历时延长增大而趋于稳定,在雨强为 50 mm/h 条件下, 20° 和 25° 坡面下的径流量非常稳定;在坡度为 25° ,雨强为 70 mm/h 的条件下,径流量在试验后期依然有增大趋势。对比分析可知,在坡度较缓、雨强较小的条件下,径流量相对稳定;而在坡度较陡、雨强较大的条件下,径流量相对波动较大;但当坡度增加至 25° 时,有效降雨面积相对减少,其产生的径流量较 20° 坡度下产生的径流量增加不明显。

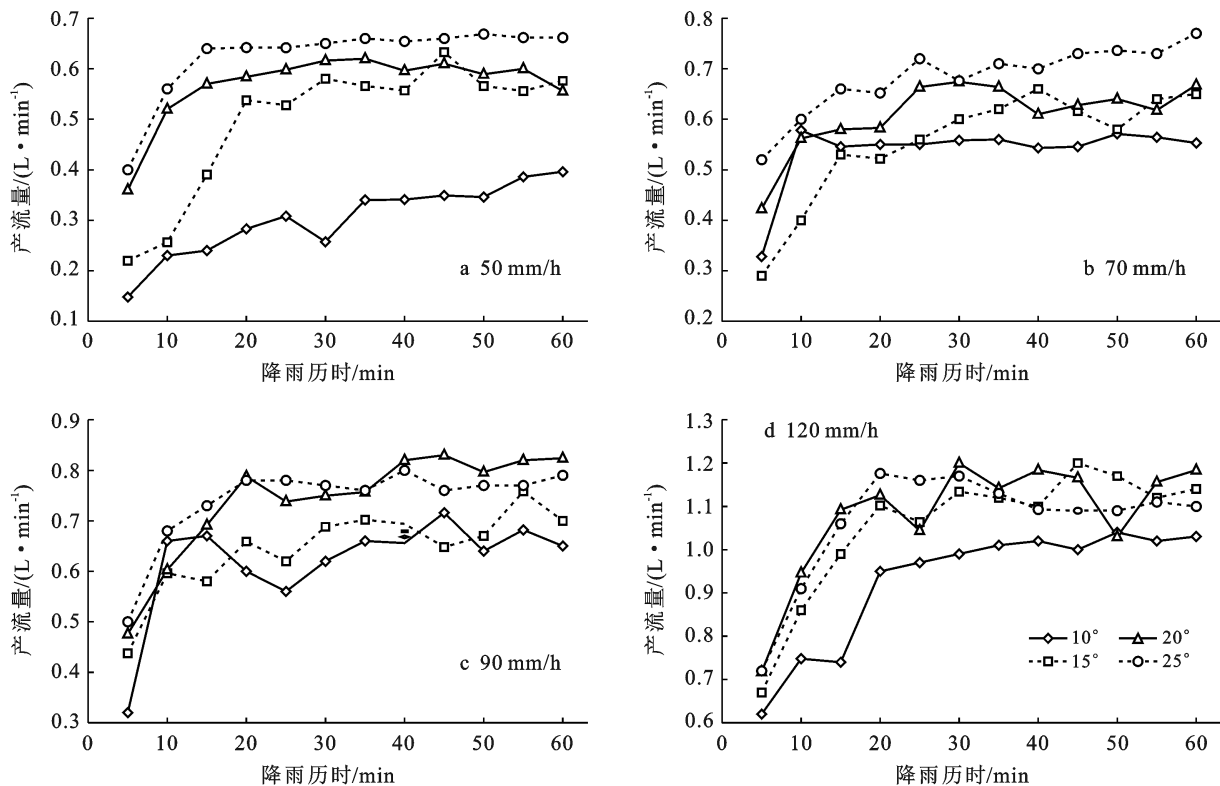


图 1 不同雨强和坡度下产流过程及特征

不同雨强下坡面产沙量随坡度变化的过程如图 2 所示,各雨强下坡面产沙量均有先增加然后减少最后达到稳定的变化趋势。同一坡度下产沙量随雨强增大呈现增加变化规律,同一雨强下产沙量随坡度增加呈显著增加趋势,但在坡度为 20° 和 25° 时,含沙量的增加不显著,甚至随着雨强的增加,含沙量会出现减少的现象。这是因为,当坡度高于 20° 时,虽然沿坡面向下分力增加,但坡度的增加导致有效降雨面积相应减少,其产生的效果与沿坡面的分力对雨滴的效果相互抵消,故含沙量随坡度增加而减少,即存在一个临界坡度,本文中的临界坡度为 20° [26]。

2.2 不同雨强和坡度条件下不同形态重金属含量及迁移特征

如图 3—6 所示,在整个产流过程中,颗粒态重金属含量明显大于溶解态重金属含量;雨强和坡度对

4 种溶解态重金属含量的影响的变化规律并不明显,均呈一定程度波动变化趋势;其中溶解态 Cr 波动变化最大,随这降雨强度的增加,溶解态 Cr 含量变化的范围分别在 0.003 5~0.009 4, 0.002 9~0.012 7, 0.003 1~0.010, 0.002 7~0.009 9 mg/L 之间。

在雨强(50, 70, 90, 120 mm/h)和坡度(10° , 15° , 20° , 25°)下,径流中颗粒态 Cu, Ni, Cd 和 Cr 的含量呈现出大致相同的变化趋势:随降雨历时增加而增加而后减缓并趋于稳定的变化趋势;对于颗粒态 Cr,当雨强为 70 mm/h 和 120 mm/h 时,颗粒态 Cr 含量随降雨历时呈先减小后增加再减小的变化趋势并在产流初期出现一个峰值,说明颗粒态 Cr 含量随降雨强度增大出现初期冲刷效应。

观察各条件下 4 种颗粒态重金属含量峰值,得出随着降雨强度增大,达到含量峰值的时间会提前且降

雨强度越大,颗粒态重金属含量越高。对比分析不同坡度下 4 种颗粒态重金属流失情况,坡度明显影响颗粒态重金属含量峰值,随着坡度增加,4 种颗粒态重金属含量到达峰值的时间会均会提前至 15~20 min;

同时,随着坡度增加,4 种颗粒态重金属含量变化趋势一致:先增大后缓慢减小,达到临界坡度 20°后,颗粒态重金属含量不再随坡度增大而增加,而是呈稳定或者减小的变化趋势。

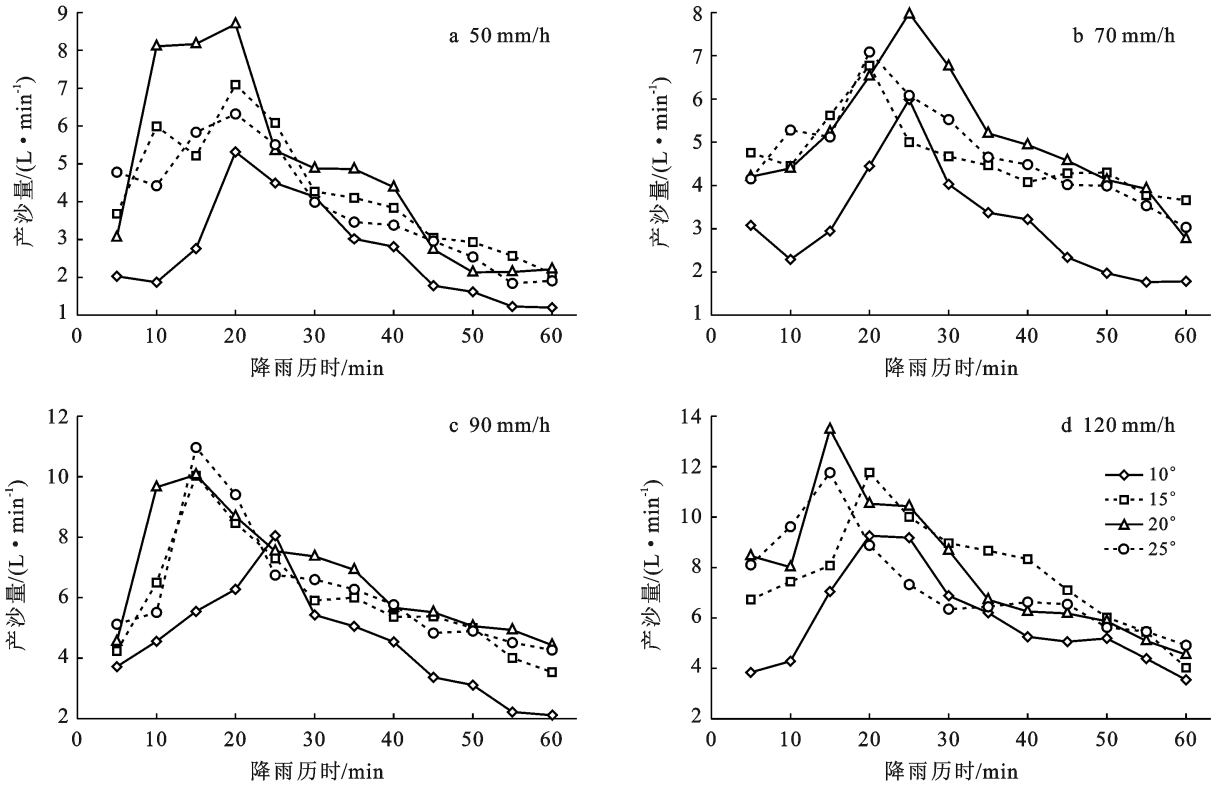


图 2 不同雨强和坡度下产沙过程及特征

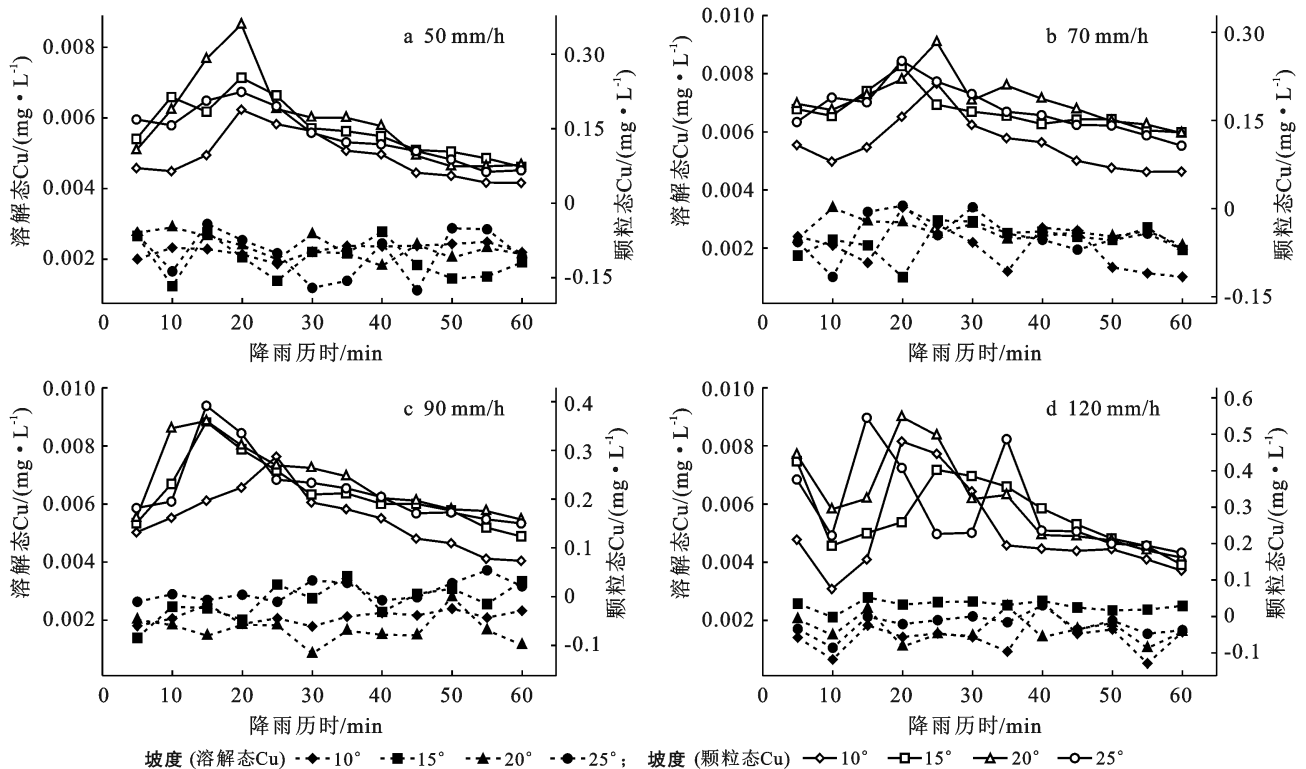


图 3 不同雨强和坡度下 Cu 含量随降雨历时的变化

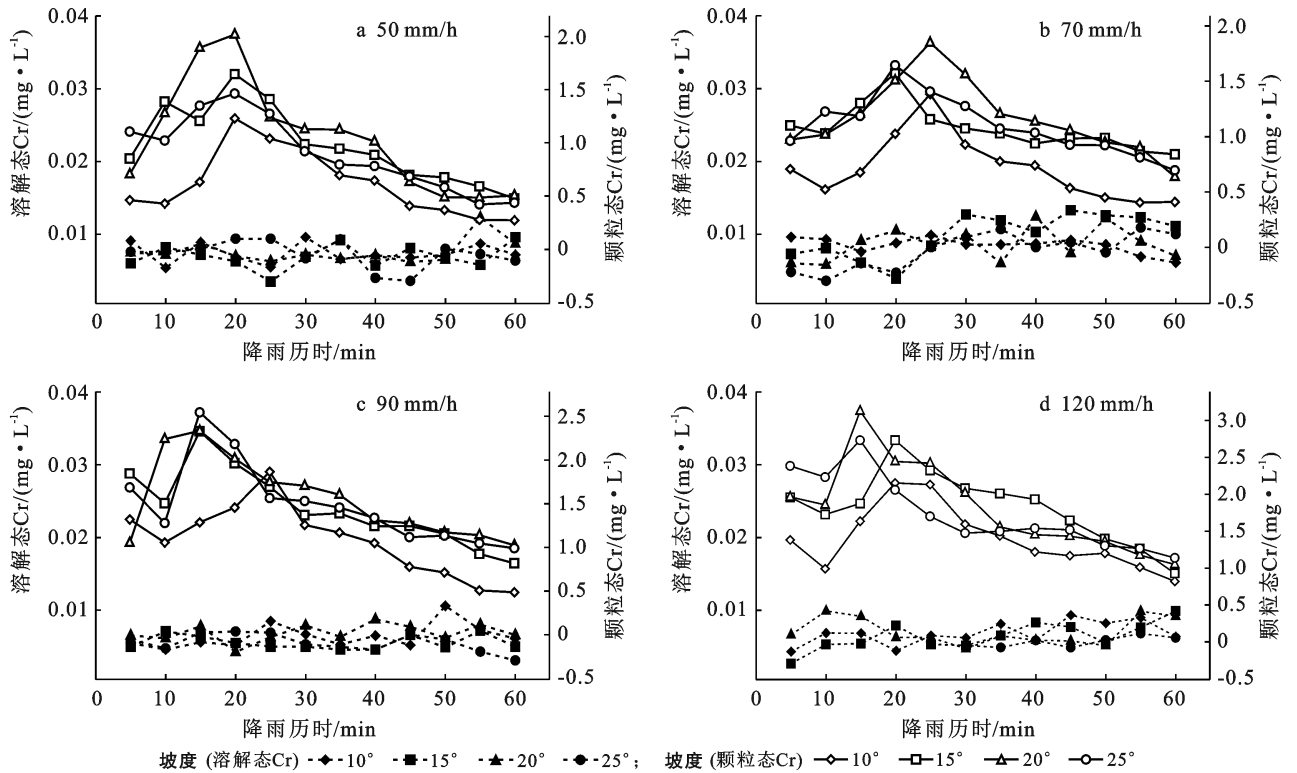


图 4 不同雨强和坡度下 Cr 含量随降雨历时的变化

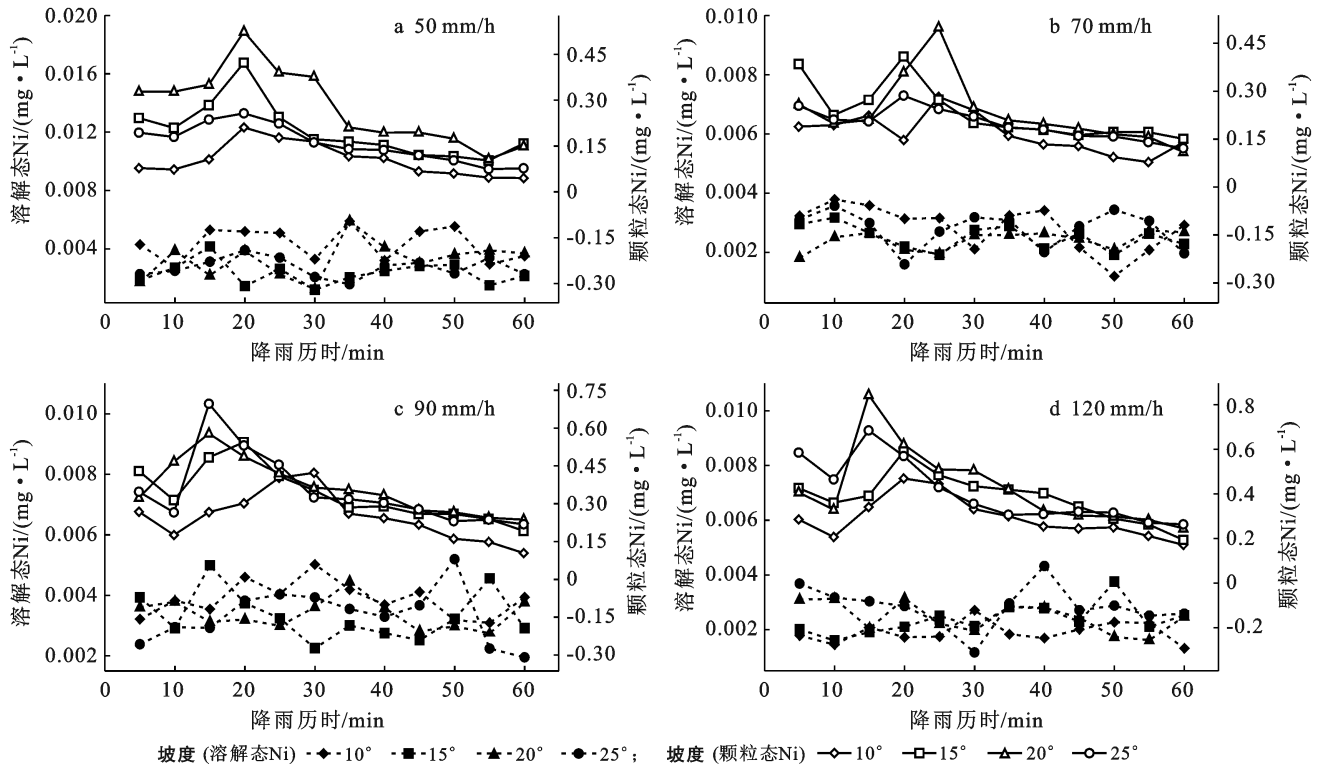


图 5 不同雨强和坡度下 Ni 含量随降雨历时的变化

2.3 降雨过程重金属迁移相关分析

由表 4 和图 7 可知,整体而言,不同颗粒态重金属含量与雨强、坡度、产流量、产沙量, τ , ω 和均呈显著正相关关系 ($p < 0.01$),与 f 呈显著负相关关系 ($p < 0.01$); 不同颗粒态重金属含量随着雨强、坡度、产流量、产沙

量, τ 和 ω 增大而增加,径流中颗粒态重金属含量随着坡面阻力系数增加而减小,径流在迁移过程中克服坡面阻力的作用来携带泥沙,阻力越大,消耗能量越多,用于分散和携带泥沙的能量就会相应减小,土壤侵蚀量就越小从而导致径流中颗粒态重金属含量也减小。

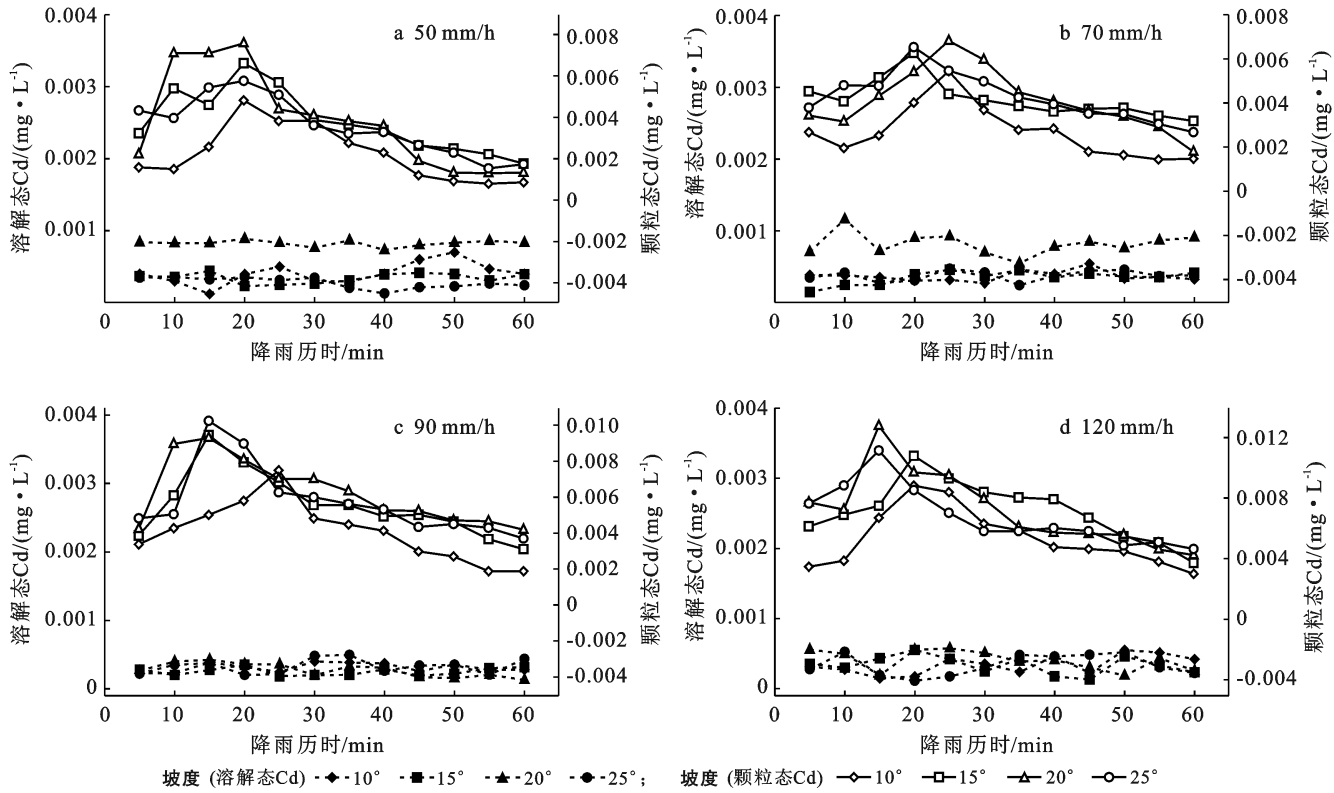


图 6 不同雨强和坡度下 Cd 含量随降雨历时的变化

表 4 不同雨强和坡度条件下的坡面径流水力学参数

雨强/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	产流量/ (L·min ⁻¹)	产沙量/ (g·L ⁻¹)	径流剪切 应力(τ)	水流功 率(ω)	阻力 (f)	溶解 Cu	溶解 Ni	溶解 Cd	溶解 Cr	颗粒 Cu	颗粒 Ni	颗粒 Cd	颗粒 Cr
50	10°	0.302	6.041	1.051	0.056	2.960	0.002	0.004	0	0.007	0.094	0.105	0.002	0.618
	15°	0.497	4.243	0.851	0.057	1.529	0.002	0.002	0	0.007	0.150	0.199	0.004	0.981
	20°	0.568	4.727	1.051	0.095	1.038	0.002	0.003	0	0.008	0.163	0.277	0.004	1.043
	25°	0.625	3.912	0.951	0.089	0.874	0.002	0.003	0	0.007	0.138	0.159	0.004	0.903
70	10°	0.537	3.101	1.903	0.127	3.423	0.002	0.003	0	0.008	0.109	0.168	0.003	0.713
	15°	0.556	4.654	2.088	0.181	2.222	0.002	0.003	0	0.010	0.165	0.232	0.004	1.073
	20°	0.610	5.053	2.272	0.204	2.244	0.003	0.004	0	0.009	0.184	0.233	0.004	1.168
	25°	0.684	4.748	1.934	0.213	1.279	0.002	0.003	0	0.008	0.168	0.197	0.005	1.097
90	10°	0.620	4.499	3.038	0.283	2.792	0.002	0.004	0	0.006	0.160	0.248	0.004	1.079
	15°	0.646	5.977	2.286	0.251	1.512	0.003	0.003	0	0.006	0.212	0.338	0.006	1.458
	20°	0.741	6.699	4.802	0.544	2.993	0.002	0.003	0	0.007	0.239	0.362	0.006	1.552
	25°	0.741	6.244	2.516	0.310	1.324	0.003	0.003	0	0.006	0.221	0.350	0.006	1.490
120	10°	0.928	5.846	3.537	0.436	1.861	0.001	0.002	0	0.007	0.229	0.293	0.005	1.395
	15°	1.056	7.716	4.470	0.626	1.825	0.003	0.002	0	0.006	0.279	0.384	0.007	1.822
	20°	1.082	7.855	4.838	0.726	1.720	0.002	0.002	0	0.007	0.313	0.425	0.007	1.821
	25°	1.067	7.306	3.791	0.636	1.078	0.002	0.003	0	0.006	0.294	0.407	0.007	1.737

由表 5 可知,总体上溶解态重金属含量与雨强、坡度和坡面径流动力学参数呈负相关关系,但相关系数均不高,说明坡面溶解态重金属迁移过程较为复杂,这可能与土壤性质及径流过程中的冲刷作用

有关。根据拟合 R^2 系数得出:Cr>Cd>Cu>Ni;可以认为本试验条件下,产沙量与颗粒态 Cr 的拟合效果最好,产沙量可以更好地预测颗粒态 Cr 含量的大小。

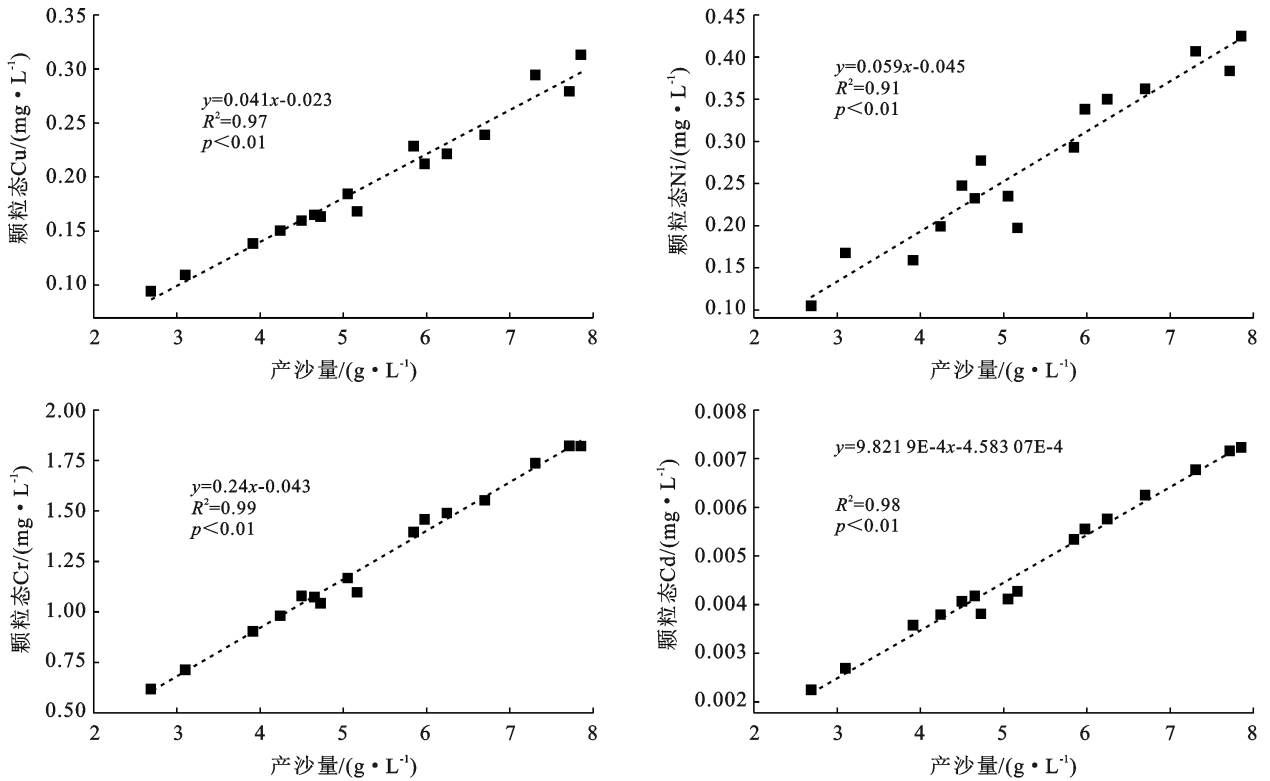


图 7 产沙量与颗粒态金属拟合关系

表 5 降雨过程重金属迁移相关分析

项目	溶解 Cu	溶解 Ni	溶解 Cd	溶解 Cr	颗粒 Cu	颗粒 Ni	颗粒 Cd	颗粒 Cr
雨强/(mm·h ⁻¹)	-0.204**	-0.134	-0.257**	0.268**	0.559**	0.561**	0.576**	0.584**
坡度/(°)	0.171*	-0.013	0.099	-0.105	0.226**	0.213**	0.236**	0.234**
产流量/(L·min ⁻¹)	-0.164**	-0.158*	-0.136	-0.136	0.498**	0.450**	0.514**	0.481**
产沙量/(g·L ⁻¹)	0.011	0.063	-0.039	0.224**	0.811**	0.823**	0.902**	0.885**
ω	-0.243**	-0.120	-0.201**	0.239**	0.601**	0.599**	0.620**	0.619**
τ	-0.254**	-0.080	-0.209**	0.185*	0.545**	0.557**	0.574**	0.573**
f	-0.153*	0.134	-0.058	0.195**	-0.210**	-0.192**	0.212**	-0.220**

注: ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论

本研究通过模拟降雨试验对不同雨强和坡度条件下重金属元素迁移规律,并得出在整个降雨过程中重金属元素含量与产沙量呈现极显著相关关系。本研究将水土侵蚀过程与重金属元素迁移相结合,以期掌握重金属元素进入土壤的生物化学行为,为土壤重金属元素污染修复提供理论基础。本试验设计中研究区域为喀斯特坡耕地,喀斯特区具有二元三维结构特征及以此耦合的地表地下水系,针对喀斯特这一特性不少研究团队开展了喀斯特区土壤地下漏失的相关研究,并取得丰富的研究成果^[27-29]。本研究在探究重金属元素迁移规律时仅考虑喀斯特区域地表流失,这是因为通过落水洞或者地下河入口转入地下水系

的径流泥沙是喀斯特区土壤地下漏失的主要途径,部分有效的岩溶管道、孔隙和裂隙也能够造成地表土壤漏失,但所占比例小。如黔南荔波自然保护区的石上森林由于地表坡面的大量溶沟、岩溶管道、裂隙是盲管,内部储存了大量土壤成为石上森林生长的基础。另外,落水洞或者地下河漏失形式其尺度一般为一个封闭洼地或者一个小流域,就坡面尺度(地块)而言,地表流失依然是土壤流失的主要部分;因此,本研究在讨论不同雨强和坡度下重金属元素迁移规律时,只对地表流失进行分析讨论,试验设计未考虑地下漏失处理;但在后面的研究中我们拟尝试针对漏失污染评价及治理展开相关研究。

3.1 不同雨强和坡度下产流产沙特征

由不同雨强和坡度下产流产沙过程及特征可知,

降雨强度对产流产沙过程具有明显影响。

随雨强增大,初始产流时间明显提早,这与张会茹等^[30]的研究结果一致;降雨强度试验结果表明随降雨强度的增大,累积径流量及泥沙流失量均显著增加,这与陈晓燕等^[31]的研究结论相一致,这是因为当雨强不断增大时,降雨速度加快,在相同降雨时间内降雨量增大,逐渐超过土壤的实际入渗能力,导致土壤透水能力下降,同时土壤逐渐达到饱和,更多的降雨形成地表径流,累积径流量增加;降雨强度越大,雨滴动能越大,对土壤颗粒的分散作用及冲刷搬运能力越强,对土壤表层稳定性破坏越大,因此土壤累积泥沙流失量也越大。产沙量总体呈先增加后减少至稳定的趋势,其原因是存在影响产沙量的临界坡度。本试验中的临界坡度为 20° ,即当坡度小于临界坡度时,坡面累积产沙量随坡度增加而增加,当地面坡度大于临界坡度时,累积产沙量随坡度的增加呈减小趋势。然而,有研究表明大雨强下临界坡度为 25° ^[32];也有学者基于坡面流理论得出了坡面侵蚀的临界坡度 57° ^[33]。得出不同结果的原因可能是供试材料,研究区域以及试验所设置不同所导致。梁志权等^[34]所得到的研究结果是在雨强为 50 mm/h 时,在 20° 附近存在一个侵蚀产沙量的临界坡度,并且以此论证了不同的雨强大小会影响侵蚀的临界坡度值。这与本试验的结果得到的临界坡度 20° 相吻合,这可能是由于雨强和坡度设置相差不大的原因。

3.2 不同雨强和坡度条件下重金属(Cu, Ni, Cd 和 Cr)迁移特征

在降雨过程中,土壤重金属随地表径流迁移主要表现为两种方式:①溶解态迁移,即污染物以分子态和离子态形式随地表径流一起迁移;②颗粒态迁移,即污染物以无机态和有机态形式吸附和结合于泥沙颗粒表面随泥沙迁移^[35]。颗粒态重金属流失量整体变化趋势与产沙量变化趋势一致,这是因为本试验中得出地表径流中重金属主要以颗粒态迁移为主,随着降雨强度增大,径流中夹带、冲刷的土颗粒增多,泥沙迁移量增大,因此呈现出大体一致的变化趋势;这与陶权等^[36]研究得到的结论一致。溶解态 Cu, Ni, Cd 和 Cr 流失量随坡度变化不明显,原因可能是因为降雨径流中溶解态重金属主要来源于土壤的交换态(包括水溶态)重金属^[36],再加上供试土壤理化性质、重金属背景值等原因也可能导致溶解态重金属流失不明显;观察不同坡度条件下颗粒态 Cu, Ni, Cd 和 Cr,发现 4 种重金属均在 20° 坡度处理下缩短达到含量峰值时间(15~20 min),再次在不同坡度处理条件下论证本文试验得出的临界坡度为 20° ^[34]。

3.3 模拟降雨过程重金属迁移相关性和拟合结果

虽然部分溶解态重金属含量与近地表水文条件存在相关关系,但相关系数绝对值均小于 0.3,说明溶解态重金属迁移过程较为复杂^[37]。颗粒态重金属与雨强、坡度、产流量、产沙量, τ , ω 和 f 在 0.01 水平上显著相关;颗粒态重金属(Cu, Ni, Cd 和 Cr)除了与 f 呈显著负相关关系之外,与其余 6 个参数均呈显著正相关关系,表明颗粒态重金属流失量与 f 成反比关系。根据产沙量与 4 种不同颗粒态金属(Cu, Ni, Cd 和 Cr)的拟合, $R^2(\text{Cr})=0.99$, $R^2(\text{Cd})=0.98$, $R^2(\text{Cu})=0.97$, $R^2(\text{Ni})=0.91$,可认为在本试验条件下,产沙量可以更好的预测颗粒态 Cr 的流失量,拟合结果与以上分析的雨强对坡面产沙量的影响分析结果相一致^[38],表明产沙量对颗粒态重金属(Cu, Ni, Cd 和 Cr)迁移量有极显著影响。选择产沙量与颗粒态金属拟合的原因是由于试验结果显示不同雨强和坡度下 4 种重金属元素在整个流失过程中均主要以颗粒态形态进行迁移流失^[14]且从总体来看产沙量与颗粒态重金属相关系数均高于其他条件。因此,选择与产沙量进行拟合,进一步探索产沙量对 4 种颗粒态金属的影响。

4 结论

(1) 降雨过程中,产流量随降雨历时的延长呈先快速增长后渐趋稳定的趋势,且在 15~20 min 的区间内会有小范围的波动;各雨强下产沙量随坡度增加而增加至临界坡度 20° 后缓慢趋于稳定。

(2) 不同雨强和坡度下 4 种重金属元素在整个流失过程中均主要以颗粒态迁移;颗粒态重金属流失量均在 120 mm/h 下达到含量峰值且时间均为 15~20 min 并在 20° 坡度以后缓慢减小至稳定状态。 70 mm/h 对溶解态重金属流失量影响最大,其中最为明显的是 Cr 流失量变化范围可达 0.0098 mg/L ;坡度对溶解态重金属含量变化不明显。

(3) 产沙量和不同颗粒态重金属(Cu, Ni, Cd 和 Cr)拟合方程表明,产沙量可以较好地预测颗粒态 Cr 的流失量。

[参 考 文 献]

- [1] Xiong Muqi, Sun Ranhao, Chen Liding. A global comparison of soil erosion associated with land use and climate type [J]. Geoderma, 2019, 343: 31-39.
- [2] 耿韧,张光辉,洪大林,等.我国水蚀区坡耕地土壤分离能力的空间分布与影响因素[J].水土保持学报,2020, 34(3): 156-161.
- [3] 刘巍,杨建军,汪君,等.准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J].环境科学,2016, 37(5):

- 1938-1945.
- [4] 马芊红,张光辉,耿韧,等.我国水蚀区坡耕地土壤重金属空间分布及其污染评价[J].水土保持研究,2017,24(2):112-118.
- [5] 陈三雄,周春坚,谢江松,等.广东大宝山矿区堆积土水土流失对重金属迁移量的影响[J].生态与农村环境学报,2019,35(1):16-21.
- [6] Vaezi A R, Ahmadi M, Cerdà A. Contribution of rain-drop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls [J]. Science of the Total Environment, 2017,583:382-392.
- [7] 胡立志,刘鸿雁,刘青栋,等.贵州喀斯特地区辣椒镉的累积特性及土壤风险阈值研究[J].生态科学,2021,40(3):193-200.
- [8] 张广映,吴琳娜,欧阳坤长,等.都柳江上游沿岸喀斯特地区土壤重金属污染特征及风险评价[J].中国岩溶,2021,40(3):495-503.
- [9] 姚成斌,周明忠,熊康宁,等.喀斯特高原石漠化治理示范区土壤和农作物重金属含量特征[J].中国环境科学,2021,41(1):316-326.
- [10] 宋书巧,胡伟.广西某喀斯特流域土壤重金属 Cd 分布及其来源分析[J].科学技术与工程,2015,15(17):237-241.
- [11] 王兴富,黄先飞,胡继伟,等.喀斯特山地 Ni-Mo 废弃矿区周围镉污染及农作物富集特征[J].环境化学,2020,39(7):1872-1882.
- [12] 周丽,杨丰,金宝成,等.喀斯特山区不同土地利用方式对土壤重金属的影响[J].北方园艺,2019(8):110-117.
- [13] Liu Yifan, Dunkerley D, López-Vicente M, et al. Trade-off between surface runoff and soil erosion during the implementation of ecological restoration programs in semi-arid regions: A Meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2020,712:136477.
- [14] 杨洋,铁柏清,张鹏,等.降雨和植被覆盖对土壤重金属流失的影响[J].水土保持学报,2011,25(1):39-42,46.
- [15] 王衡,冯新斌,王建旭,等.香根草及添加剂对模拟降雨条件下汞污染土壤和矿渣地表径流中汞含量的影响[J].生态学杂志,2011,30(5):922-927.
- [16] 陈科兵,吴发启,姚冲.黄土高原南部地区人工模拟暴雨条件下不同坡度谷子坡耕地产流产沙过程[J].水土保持学报,2021,35(3):90-95,103.
- [17] 孙子媛,文雪峰,吴攀,等.喀斯特地区典型风化剖面重金属超标程度及元素迁移特征研究[J].地球与环境,2019,47(1):50-56.
- [18] 李晓晓,韩瑞芳,陈倩倩,等.土壤重金属迁移转化领域研究的文献计量分析[J].土壤通报,2020,51(3):733-740.
- [19] 张祖莲,洪斌,黄英,等.降雨作用下红土型坡面径流特性与土壤侵蚀的关系研究[J].山地学报,2017,35(4):535-542.
- [20] 贵州省土壤普查办公室,贵州省土壤[M].贵州 贵阳:贵州科技出版社,1994.
- [21] 彭旭东,戴全厚,杨智,等.喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J].土壤学报,2016,53(5):1237-1248.
- [22] 罗光杰,王世杰,李阳兵,等.岩溶地区坡耕地时空动态变化及其生态服务功能评估[J].农业工程学报,2014,30(11):233-243.
- [23] 魏复盛,国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [24] 生态环境部.土壤和沉积物铜、锌、铅、镍、铬的测定火焰原子吸收分光光度法:HJ491-2019[S].北京:中国环境科学出版社,2019.
- [25] 路培.土壤结皮形成机制及空间分布对侵蚀的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [26] 杨恒,黄英,周丹,等.干湿循环对云南红土渗透性的影响[J].科学技术与工程,2019,19(27):289-297.
- [27] 杨宇琼,戴全厚,李昌兰,等.模拟降雨条件下喀斯特坡耕地氮磷元素地下漏失特征[J].中国水土保持科学,2018,16(3):59-67.
- [28] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J].水土保持学报,2017,31(5):1-8.
- [29] 张信宝,王世杰.浅议喀斯特流域土壤地下漏失的界定[J].中国岩溶,2016,35(5):602-603.
- [30] 张会茹,郑粉莉,耿晓东.地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响研究[J].水土保持研究,2009,16(4):52-54,59.
- [31] 陈晓燕,王茹,卓素娟,等.不同降雨强度下紫色土陡坡地侵蚀泥沙养分特征[J].水土保持学报,2012,26(6):1-5.
- [32] 向宇国,张丹,陈凡,等.降雨和坡度对植烟坡耕地产流产沙的影响[J].西南农业学报,2021,34(5):1121-1127.
- [33] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology [J]. Geological Society of America Bulletin, 1945, 56.
- [34] 梁志权,张思毅,卓慕宁,等.不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):1-6.
- [35] 朱昌宇,黄道友,朱奇宏,等.模拟降雨条件下污染土壤中重金属元素径流迁移特征[J].水土保持学报,2012,26(4):49-53.
- [36] 陶权,姚景,何树福,等.不同降雨强度下污染土重金属元素随径流迁移转化特征[J].水土保持学报,2015,29(2):65-68.
- [37] 林彩,李文权,刘洋,等.厦门湾表层海水重金属元素的迁移过程规律研究[J].厦门大学学报(自然科学版),2013,52(3):388-394.
- [38] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):18-23.