

黄土丘陵区两种典型灌木群落坡面侵蚀 泥沙颗粒组成及养分流失的比较

张冠华¹, 刘国彬^{1,2}, 王国梁^{1,2}, 易亮¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 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: 在野外模拟降雨条件下, 比较研究了黄土丘陵区柠条 (*Caragana korshinskii*) 和狼牙刺 (*Sophora viciifolia*) 径流小区产流产沙、侵蚀泥沙颗粒组成、比表面积 (SSA) 及养分流失特征。结果表明, 两种灌木群落均能显著减小坡面径流泥沙的流失。产流后流失泥沙黏粒、SSA 与养分含量随降雨时间总体呈现降低趋势, 其中有机质变化显著, 全磷变化不显著。受植被盖度影响, 泥沙中黏粒与养分含量均表现为柠条群落 > 狼牙刺群落 > 对照裸地。侵蚀泥沙具有富集黏粒和富集养分的特征, 富集率随群落盖度增大而增大 (柠条 > 狼牙刺 > 裸地)。不同形态养分富集率不同, 其中有机质均在 2.5 以上, 全氮平均富集率为 2.13, 全磷为 1.23。富集率随产流时间呈线性递减。流失泥沙养分含量与黏粒 (粒径 < 0.002 mm) 含量及 SSA 达到极显著的正相关。坡面土壤养分主要以黏粒为载体流失。SSA 的变化不仅能体现土壤颗粒组成的变化, 而且能够反映土壤养分的变化。

关键词: 灌木群落; 颗粒组成; 比表面积; 养分流失

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)01-0001-06

中图分类号: S157.1, S158.3

Comparison of Particle Composition and Nutrient Contents in Sediment Between Two Typical Shrub Lands in the Loess Hilly Area

ZHANG Guan-hua¹, LIU Guo-bin^{1,2}, WANG Guo-liang^{1,2}, YI Liang¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Runoff and sediment yield on plot, eroded sediment composition, specific surface area (SSA), and nutrient loss were investigated under field simulated rainfall for two typical shrubs, *Caragana korshinskii* and *Sophora viciifolia*, in the loess gully area. Results showed that both of shrubs can significantly reduce the loss of runoff and sediment. Clay contents, SSA, and nutrient contents decreased with rainfall duration. The organic matter (OM) contents had significant changes with rainfall duration but total phosphorus (TP) contents did not. Clay and nutrient contents in sediment from the two shrub lands were higher than those from the bare lands (CK), and clay and nutrient contents from the *Caragana korshinskii* lands were higher than those from the *Sophora viciifolia* lands, which may be resulted from the influence of vegetation including above-ground and below-ground parts. In addition, sediment could enrich clay and nutrients, and the enrichment ratios increased with vegetation coverage but decreased linearly with runoff time. The enrichment ratios of OM in all the plots were greater than 2.5, while the averaged enrichment ratios of TN and TP were 2.13 and 1.23, respectively. The nutrient contents in sediment correlated positively with the content of clay particles (less than 0.002 mm) and the SSA, because soil nutrients are mainly carried by fine particles. The SSA can embody the changes of particle size distribution and soil nutrients.

Keywords: shrub land; particle composition; specific surface area; nutrient loss

收稿日期: 2008-05-06

修回日期: 2008-10-16

资助项目: 国家科技支撑课题“植被优化配置与可持续建设技术”(2006BAD09B03); 中科院水土保持研究所领域前沿项目 (SW05502)

作者简介: 张冠华 (1983—), 女 (蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生, 主要从事水土保持流域管理研究。E-mail: zgh113@yahoo.com.cn.

通信作者: 刘国彬 (1958—), 男 (汉族), 陕西省榆林市人, 研究员, 博士生导师, 主要从事流域治理与生态恢复研究。E-mail: gbliu@ms.iswc.ac.cn.

土壤侵蚀造成土壤结构破坏,土壤养分流失^[1],并由此导致土壤质量下降。此外,水土流失还会影响下游河流、水库安全和生态环境的恶化^[2]。长期以来,水土流失造成的养分流失问题一直是世界性的环境问题^[3],受到政府和学者的广泛关注。

黄土高原丘陵沟壑区是黄土区侵蚀面积较大的地区。由于人类不合理的干扰活动,该区自然植被破坏严重,土壤侵蚀和土地退化剧烈,土壤养分流失不容忽视。

自 20 世纪 70 年代以来,一些学者采用室内模拟降雨试验、野外模拟降雨试验对坡地养分流失进行了大量研究,在养分流失途径、形态及过程^[4-6],影响养分流失因素(降雨、土壤、土地利用方式等)^[7-10]等方面取得了许多研究成果。但对养分流失过程中侵蚀泥沙颗粒组成的变化规律报道较少。本研究通过野外模拟降雨试验,比较了柠条和狼牙刺灌木林下侵蚀泥沙的颗粒组成及养分流失规律,探讨了植被影响养分流失的过程和机理。研究结果可为黄土丘陵沟壑区坡地养分流失的预测、评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 模拟降雨设备

降雨器采用中科院水利部水土保持研究所研制的侧喷式野外人工降雨装置。喷头高 4 m,喷头出水高度 5.5 m,降雨雨滴终点速度近接天然降雨速度。供水压力由压力表控制,雨强主要通过孔板的孔径来调节,孔径 3~13 mm,可控制雨强 30~165 mm/h,满足试验要求。

1.2 试验区概况

试验地点设在陕西省安塞县中国科学院安塞水土保持综合试验站(108°51′—109°26′E,36°30′—37°39′N)。该区处于黄土丘陵沟壑区第二副区,属典型的大陆性半干旱季风气候,植被区划为暖温带森林草原区。该区全年日照时数 2 415.8 h,辐射总量 480.06

kJ/cm^2 ;年平均气温 8.8℃,无霜期 160 d,10℃活动积温 3 177.4℃;多年平均降水量 530 mm,降水年内分布不均,其中 7—9 月占全年的 60%~80%;年平均蒸发量 1 645.4 mm,干燥度 1.14。该区地形主要为梁峁状黄土丘陵,沟谷发育,土壤为典型的黄绵土,保水性差,疏松易碎。该区侵蚀模数大于 10 000 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,海拔 1 013 m。

1.3 试验设计与样品采集

选取典型的乡土灌木柠条(*Caragana korshinskii*,CA)和狼牙刺(*Sophora viciifolia*,SV)小区为研究对象,同时设置裸地小区(CK)为对照小区。小区坡度均为 15°,坡长 8.5 m,坡宽 5.5 m;小区坡底设有矩形集水槽和出水口,以引导小区径流泥沙。试验于 2008 年 6 月进行,考虑风等因素对降雨的影响,试验均选择无风无雨的早上进行,每个小区 3 个重复,次降雨间隔以尽量保持土壤的初始状况一致为宜。每次降雨前调查各小区的植被覆盖状况,同时测定小区土壤含水量(表 1)。

土壤样品的采集:每次降雨前采用 S 型多点取样法采集各小区表层土壤(0—5 cm),均匀混合土样,风干保存,用于降雨前表层土壤的理化性质分析。雨强率定:每次降雨前在小区内均匀布置 8 个雨量筒,用以测定降雨量及降雨均匀系数,进而对雨强进行率定。试验雨强为 3 个小区雨强的平均值 \pm 标准差。

径流量及泥沙量的测定:降雨开始后即计时。记录开始产流时间,用塑料桶收集径流,间隔一定时间(根据流量大小调整)更换塑料桶;降雨结束后记录降雨历时及结束产流时间;称量每个桶的径流泥沙总量,放置澄清后倒掉上部清液,待水分蒸发完全后测定泥沙量,径流泥沙总量减去泥沙重即为径流量。

径流及泥沙样品采集:待桶内径流放置澄清后,根据降雨历时分时段采集桶内径流样,同样采集泥沙风干样。径流样上清液过滤后,放入冰箱中低温保存(2~3℃)。

表 1 小区土壤前期基本理化参数

小区	总盖度/%	高度/cm	植被状况			前期含水量/%	
裸地 CK	—	—	—			4.93	
狼牙刺 SV	29	20~30	植株稀疏,小区内有狗尾草等零星分布			5.26	
柠条 CA	78	100~120	群落结构较好,小区覆盖均匀,有雀麦、老鹳草等分布			5.13	
小区	机械组成/%			比表面积/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	有机质 OM/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 TN/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷 TP/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
	<0.002 mm	0.002~0.05 mm	>0.05 mm				
裸地 CK	5.26	67.21	27.53	375.42	6.14	0.35	0.56
狼牙刺 SV	6.09	66.63	27.28	389.68	7.24	0.45	0.60
柠条 CA	6.17	68.07	25.76	396.97	10.75	0.66	0.60

1.4 测定内容及方法

群落盖度:采用垂直照相法,即每次试验前用高倍数码相机对植被进行垂直拍摄,利用图片处理软件得出群落的盖度。前期土壤含水量采用烘干法;土壤容重采用环刀法。土壤及泥沙中有机质(organic matter, OM)含量采用高温外热重铬酸钾法氧化—容量法^[11];全氮(total nitrogen, TN)采用半微量开氏法^[12];全磷(total phosphorus, TP)采用浓硫酸高氯酸消化—钼锑抗比色法^[11]。土壤及泥沙颗粒组成采用英国马尔文公司生产的 MS2000 激光粒度分析仪(美国制),比表面积(soil specific area, 简称为 SSA)依据 Foster (1985) 经验公式^[13]进行计算:

$$SSA = 0.05 (S_a \%) + 4.0 (S_i \%) + 20 (C_i \%)$$

式中:SSA——土壤比表面积(cm^2/g); S_a , S_i , C_i ——依次为砂粒(2 mm ~ 50 μm)、粉粒(50 ~ 2

μm)与黏粒(< 2 μm)在土壤或泥沙中所占的百分数。试验数据为 3 个重复的平均值,均采用 Excel 和 SPSS 13.0 统计分析软件处理。

2 结果与分析

2.1 两种群落下径流含沙量随降雨时间的变化

表 2 为各小区降雨参数及产流产沙量,由表 2 可知,在雨强 1.495 mm/min 下,狼牙刺和柠条小区产流量显著低于对照小区。但狼牙刺和柠条小区的产流量无显著差异。在产沙量方面,柠条小区产沙量显著小于狼牙刺,狼牙刺显著低于对照小区。这说明两种群落在减流减沙方面均有显著作用。与以前的研究结果一致^[14-17]。但两种群落的减流减沙功能不同,表现为狼牙刺大于柠条,这可能与土壤状况、群落组成与结构,尤其与地下根系作用的差异有关。

表 2 各小区降雨参数及产流产沙量

小区	率定雨强/(mm·min ⁻¹)	历时/min	降雨量/mm	径流深/mm	产沙量/(g·m ⁻²)
裸地 CK		50	74.4 a	25.2 b	282 c
狼牙刺 SV	1.495 ±0.007 5	50	74.8 a	18.7 a	146 b
柠条 CA		50	75.1 a	20.1 a	57 a

注:同列不同字母表示小区间差异达显著水平($P < 0.05$)

在径流泥沙随时间的变化过程中(图 1),3 个小区径流泥沙浓度具有相同的变化趋势。产流初期,径流泥沙浓度逐步增大,柠条、狼牙刺、裸地分别达到 7.2, 15.4, 24.7 g/L 的峰值后,呈逐步下降趋势,在降雨后期径流泥沙浓度趋于稳定。这是由于产流初期,坡面表土比较松散,抗蚀能力低,易受雨滴击溅和径流冲刷。

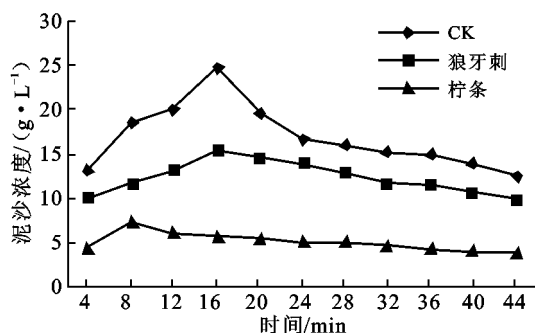


图 1 径流泥沙浓度随降雨历时的变化

随着降雨的持续,表层结皮形成,土壤入渗趋于稳定,坡面土壤侵蚀强度明显减小,径流含沙量降低。在整个降雨过程中,径流泥沙浓度表现为:裸地 > 狼牙刺 > 柠条小区,这与小区植被覆盖状况有关。狼牙刺小区径流量与柠条小区并无显著性差异,但其径流泥沙浓度明显高于柠条小区,可见植被覆盖越大,由

降雨引起的土壤流失量越小。主要是由于植被茎叶对降雨的截留作用、植物根系对土壤的固结作用和植被对径流传递的阻碍作用的结果。

2.2 两种群落坡面流失泥沙颗粒组成及比表面积随降雨时间的变化

从图 2 可见,在产流过程中,两种群落下泥沙黏粒、粉粒和砂粒含量随产流历时的变化总体表现为:黏粒与粉粒含量随产流历时的延长逐渐降低,砂粒含量逐渐升高,并且泥沙中黏粒含量在产流初期有一个明显增大过程,出现这种现象可能与径流在坡面传递过程中的选择性搬运有关。产流初期,降雨首先湿润表土,产流量不大,流速缓慢,动能小,径流以搬运细小颗粒为主,因此产流初期 0 ~ 10 min 流失泥沙中黏粒含量较高;此后随着产流量和流速逐渐增大,径流挟沙能力增强,径流中较大颗粒含量逐渐增加,砂粒含量增多。此后,随着径流量的逐步稳定,颗粒组成也逐渐稳定,此时,泥沙中颗粒组成与原表层土壤颗粒组成趋于接近。从不同小区来看,泥沙黏粒含量表现为:柠条 > 狼牙刺 > 裸地,这可能与小区植被覆盖状况有关。与对照裸地相比,柠条、狼牙刺小区由于有植被覆盖,径流阻力增大,流速下降,粗颗粒在径流传递中沉积,泥沙细颗粒含量增加。柠条小区植被盖度为狼牙刺小区的 2.7 倍,试验期间柠条高度明显大于狼牙刺,垂直结

构也好于狼牙刺。避免了雨滴直接打击地表,减少了雨滴动能,使得表土不易溅散,促进了径流选择性侵蚀过程,使其泥沙黏粒含量大于狼牙刺小区。

图 3 表明,SSA 随产流历时逐渐降低,其变化过程与黏粒相同。土壤颗粒组成中细颗粒特别是黏粒含量对 SSA 的贡献最大,影响土壤颗粒组成中黏粒时空变化的因素均能导致 SSA 的变化。土壤比表面积(SSA)是土壤的基本内在性质之一,它可以综合反映土壤的颗粒大小、级配组成、机械性质以及各种化学性质^[18-19],因此通过测定坡面 SSA 的时间变化可以较综合地反映坡地土壤退化特征。

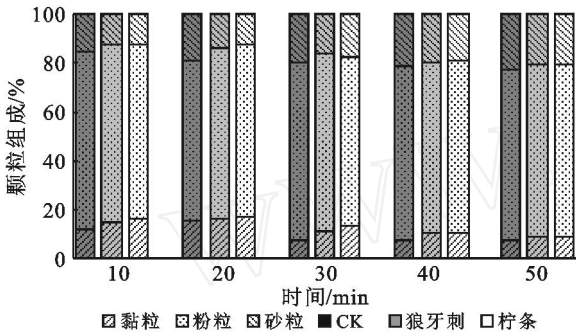


图 2 流失泥沙颗粒组成随时间的变化

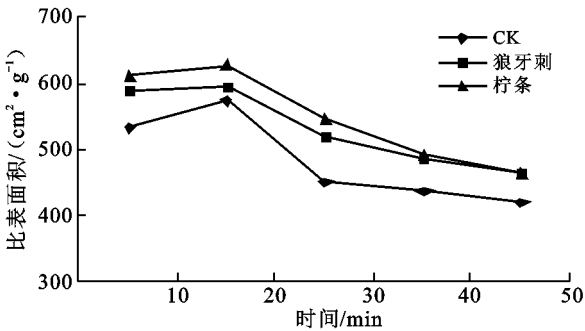


图 3 不同植被小区流失泥沙比表面积变化

2.3 两种群落小区流失泥沙养分含量的时间变化

图 4—6 为流失泥沙各种养分含量随产流历时的变化,从图中可以看出,侵蚀泥沙中各种养分含量都是随降雨历时逐渐降低的,均表现出由产流初期 0~10 min 阶段的较高含量向 10~30 min 阶段过渡,直至末期 30~50 min 阶段趋于平稳。养分浓度变化主要集中在产流初期,这是因为产流初期由径流携带表层肥沃的土壤,养分含量高,并且产流初期流失泥沙颗粒较细,比表面积大,能吸附较多养分。比较流失泥沙中不同形态养分的变化幅度可知,有机质含量随时间变化最明显,全氮次之,全磷变化最平缓。从不同群落类型小区的养分含量看,柠条小区流失泥沙各种形态养分的含量都最高,裸地泥沙各种形态养分含量最低。这可能是坡面植被覆盖差异的原因,裸地缺

少地表植被,其引起的土壤颗粒的选择性侵蚀对流失泥沙养分含量造成一定影响。

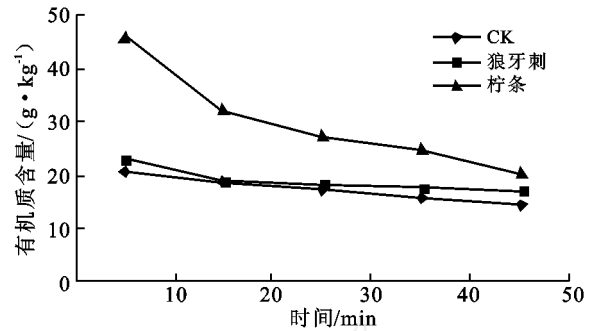


图 4 不同植被小区流失泥沙有机质含量变化

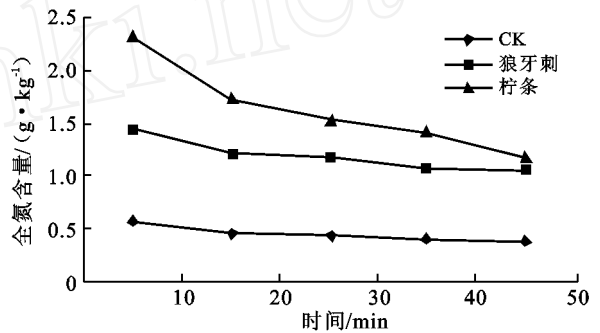


图 5 不同植被小区流失泥沙全氮含量变化

无论是裸地还是有植被覆盖小区,流失泥沙有机质含量在整个产流过程中都远高于雨前表土,达到雨前表土的 2~3 倍,如此高的养分含量在土壤侵蚀严重的黄土丘陵区可能会造成表土养分的大量流失,导致土地生产力的下降。

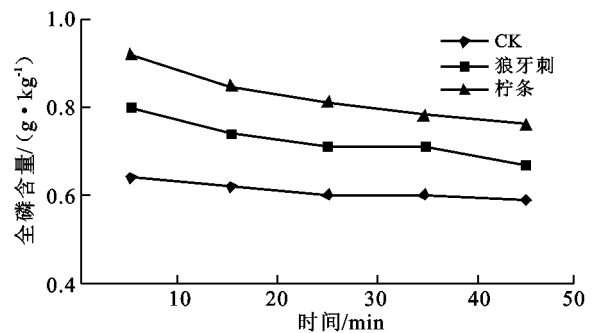


图 6 不同植被小区流失泥沙全磷含量变化

2.4 两种群落流失泥沙中黏粒富集及养分富集特征

2.4.1 两种群落小区坡面流失泥沙中黏粒及养分富集率 已有的研究证明^[20],流失泥沙具有富集黏粒和富集养分的特性,用富集率 ER(enrichment ratio)来表示黏粒、有机质和其它易吸附在土壤颗粒上物质的富集情况,ER = 侵蚀泥沙养分含量/被侵蚀土壤养分含量。表 3 表明,泥沙中黏粒含量和各养分含量都高于雨前表土,且富集率随着群落盖度的增大而增大,其中

狼牙刺与柠条小区黏粒和有机质富集率为 2.06, 2.62 与 2.15, 2.80; 说明不同群落小区流失泥沙养分的富集率不同。从不同形态养分富集率看, 有机质富集率均

在 2.5 以上, 全氮平均富集率为 2.13, 全磷平均富集率为 1.23。不同群落坡面养分富集的差异是因为表层土壤结构, 地表植被状况等不同而导致的。

表 3 侵蚀泥沙黏粒与养分富集率 (ER)

小区	黏粒/ %			有机质 OM / (g · kg ⁻¹)			全氮 TN / (g · kg ⁻¹)			全磷 TP / (g · kg ⁻¹)		
	表土	泥沙	ER	表土	泥沙	ER	表土	泥沙	ER	表土	泥沙	ER
裸地 CK	5.26	9.93	1.89	6.14	15.37	2.50	0.35	0.45	1.28	0.56	0.61	1.09
狼牙刺 SV	6.09	12.56	2.06	7.24	18.95	2.62	0.45	1.19	2.64	0.60	0.73	1.22
柠条 CA	6.17	13.26	2.15	10.75	30.18	2.80	0.66	1.63	2.47	0.60	0.82	1.37

2.4.2 侵蚀泥沙富集率随时间的变化规律 根据富集率定义计算不同时段流失泥沙的有机质、全氮、全磷富集系数 ER_{OM} , ER_{TN} , ER_{TP} 值, 通过回归分析得出侵蚀泥沙养分富集系数与产流历时 t 存在线性关系 ($P < 0.05$)。由于 3 个小区富集系数变化规律相同, 现以柠条小区为例做进一步说明。

对柠条小区侵蚀泥沙有机质、全氮和全磷富集系数与产流历时 t 的关系可用下式表示:

$$ER_{OM} = -0.0544t + 4.4385, R^2 = 0.8875, P < 0.05$$

$$ER_{TN} = -0.0394t + 3.6545, R^2 = 0.9024, P < 0.05$$

$$ER_{TP} = -0.0065t + 1.5683, R^2 = 0.9435, P < 0.05$$

从以上结果可知, 养分与黏粒及比表面积富集系数与产流历时呈负相关, 随产流的进行, 富集系数呈线性递减; 直线斜率绝对大小为有机质 > 全氮 > 全磷, 进一步说明了侵蚀泥沙对有机质的富集大于全氮和全磷; 坡地产流产沙的过程是径流与表土相互作用的过程, 在这个过程中存在径流的选择性搬运和表土

的剥离分散与沉积, 最终导致水土的流失, 富集系数随时间的变化还可能与泥沙的累计流失量有关, 这有待进一步研究。

2.5 两种群落小区坡面养分流失与泥沙颗粒组成及比表面积的关系

由表 4 可知, 流失泥沙养分含量与 < 0.002 mm 颗粒含量均达到了极显著的正相关 ($P < 0.01$), 说明在径流的流失过程中养分主要是以 < 0.002 mm 的颗粒为载体流失的, 这与张兴昌、黄丽等^[21-23] 研究结果相近。养分含量与土壤比表面积 SSA 极显著相关, 说明 SSA 的变化不仅体现了土壤物理性质的变化, 而且能够反映土壤养分的变化, 能较全面地反映出不同因素对土壤肥力的影响, 是评价土壤性质变化的一项综合指标。由于 SSA 随产流历时逐渐降低, 且其变化过程与黏粒的变化同步。综合以上分析结果, 黏粒随地表径流的迁移与流失是导致坡面土壤养分流失的最直接原因。

表 4 流失泥沙养分含量与颗粒组成及比表面积的相关性

项目	黏粒/ %	粉粒/ %	砂粒/ %	比表面积 SSA / (cm ² · g ⁻¹)	有机质 / (g · kg ⁻¹)	全氮 / (g · kg ⁻¹)
粉粒/ %	-0.169					
砂粒/ %	-0.861**	-0.357				
比表面积 / (cm ² · g ⁻¹)	0.994**	-0.062	-0.910**			
有机质 / (g · kg ⁻¹)	0.648**	0.095	-0.663**	0.666**		
全氮 / (g · kg ⁻¹)	0.629**	0.165	-0.682**	0.655**	0.855**	
全磷 / (g · kg ⁻¹)	0.672**	0.125	-0.701**	0.694**	0.859**	0.984**

注: **表示极显著水平 $P < 0.01$; *表示显著水平 $P < 0.05$ 。

3 结论

(1) 柠条和狼牙刺群落均能显著减小坡面径流泥沙的输出。径流中含沙量在产流初期随时间增加, 达到峰值后呈下降, 后期趋于稳定。整个降雨过程中, 径流中泥沙浓度为裸地 > 狼牙刺小区 > 柠条小区。

(2) 坡面产流过程中, 径流中泥沙的颗粒组成总体表现为黏粒与粉粒含量随产流历时逐渐降低, 砂粒含量增加, 泥沙比表面积随产流历时逐渐减小。柠条和狼牙刺群落产流过程中, 泥沙含量和泥沙中黏粒含量小于对照裸地, 说明植被能有效减少泥沙、尤其是黏粒的流失。

(3) 泥沙养分含量随降雨历时的延长,逐渐降低。其中有机质变化最显著,但全磷变化不显著。柠条、狼牙刺群落下流失泥沙中养分含量高于裸地。

(4) 流失泥沙具有富集黏粒和富集养分的特性。不同形态养分富集率不同,其中有机质均在 2.5 以上,全氮为 2.13,全磷为 1.23;富集率随产流时间呈线性递减,随群落盖度的增加而增加。

(5) 流失泥沙养分含量与黏粒(粒径 < 0.002 mm)含量及比表面积均达到极显著的正相关,黏粒流失是坡面土壤养分流失的直接原因,SSA 的变化能够反映土壤养分的变化。

[参 考 文 献]

- [1] Zhang Jianguo, Li Huixia, He Xiaorong, et al. Impoverishment of soil nutrients in gully erosion areas in Yuanmou basin[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2003, 8(3B): 1034-1040.
- [2] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface water with phosphorus and nitrogen[J]. Ecological Applications, 1998(8): 559-568.
- [3] 程冬兵, 蔡崇法, 左长清. 土壤侵蚀退化研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 252-258.
- [4] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 44-50.
- [5] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 71-74.
- [6] 马琨, 王兆骞, 陈欣, 等. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 16-19.
- [7] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 等. 雨强对三峡库区黄色石灰土养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 33-35.
- [8] 黄满湘, 章申, 唐以剑, 等. 模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 6-10.
- [9] 张兴昌, 邵明安, 黄占斌, 等. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 1038-1044.
- [10] 王晓龙, 李辉信, 胡锋, 等. 红壤小流域不同土地利用方式下土壤 N、P 流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 31-34.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [12] 刘光崧. 土壤理化分析与坡面描述: 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法土壤分册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [13] Foster G R, Young R A, Neibling W H. Sediment composition for non-point source pollution analyses[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(2): 705-719.
- [14] 刘宝元, 唐克丽, 查轩, 等. 坡耕地不同地面覆盖的水土流失试验研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 25-29.
- [15] 侯喜禄, 曹清玉. 陕北黄土丘陵沟壑区植被减沙效益研究[J]. 水土保持通报, 1990, 10(2): 33-40.
- [16] 熊运埠, 王宏兴, 白志刚, 等. 梯田、林地、草地减水减沙效益指标初探[J]. 中国水土保持, 1996(8): 10-14.
- [17] 白志刚. 从无定河流域“94·8·4”暴雨洪水看林草措施的减蚀作用[J]. 中国水土保持, 1997(7): 17-19.
- [18] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京: 农业出版社, 1983: 154-156.
- [19] 希勒尔. 土壤物理学概论[M]. 尉庆丰, 荆家海, 王益权(译). 西安: 陕西人民教育出版社, 1982: 139-141.
- [20] Cerda A. Soil erosion after land abandonment in a semi-arid environment of southern Spain[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1997, 11: 163-176.
- [21] 张兴昌, 刘国彬, 刘文兆. 不同土壤颗粒组成在水蚀过程中的流失规律[J]. 西北农业学报, 2000, 9(3): 55-58.
- [22] 黄丽, 张光远, 丁树文, 等. 侵蚀紫色土土壤颗粒流失的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 35-39.
- [23] Neibling W H, Moldenhauer W C, Holmes B M. Evaluation and comparison of two methods for characterization of sediment size distribution[J]. Transaction of the ASAE, 1983, 27(2): 472-480.