

# 碎石土坡地不同植被配置下的养分流失途径

杜祥运<sup>1,3</sup>, 梁永哲<sup>2,4</sup>, 夏振尧<sup>2</sup>, 夏栋<sup>3</sup>, 许文年<sup>1,2</sup>, 王英琨<sup>1</sup>

(1. 三峡大学生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 4. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081)

**摘要:** 为了解不同植被类型及覆盖度对碎石土壤坡地养分流失途径的影响, 采用模拟径流小区降雨, 研究了6种植被配置模式下地表径流、壤中流及侵蚀泥沙氮、磷养分流失特征。结果表明: 植被覆盖坡地氮流失量比裸地减少了0.91~4.60倍, 磷流失量减少了6.25~63.9倍, 养分控制效果排序为草灌>草本>灌木>裸地。6种植被配置下的地表径流、壤中流及侵蚀泥沙养分流失量存在显著差异, 裸地氮、磷的主要损失途径是侵蚀泥沙, 灌木是地表径流, 草本与草灌结合处理则是地表径流和壤中流; 而草本、灌木以及草灌结合土壤磷的主要损失途径是侵蚀泥沙与地表径流共同作用的结果。不同植物覆盖措施对含碎石土裸地氮、磷的流失起到显著的截留作用, 主要通过由侵蚀泥沙向非侵蚀泥沙途径转化而实现对氮磷的截留。灌木覆盖度与地表径流的氮磷流失量、径流总量的氮磷流失量之间呈现显著的正相关性, 与壤中流的氮磷流失量呈现显著的负相关性。

**关键词:** 植被类型; 覆盖度; 含碎石土壤; 养分流失

中图分类号: S157.1; S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0061-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.01.011

## Soil Nutrient Loss Characteristic of Gravel Soil Slope on Different Vegetation Patterns

DU Xiangyun<sup>1,3</sup>, LIANG Yongzhe<sup>2,4</sup>, XIA Zhenyao<sup>2</sup>,

XIA Dong<sup>3</sup>, XU Wennian<sup>1,2</sup>, WANG Yingkun<sup>1</sup>

(1. College of Biological and Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-environment in Three Gorges Area, Yichang, Hubei 443002; 3. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002; 4. Guiyang Engineering Corporation Limited of Power China, Guiyang 550081)

**Abstract:** In order to understand the effects of different vegetation types and coverage on the ways of nutrient loss of gravel soil slope, the characteristics of nitrogen and phosphorus loss through surface runoff, interflow and erosion under six different vegetation patterns were studied by the method of simulating runoff plots rainfall. The results showed that nitrogen loss of vegetation patterns reduced 0.91—4.60 times than bare slope, while phosphorus loss reduced 6.25—63.9 times, and nutrient control effect on slopes with different vegetation listed as follows: Shrub-grass slope>herb slope>shrub slope>bare slope. There was remarkable difference nitrogen and phosphorus loss characteristics through surface runoff, interflow and erosion of six different vegetation patterns. The main way of nitrogen and phosphorus loss in bare slope was eroded sediment, the main way of shrub slope was surface runoff, however, herb slope and shrub-grass slope was surface runoff and interflow. The main way of phosphorus loss in slope of herb, shrub and shrub-grass was eroded sediment and surface runoff. Vegetation coverage measures had a significant interception in the nitrogen and phosphorus loss on the bare slope of gravel soil. The main loss way of nitrogen and phosphorus transformed erosion sediment to non-erosion sediment essentially. Shrub coverage had a significant positive correlation with nitrogen and phosphorus runoff loss by surface runoff, and had a significant negative correlation with nitrogen and phosphorus loss by interflow.

**Keywords:** vegetation types; coverage; gravel soil; nutrient loss

收稿日期: 2016-07-27

资助项目: 长江科学院开放研究基金项目(CKWV2015208KY); 三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金项目(KF2016-04); 国家自然科学基金项目(41202250, 51278281); 三峡大学研究生科研创新基金项目(2015CX127)

第一作者: 杜祥运(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态修复技术研究。E-mail: 250325520@qq.com

通信作者: 夏振尧(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事边坡防护与生态防护研究。E-mail: xzy\_yc@126.com

三峡库区坡耕地耕层土壤砾质化特征明显,碎石含量达 5%~30%,在夏季突发性暴雨和径流冲刷作用下,由于碎石混合改变土壤构成及水力学性质,不仅直接影响降雨侵蚀入渗等过程,且间接导致以氮、磷为主的养分随地表径流水相和沉积物相的横向迁移与淋失过程,造成土地生产力水平逐渐降低退化,而蓄集在坡体中的壤中流,易造成大面积坍塌<sup>[1]</sup>,土壤侵蚀和农业非点源污染物还会加速库区水体的富营养化,引发十分严重的水土流失及其养分流失问题<sup>[2]</sup>,侵蚀泥沙甚至会危及大坝运行安全。三峡库区现已被列为全国重要水源涵养区,库区内采用退耕还林等植被恢复措施解决水土流失问题已得到广泛认可<sup>[3]</sup>。

有研究表明植被一方面通过茎叶减少雨滴击溅侵蚀和径流冲刷,从而降低地表径流与侵蚀泥沙量;另一方面植物根系在相关微生物群落共同参与下改善土壤粒级结构、理化性质,从而影响水分入参与养分淋溶,起到减少坡面水土流失的作用<sup>[4]</sup>。目前,国内外对坡面侵蚀产流、产沙过程与机理以及氮磷在坡地地表径流流失的研究较为成熟,植被因素影响下的坡地氮磷流失形态与流失规律等方面得出了较为重要的成果<sup>[5-6]</sup>,而随着对壤中流研究的不断深入,关于壤中流影响养分流失的研究也逐步成为水文学和土壤学领域研究的热点,随壤中流、地表径流及侵蚀泥沙流失的养分是坡地土壤养分流失的三大主要途径的观点也逐渐被相关学者接受<sup>[7-9]</sup>。关于壤中流对坡面养分流失的影响以及植被作用下壤中流养分流失特征也有了一定的了解<sup>[10-12]</sup>,而以往国内外关于植被对坡面水土保持的研究大多集中在坡面产流产沙特征<sup>[13-14]</sup>与不同植被覆盖下地表径流养分流失特征<sup>[15-16]</sup>,多是将地表径流、侵蚀泥沙、壤中流 3 种途径分开研究,关于植被影响下养分流失的认识不够全面,导致对面源污染的认识也受到局限。

本研究通过 6 种植被配置下含碎石土边坡径流小区试验,研究不同植被配置下的植被类型与覆盖度对碎石土边坡氮、磷养分流失途径的影响,以期全面认识地表径流、侵蚀泥沙和壤中流对含碎石土坡地养分流失的影响,有助于明确不同植被配置下含碎石土坡地养分流失途径,为含碎石土坡地养分迁移流失和防治面源污染提供一定理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

2015 年 5 月在水土保持试验基地进行人工模拟降雨试验,通过自行设计建造的含碎石土坡地径流小区观测养分流失,详见图 1。试验径流小区坡度设置为 20°,面积 2.0 m×0.5 m,土层厚度 0.4 m,在坡脚设置有 2 个不同高度的集水口,可分别收集坡面径流和 0~0.4 m 壤中流。为保障小区植被生长独立、水系独立,径流小区采用混凝土浇筑,且相连的小区竖板高出坡面 0.2 m。

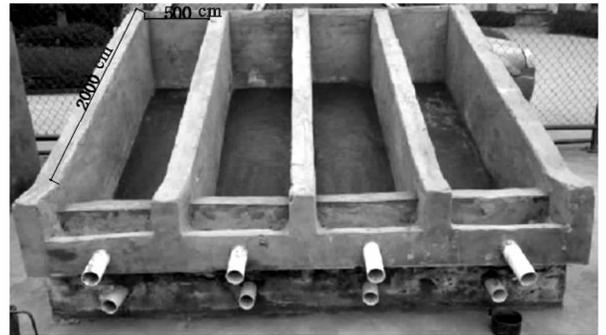


图 1 试验径流小区

供试土壤取自湖北省宜昌市丘陵区坡耕地表层红壤土,经自然风干后过孔径为 10 mm 的筛网,养分含量为:有机质 0.60 g/kg,全氮 0.65 g/kg,全磷 0.89 g/kg,碱解氮 45.24 mg/kg,速效磷 5.52 mg/kg。供试碎石取自宜昌市南津关砂石厂,过筛后,取粒径 3~45 mm 碎石备用。将土壤和碎石混合均匀,按照容重 1.25 g/cm<sup>3</sup>,分 4 层每层 10 cm 逐层填装在径流小区内。试验所用的降雨设备采用南京南林电子科技有限公司生产的 NLJY-10-01 型便携式人工模拟降雨系统,降雨高度为 4.0 m,降雨均匀度在 86% 以上。

### 1.2 试验设计

选种植物为边坡常用绿化先锋植物,草本狗牙根 (*Cynodon dactylon*) 与灌木多花木蓝 (*Indigofera amblyantha Craib*)。根据《土壤侵蚀分类分级标准》以及三峡库岸坡地植被群落的相关研究成果<sup>[17-18]</sup>,设计 5 组植被配置方式,每组植被配置方式设 3 次重复,同时设置不含植物的空白对照组,详见表 1。径流小区植物种植后在自然状态下培育 6 个月以上,使得碎石土坡地与所种植物恢复自然特征。

表 1 径流小区植被配置

	CK	S1	S2	S3	S4	S5
植被类型	裸地(无植被)	草本(狗牙根)	草本(狗牙根)	灌木(多花木蓝)	灌木(多花木蓝)	草灌结合(狗牙根+多花木蓝)
覆盖度/%	0	60	80	60	80	100

研究区夏季多暴雨,根据当地降雨的雨强水平与试验所需,试验降雨强度设置了 2 种侵蚀性降雨,分别为大雨强(1 mm/min)与暴雨强(2 mm/min),利用量筒法对降雨强度实施率定。由于植物对土壤养分

的吸收以及每次降雨会对后续降雨养分流失产生影响,为了保证每次降雨对后续降雨试验产生一致的影响,每次降雨试验前 24 h 对每个径流小区进行预备降雨,设置预备降雨雨强 0.25 mm/min,时间 60

min,按照预备降雨—大雨雨强降雨—预备降雨—暴雨雨强降雨的顺序降 4 场雨,总共进行 72 场降雨,其中预备降雨 18×2 场。每次大雨雨强降雨试验完成后对产生的冲蚀细沟填补并洒水湿润。降雨开始前,先将径流小区土壤充分湿润但未产生地表径流,然后将降雨强度调至设定值。采集每次降雨所用自来水并测定其全氮(TN)、全磷(TP)浓度,作为背景值。

### 1.3 样品测定与数据处理

产流 30 min 后停止降雨,将所接取的地表径流水沙样称重( $M_f, g$ );将所接取的壤中流水样使用量筒测其体积( $W_i, L$ );地表径流水沙样将泥沙过滤,并将泥沙烘干称重( $M_s, g$ );分析测定烘干泥沙样品的有机质(OM)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、全磷(TP)、速效磷(AP)等养分含量。降雨后将地表径流与壤中流样品分别转入 500 ml 聚乙烯瓶中,运回实验室于 4 °C 条件下保存,并在 48 h 内测定其水相 TN、TP 浓度。

泥沙养分测定采用常规分析方法含量有机质测定采用外加热重铬酸钾氧化法;全氮含量测定采用凯氏定氮法进行测定;碱解氮含量测定采用碱扩散法测定;全磷含量测定采用钼锑抗比色法测定;速效磷含量测定采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提钼锑抗比色法。

水相养分测定前,将水样混合均匀后用滤纸过滤至澄清,采用 SKALAR 流动分析仪测定水样 TN、TP 浓度;所测浓度减去试验供水背景值,即为所测定地表径流和壤中流 TN、TP 含量。

地表径流量按公式(1)计算:

$$W_f = \frac{M_f - M_s}{1000\rho_{wf}} \quad (1)$$

式中: $W_f$  为地表径流量(L); $\rho_{wf}$  为地表径流滤至澄清后水样的密度(g/ml)。

径流总量按公式(2)计算:

$$W_t = W_f + W_i \quad (2)$$

式中: $W_t$  为径流总量(L)。

数据经 Excel 2007 整理后,采用 SPSS 13.0 统计分析软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)与独立样本  $t$  检验方法分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被类型与覆盖度对径流量与泥沙量的影响

从表 2 可以看出,植被配置方式对地表径流量、壤中流量以及侵蚀泥沙量的影响均达到显著水平。各径流小区壤中流量在 0~3.02 L 之间,在同一雨强下,壤中流量大小排序依次为草灌>草本>灌木>裸地,其中在 1 mm/min 雨强条件下,试验观察期间裸地未产生壤中流,其原因可能与地表土壤结皮阻碍水分向下运移有关。与 CK 处理相比,除 S3 处理之外,种植草本、灌木以及草灌结合都能显著增加壤中流。地表径流量、径流总量以及侵蚀泥沙量则与壤中流量表现相反:裸地平均地表径流量、径流总量以及侵蚀泥沙量均最大;而有植被处理组地表径流量、径流总量以及侵蚀泥沙量均小于裸地。其中除 S4 处理侵蚀泥沙量之外,灌木平均地表径流量、径流总量以及侵蚀泥沙量均最大,其次为草本,而草灌结合平均地表径流量、径流总量以及侵蚀泥沙量均最小。在同一雨强下,相对对照组种植草本、灌木以及草灌结合都能显著减少地表径流与侵蚀泥沙量,降幅范围为 3.10%~70.26%与 88.33%~99.27%。

草本处理不同覆盖度对径流量和侵蚀度的影响与灌木处理表现不一。虽然低覆盖度草本处理的地表径流量、径流总量以及侵蚀泥沙量均高于高覆盖度处理,但只有地表径流和径流总量在 1 mm/min 雨强条件下达到显著性差异。而灌木处理低覆盖度地表径流量和径流总量低于高覆盖度,壤中流和侵蚀泥沙量相反,且 4 个指标均达到显著水平。

表 2 不同植被类型与覆盖度对径流量及土壤侵蚀的影响

雨强/(mm·min <sup>-1</sup> )	处理	地表径流量/L	壤中流量/L	径流总量/L	侵蚀泥沙量/g
1	CK	51.64±3.86dA	—	51.64±3.86dA	341.55±13.63cA
	S1	29.07±4.95bA	1.83±0.06cB	30.91±4.92bA	9.93±1.42aA
	S2	18.08±1.87aA	2.52±0.23dB	20.59±1.71aA	6.20±0.95aA
	S3	36.05±2.33cA	1.39±0.04bB	37.44±2.37cA	33.47±3.00bA
	S4	50.29±2.46dA	0.21±0.04aA	50.49±2.50dA	8.40±0.93aA
	S5	16.10±1.21aA	3.02±0.12eB	19.12±1.28aA	3.60±0.81aA
2	CK	62.62±3.64dB	0.31±0.03a	62.93±3.66dB	592.31±17.79dB
	S1	22.65±2.62aA	1.55±0.06cA	24.20±2.57aA	11.38±0.40aA
	S2	20.06±2.09aA	1.81±0.03eA	21.87±2.10aA	7.42±1.11aA
	S3	39.92±4.33bA	0.77±0.02bA	40.70±4.31bA	69.11±1.89cB
	S4	55.16±2.72cA	0.31±0.03aB	55.47±2.74cA	26.31±0.87bB
	S5	18.63±1.07aA	1.72±0.01dA	20.35±1.07aA	4.25±0.90aA

注:不同小写字母代表同列同一雨强下不同处理间差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母代表同列同一植被配置不同雨强处理间差异显著( $P<0.05$ )。—表示降雨试验 30 min 内未能测到壤中流有效数据。下同。

## 2.2 不同植被类型与覆盖度对径流养分流失的影响

2.2.1 不同植被类型对地表径流、壤中流养分浓度的影响 从图 2 和图 3 可以看出,各径流小区地表径流 TN、TP 浓度范围在 2.04~3.94 mg/L,0.20~0.34 mg/L 之间,而壤中流 TN、TP 浓度范围在 33.5~72.16 mg/L,0.25~0.35 mg/L 之间。除 1 mm/min 雨强条件下裸地无壤中流产生之外,壤中流 TN 浓度是地表径流的 12.0~29.3 倍。在同一雨强下,裸地 TN 浓度均高于有植被处理组,说明植被降低了地表径流 TN 的浓度。草灌结合与草本处理地表径流 TN 浓度均较低且差异不大,表明草本与草灌结合方式可以有效对地表径流 TN 养分进行截留。而灌木处理下的地表径流、壤中流 TN 浓度均高于草本、草灌结合处理。

同一植被类型下,随着覆盖度的增加,草地地表径流和壤中流的 TN、TP 浓度大多都略有下降,但仅 TN 差异达到显著水平。灌木地表径流和壤中流的 TN、TP 浓度大多都略有上升,同样仅 TN 差异达到显著水平。壤中流 TP 浓度略高于地表径流。在同一雨强下,除 2 mm/min 雨强条件下的 TN 外,裸地处理地表径流 TN、TP 浓度均高于有植被处理,且差异达到显著水平。

2.2.2 不同植被类型与覆盖度对地表泥沙养分浓度及养分富集率的影响 由于侵蚀泥沙由细颗粒泥沙构成,对养分有较强的吸附作用,导致了养分流失的“富集”现象,富集程度是以侵蚀泥沙养分含量与基础土壤养分含量的比值即富集率来表示<sup>[19]</sup>。从表 3 可

表 3 不同植被类型与覆盖度对泥沙养分浓度及养分富集率的影响

雨强/(mm·min <sup>-1</sup> ) 处理	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	平均 富集率	
1	CK	0.66±0.05aA	0.71±0.06aA	0.94±0.08abA	39.57±2.56aA	6.48±0.84aA	1.06
	S1	0.95±0.08bcdA	0.82±0.04bA	1.01±0.09abcA	46.71±2.62bcA	8.19±1.00bA	1.30
	S2	0.98±0.08cdA	0.88±0.03bcA	1.06±0.06bcA	49.55±0.97cA	8.65±1.03bA	1.37
	S3	0.81±0.02bA	0.95±0.02cA	1.07±0.03bcA	54.71±2.03dA	8.62±0.98bA	1.36
	S4	0.88±0.11bcA	0.96±0.04cA	0.99±0.07abcA	55.76±1.67dA	8.75±0.89bA	1.38
	S5	1.06±0.07dA	0.90±0.02bcA	1.12±0.03cB	58.79±1.09dA	8.85±0.02bB	1.46
基础土壤	0.60±0.04a	0.65±0.03a	0.89±0.05a	45.24±2.02b	5.52±0.25a		
2	CK	0.69±0.04aA	0.82±0.08bA	0.96±0.06abA	42.62±1.32aA	6.31±1.07aA	1.11
	S1	1.08±0.04bA	0.89±0.11bA	0.99±0.03abcA	49.32±0.95bA	8.06±0.05bA	1.36
	S2	1.01±0.05bA	0.96±0.07bcA	1.04±0.07abcA	50.06±1.92bA	8.06±0.08bA	1.38
	S3	0.94±0.12bA	0.93±0.04bcA	1.02±0.05bcA	59.06±3.03cA	8.15±1.08bA	1.39
	S4	0.96±0.06bA	0.99±0.06bcA	0.92±0.02abA	60.26±2.09cB	8.22±1.05bA	1.39
	S5	1.12±0.16bA	1.08±0.11cB	1.06±0.02cA	64.14±1.01dB	8.58±0.09bA	1.54
基础土壤	0.60±0.04a	0.65±0.03a	0.89±0.05a	45.24±2.02a	5.52±0.25a		

## 2.3 不同植被类型与覆盖度对氮、磷流失量及流失途径的影响

从图 4 可以看出,氮的流失量较大,总量在 1.21~6.77 kg/hm<sup>2</sup> 之间,2 种雨强条件下,不同植被配置地表径流氮流失量、径流氮流失总量、泥沙氮流失量以及氮流失总量均表现为:裸地>灌木>草本>草灌结合,裸

以看出,侵蚀泥沙中有机质、碱解氮、全氮、速效磷、全磷的浓度均高于基础土样,“富集”现象比较明显。有植被处理对侵蚀泥沙各养分浓度的影响均达到显著水平,2 种雨强条件下平均富集率草灌结合处理均最大,高覆盖度灌木与低覆盖度灌木处理次之且差异较小,草本处理均较低且高覆盖度草本高于低覆盖度处理。

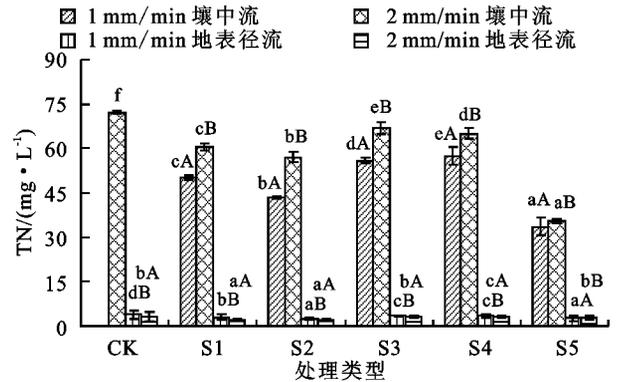


图 2 不同植被类型与覆盖度对径流 TN 浓度的影响

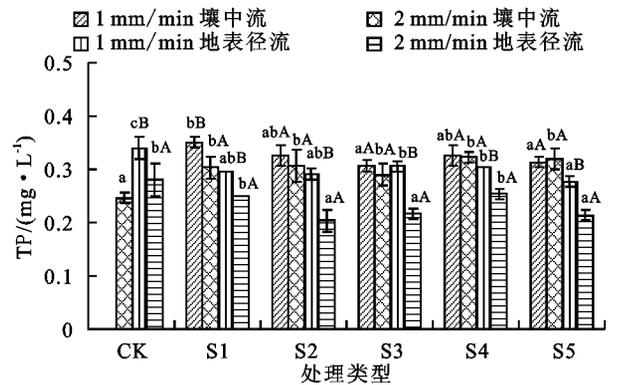


图 3 不同植被类型与覆盖度对径流 TP 浓度的影响

地氮流失总量是有植被处理组的 1.92~5.61 倍。

裸地泥沙氮流失占了氮流失总量的 63.08%,地表径流氮流失量占了 36.92%,壤中流氮流失几乎为 0,说明裸地氮流失以泥沙流失为主,径流氮流失次之。草本和草灌结合表现较为一致,其泥沙氮流失仅仅占了氮流失总量的 4.81%,3.04%,壤中流氮

流失量占氮流失总量比例较大,分别为 62.10% 和 59.71%,地表径流氮流失占到 33.08% 和 37.23%。草本和草灌结合处理组氮流失主要以壤中流流失为主,地表径流次之,泥沙流失量非常少。而灌木则处于草本、草灌结合与裸地处理之间,泥沙氮流失仅仅占了氮流失总量的 14.02%,壤中流氮流失量占氮流

失总量 17.46%,地表径流氮流失占到 68.51%。灌木碎石土坡地氮流失的主要途径是地表径流,且壤中流与泥沙流失量相当。

雨强对氮的流失有一定的影响,大雨条件下裸地与灌木处理组氮流失总量均小于暴雨,草本与草灌结合处理则相反。

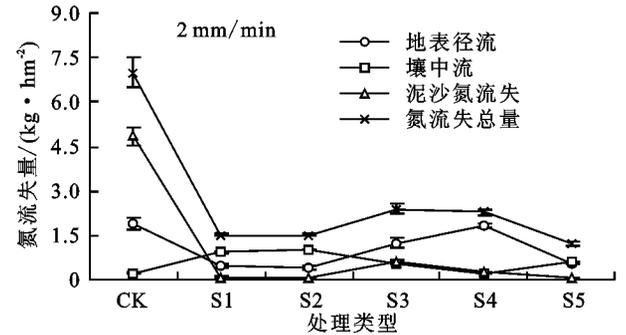
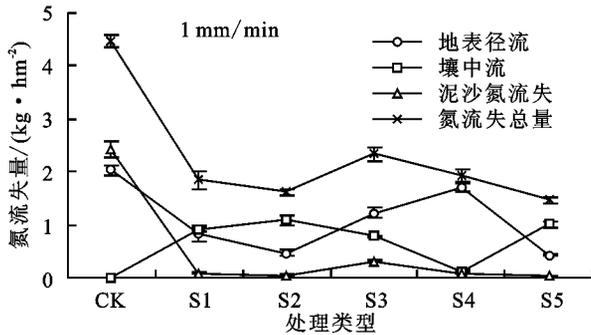
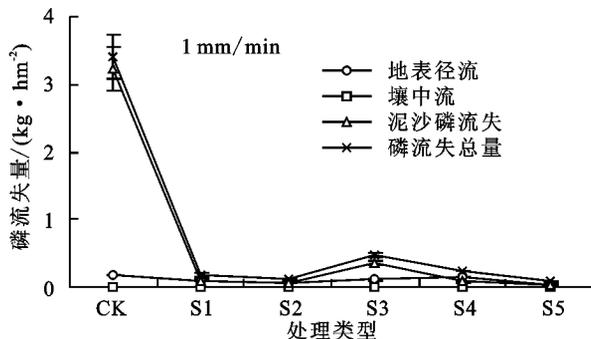


图 4 不同处理类型对氮素流失途径的影响

从图 5 可以看出,磷流失总量在 0.09~5.86 kg/hm<sup>2</sup> 之间,除裸地之外,磷流失量较小。2 种雨强条件下,不同植被配置地表径流磷流失量、径流磷流失总量、泥沙磷流失量以及磷流失总量均表现为:裸地>灌木>草本>草灌结合,有植被处理组地表径流磷流失量、泥沙磷流失量以及磷流失总量均显著低于裸地。裸地磷流失总量是有植被处理组的 7.15~64.99 倍。说明种植植被能显著减少地表径流磷流失量、泥沙磷流失量以及磷流失总量。灌木对磷素截留效果较差,草本可以较好的起到截留磷素的作用,而草灌结合对磷素截留效果最好。

裸地泥沙磷流失占了磷流失总量的 95.91%,壤中流磷流失几乎为 0;草本、灌木以及草灌结合均表现较为一致:泥沙磷流失占了磷流失总量的较大比例,分别为



57.76%,65.79%,46.60%,其次是地表径流磷流失占到 37.97%,33.76%,45.38%,壤中流磷流失量均最少,仅占磷流失总量 4.26%,0.43%,8.01%。说明含碎石土坡地磷素流失以泥沙流失为主,而在径流中,地表径流是磷流失的主要途径,这与已有研究结果相一致<sup>[20-21]</sup>。与裸地相比,有植被处理组受植被提高坡体抗冲性与抗蚀性的影响,导致侵蚀泥沙量减少,泥沙流失量占磷流失总量的比例有所下降,相应的,地表径流与壤中流占磷流失总量比例有所上升,侵蚀泥沙与地表径流共同成为磷流失的主要途径。雨强对不同处理组磷流失的影响有所不同,大雨条件下裸地与灌木处理组磷流失总量均小于暴雨,而雨强对草本、草灌结合处理的磷流失总量差异不显著。

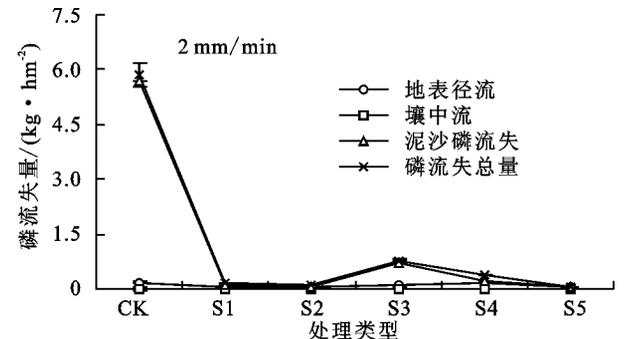


图 5 不同处理类型对磷素流失途径的影响

### 3 讨论

#### 3.1 不同植被类型对氮、磷流失量及流失途径的影响

裸地氮、磷主要损失途径是侵蚀泥沙,流失总量分别在 4.46~6.77,3.39~5.86 kg/hm<sup>2</sup> 之间,其中泥沙氮、磷流失占了氮、磷流失总量的 60% 以上,而有植物组边坡氮、磷流失总量分别在 1.21~2.40,0.09~0.79 kg/hm<sup>2</sup> 之间,泥沙氮流失仅占了氮流失总量很小的一部分,泥沙磷流失比例也略有下降,说明在碎石土坡地上配置植被,可通过减少侵蚀泥沙氮、磷流失量的方式来显著减少养分的流

失,进而改变养分流失途径,使得有植物处理组氮以壤中流或地表径流流失为主,侵蚀泥沙与地表径流共同成为磷流失的主要途径,之前的研究认为氮、磷主要通过单一的壤中流或侵蚀泥沙方式损失<sup>[15-16]</sup>,本研究在前人的基础上有进一步的发展。

本研究中有植被处理组氮素流失是以径流流失为主,其中灌木处理组氮流失的主要途径是地表径流,而草本和草灌结合处理组氮流失主要以壤中流流失为主。其原因可能是相较于花木蓝,贴地生长的狗

牙根更能增加含碎石土坡面粗糙率,在削减雨滴冲击的基础上有效的减缓了径流流速,从而减轻了径流对坡面的冲刷,加上狗牙根其根系属于须根系,且具有更高的根系密度,通过根系的穿插可以改善土壤结构,增加了土壤通透性,土壤抗蚀性与渗透能力得以增强,有助于壤中流的产生。

一般认为磷流失途径以侵蚀泥沙的携带为主<sup>[22]</sup>,这与本研究得出侵蚀泥沙是裸地磷流失的主要途径的结果相一致,而与侵蚀泥沙与地表径流共同成为有植被处理组磷流失的主要途径的结果不一致。造成这一差异的主要原因是由于植被覆盖导致侵蚀泥沙含量减少造成的。本研究所选灌木为多花木蓝,草本为狗牙根,植物冠部茎部对雨滴有消能截留作用,显著减少了雨滴对坡面的溅蚀与冲刷,根系有助于水分向坡体入渗<sup>[23]</sup>,从而直接减少了侵蚀泥沙的产生,使得侵蚀泥沙量大小顺序为裸地>有植被处理组。相关研究表明土壤颗粒对磷有较强的吸附能力,侵蚀泥沙含量与磷素的流失直接相关<sup>[6,24]</sup>,使得泥沙磷流失占磷流失总量的比例随侵蚀泥沙量的减少而减小,故有植被处理组侵蚀泥沙与地表径流共同成为磷流失的主要途径。

### 3.2 不同植被覆盖度对氮、磷流失量及流失途径的影响

从分析中可以看出,对于氮磷养分截留作用整体上遵循裸地<灌木<草本处理<草灌结合的规律,植被覆盖度与全氮、全磷的流失量呈显著负相关,这与已有研究相一致<sup>[25]</sup>。但分析本研究植被盖度与养分流失途径关系,发现草本与灌木有所不同:草本覆盖度与地表径流氮、磷流失量、径流总量氮、磷流失量呈显著负相关,与壤中流氮、磷流失量呈显著正相关,灌木覆盖度则与地表径流氮、磷流失量、径流总量氮、磷流失量呈显著正相关,与壤中流氮、磷流失量呈显著负相关,高覆盖度条件下灌木地表径流氮磷流失量均有所增加,其中高覆盖度条件下氮素流失量增加显著。其原因可能与高覆盖度灌木对降雨的缓冲有关,相关研究表明,在一定的雨强范围内,具有一定冲击力的雨滴可使部分毛管水加入到入渗水流中,雨滴本身的冲击力也可以通过对入渗速率的运动速度加速来增加入渗量<sup>[26-27]</sup>,此时植被可以通过增加入渗量的方式起到养分截留作用<sup>[28]</sup>。而本研究中高覆盖度下的灌木对降雨有较强的缓冲作用,在灌木林下形成的二次降雨冲击力大为减弱,达不到增加入渗量的程度,从而提高了地表径流侵蚀泥沙量,使得高覆盖度灌木 TN、TP 的地表径流、径流流失总量高于低覆盖度。

### 3.3 不同雨强对氮、磷流失量及流失途径的影响

一般认为氮磷流失随雨强的增大而增多<sup>[29]</sup>,本

研究中暴雨条件下草本与草灌结合处理组氮流失总量则均小于大雨,其原因一方面是因为绝大部分的氮素是以带负电荷的硝态氮形式随壤中流流失,而作为草地与草灌处理组氮的主要损失途径的壤中流,流速缓慢,土壤物理结构阻碍了这部分氮素的流失;另一方面则是由于氮流失总量还取决于地表径流中的养分浓度和地表径流量,在大雨条件下地表径流量和氮素流失浓度均较高,使得大雨时地表径流氮流失总量增加<sup>[30]</sup>。与裸地、灌木处理组不同的是雨强对草本、草灌结合处理的磷流失总量影响的差异不显著,这与草本、草灌结合处理影响下侵蚀泥沙含量的减少有关,使得侵蚀泥沙量在大雨和暴雨雨强条件下流失量都较为稳定,磷素在这 2 种处理组中不随着雨强的增强而增多。此外有很多关于林地氮磷流失的研究<sup>[31-32]</sup>也认为,良好草被覆盖可以有效减少林坡地氮磷流失。本研究中养分流失控制效果排序为:草灌>草本>灌木>裸地,草本与草灌结合处理对水土流失防治、氮磷养分截留均具有明显的效果。

由于植被地径密度与根系分布可以改变坡面冲刷与水体下渗,也是影响土壤养分流失的重因素,因此未来需进一步研究包括冠层覆盖度、地径密度、根系分布等因素单独对坡面养分流失量及途径影响的机理。此外灌木立地条件下氮、磷流失途径的改变,还需进一步深入研究来更好的解释其发生机理。

## 4 结论

(1)从裸地坡地向植物配置坡地转化过程中,植物配置措施对含碎石土坡地氮、磷的流失起到显著的截留作用,实质是氮、磷的主要损失途径由侵蚀泥沙向非侵蚀泥沙途径转化。

(2)在不同植被类型作用下含碎石土坡体氮、磷主要流失途径发生改变。裸地处理氮、磷主要损失途径是侵蚀泥沙;灌木处理氮的主要损失途径是地表径流,而草本与草灌结合处理则是地表径流和壤中流。草本、灌木以及草灌结合处理,侵蚀泥沙与地表径流是磷的主要损失途径。

(3)由氮磷流失总量来看,高覆盖度植物配置相对较低覆盖度氮、磷养分控制效果略优。其中草本覆盖度与地表径流氮、磷流失量及径流总量氮、磷流失量呈显著负相关,与壤中流氮、磷流失量呈显著正相关。灌木则与地表径流氮、磷流失量及径流总量氮、磷流失量呈显著正相关,与壤中流氮、磷流失量呈显著负相关。

(4)不同植被配置下,草灌结合截留效果最优,不同覆盖度配置草本效果均较好,不同覆盖度灌木配置效果则都比较差,建议含碎石土坡面养分控制可选择覆盖度 60% 以上草本或草灌结合的配置方式为宜。

## 参考文献:

- [1] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等.含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J].水科学进展,2014,25(2):189-195.
- [2] Ramos M C, Martinez-Casasnovas J A. Nutrient losses by runoff in vineyards of the Mediterranean Alt Penedès region(NE Spain)[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 113(1/4):356-363.
- [3] 吴东,黄志霖,肖文发,等.三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制[J].环境科学,2015,36(10):3825-3831.
- [4] 游珍,李占斌.坡面植被对径流的减流减沙作用机理及试验研究[J].泥沙研究,2011(3):59-62.
- [5] 蒲玉琳,谢德体,林超文,等.紫色土区不同植物篱模式控制坡耕地氮素流失效应[J].农业工程学报,2014,30(23):138-147.
- [6] Lenka N K, Dass A, Sudhishri S, et al. Soil carbon sequestration and erosion control potential of hedgerows and grass filter strips in sloping agricultural lands of eastern India[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 158(6):31-40.
- [7] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J].水土保持学报,2012,26(4):23-27.
- [8] Wang T, Zhu B, Xia L Z. Effects of contour hedgerow intercropping on nutrient losses from the sloping farmland in the Three Gorges Area, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(1):105-114.
- [9] Gimay G, Singh B R, Nyssen J, et al. Runoff and sediment associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376(1/2):70-80.
- [10] 肖雄,吴华武,李小雁.壤中流研究进展与展望[J].干旱气象,2016,34(3):391-402.
- [11] Vandamme J, Zou Q. Investigation of slope in stability induced by seepage and erosion by a particle method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 48(3):9-20.
- [12] 常龙飞,王晓龙,李恒鹏,等.巢湖典型低山丘陵区不同土地利用类型壤中流养分流失特征[J].生态与农村环境学报,2012,28(5):511-517.
- [13] 艾宁,魏天兴,朱清科.陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):26-30,35.
- [14] Marc D, Richard H. Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec (Canada) [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131(1/2):85-97.
- [15] 汪邦稳,杨洁,汤崇军,等.南方红壤区百喜草及其枯落物对降雨径流分配的影响[J].水土保持学报,2009,23(2):7-10,36.
- [16] 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.
- [17] 吴昌广,周志翔,肖文发,等.基于MODISNDVI的三峡库区植被覆盖度动态监测[J].林业科学,2012,48(1):22-28.
- [18] 刘纪根,张昕川,李力,等.紫色土坡面植被覆盖度对水土流失影响研究[J].水土保持研究,2015,22(6):16-20,27.
- [19] 陈玲,刘德富,宋林旭,等.香溪河流域坡耕地人工降雨条件下土壤氮素流失特征[J].生态与农村环境学报,2012,28(6):616-621.
- [20] 唐佐芯,王建文,王克勤.不同施肥水平下植草对坡地径流氮素流失的调控作用[J].水土保持学报,2012,26(1):12-16.
- [21] 林超文,罗春燕,庞良玉,等.不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J].生态学报,2010,30(22):6091-6101.
- [22] 黄利玲,王子芳,高明,等.三峡库区紫色土旱坡地不同坡度土壤磷素流失特征研究[J].水土保持学报,2011,25(1):30-33.
- [23] 李毅,邵明安.草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验[J].农业工程学报,2008,24(10):1-5.
- [24] 张燕,李永梅,张怀志,等.滇池流域农田径流磷素流失的土壤影响因子[J].水土保持学报,2011,25(4):41-45.
- [25] 钱婧,张丽萍,王小云,等.人工降雨条件下不同坡长和覆盖度对氮素流失的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):6-10.
- [26] Morin J, Van Winkel. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(4):1223-1227.
- [27] 闵俊杰.不同植被格局下人工模拟降雨对坡面侵蚀的影响[D].南京:南京林业大学,2012.
- [28] Liu Q J, Quinton J N, Bailey A P, et al. The effects of minimal tillage, contour cultivation and in field vegetative barriers on soil erosion and phosphorus loss [J]. *Soil Tillage Research*, 2009, 106(1):145-151.
- [29] 林超文,罗春燕,庞良玉,等.不同雨强和施肥方式对紫色土养分损失的影响[J].中国农业科学,2011,44(9):1847-1854.
- [30] 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(6):180-191.
- [31] 刘俏,张丽萍,聂国辉,等.浙江红壤区经济林坡地氮素径流流失特征研究[J].农业环境科学学报,2014,33(7):1388-1393.
- [32] 范少辉,刘蔚漪,郭宝华,等.闽北不同类型毛竹林生态系统植被状况对地表径流的影响[J].热带作物学报,2012,33(7):1316-1319.