

翻耕除草对不同坡长下紫色土氮磷流失的影响

梁珂¹, 贺小容², 何丙辉¹, 李天阳¹, 杜映妮¹

(1.西南大学资源环境学院,三峡库区生态环境教育部重点实验室,
重庆 400715;2.重庆市璧山区水土保持监测站,重庆 402760)

摘要:为揭示自然降雨下翻耕除草和坡长对紫色土氮、磷流失的影响,通过野外设置径流小区(2个坡面:翻耕除草与自然恢复;3种坡长:20,40,60 m,共9个小区),定位监测研究不同处理下产流产沙及氮、磷流失特征。结果表明,同一坡面不同坡长间产流产沙差异不显著($P>0.05$);同一坡长不同坡面处理小区的径流量、产沙量差异极显著($P<0.01$)。与翻耕除草相比,自然恢复坡面20,40,60 m坡长小区径流量分别减少77.55%,62.62%,79.56%,产沙量分别减少85.21%,94.97%,96.25%。仅在40 m坡长下,不同坡面处理径流中DN、DP流失量差异不显著($P>0.05$),其他坡长DN、DP流失量差异显著($P<0.05$);各坡长不同坡面处理下泥沙中TN、TP流失量差异极显著($P<0.01$)。与翻耕除草相比,自然恢复坡面处理径流中DN、DP流失量分别减少75.13%,80.22%,泥沙中TN、TP流失量分别减少96.07%,96.38%。在翻耕除草坡面处理下,降雨强度与径流量、产沙量及泥沙中的TN和TP流失量呈极显著幂函数关系;在自然恢复坡面处理下,上述关系均不显著。研究结果可为紫色土氮、磷流失及面源污染防治等提供理论参考依据。

关键词:坡长;翻耕除草;产流量;产沙量;氮流失;磷流失

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)04-0007-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.04.002

Effects of Tillage and Weeding on Nitrogen and Phosphorus Losses of Purple Soil at Different Slope Lengths

LIANG Ke¹, HE Xiaorong², HE Binghui¹, LI Tianyang¹, DU Yingni¹

(1.Key Laboratory of Eco-environment in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715;
2.Bishan Eco-environment Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Chongqing 402760)

Abstract: To clarify the influences of tillage and weeding and slope length on the losses of nitrogen (N) and phosphorous (P) under natural rainfall in purple soil area, 9 plots combined with two land disturbances (tillage and weeding and natural restoration) and three slope lengths (20, 40, and 60 m) were established to compare the runoff and sediment yield, and N and P losses. The results showed that slope length had no remarkable effect on the runoff and sediment yield under the same land condition ($P>0.05$), while tillage and weeding plots significantly differed the runoff and sediment yield from natural-restored plots under the same slope length ($P<0.01$). Natural-restored plots of 20, 40, 60 m respectively reduced runoff by 77.55%, 62.62%, 79.56%, and sediment yield by 85.21%, 94.97%, 96.25%, compared with the tillage and weeding plots. There were significant effects of land disturbance on runoff-related DN and DP losses under 20 and 60 m plots ($P<0.05$) and on sediment-related TN and TP losses across all plot lengths ($P<0.01$). Natural-restored plots could reduce the losses of DN and DP in runoff by 75.13% and 80.22%, and the losses of TN and TP in sediment by 96.07% and 96.38%, respectively. Rainfall intensity had significantly power relationship with runoff and sediment yield, and TN and TP losses with sediment-related under tillage and weeding plots, but there was no significant relationship under natural-restored plots. The results can provide theoretical reference for N and P losses and non-point source pollution control in the purple soil area.

Keywords: slope length; tillage and weeding; runoff; sediment yield; nitrogen loss; phosphorus loss

收稿日期:2019-12-27

资助项目:国家自然科学基金项目(41771312);中央高校基本科研业务费项目(SWU118079)

第一作者:梁珂(1995—),女,硕士研究生,主要从事城市水土保持研究。E-mail:lk20200731@163.com

通信作者:何丙辉(1966—),男,教授,博导,主要从事土壤侵蚀与水土保持、森林培育与林业生态工程研究。E-mail:hebinghui@swu.edu.cn

水土流失造成的土壤氮磷流失不仅导致土地生产力下降,还会引发水质恶化、水体富营养化等生态环境问题^[1]。地形、植被覆盖、土地利用类型、施肥耕作等因子是影响土壤氮磷随降雨径流流失变化的主要下垫面因子^[2]。长期以来,国内外学者^[3-5]采用野外监测、室内模拟等方法对这些因子作用下的土壤氮磷流失规律进行了深入研究。Vahed等^[6]通过在森林、农田、牧场等坡面选择不同坡度和坡向进行人工降雨,研究土地利用类型、坡度、坡向等因子对氮、磷流失的影响;Diego等^[7]通过野外监测研究了不同植被覆盖下氮、磷流失规律;王静等^[8]通过长期定位监测研究分析巢湖流域不同施肥耕作对农田径流氮、磷流失的影响;彭梦玲等^[9]采用室内模拟降雨试验研究不同雨强与坡度下黄土裸露坡面水沙及氮磷养分流失规律。然而,由于各研究试验条件的不同,下垫面各因子对土壤氮磷流失规律的影响机制还尚未取得统一认识。

紫色土肥力高,生产潜力大,但其结构松散,水稳性差,易发生水土流失,是三峡库区面源污染的重要贡献源^[10]。目前,已有研究报道了紫色土区降雨强度^[11]、地形^[12]、植被覆盖^[13]、土地利用类型^[14]、施肥耕作^[15]等对土壤氮磷流失的影响。但关于翻耕除草及坡长对氮、磷养分流失特征的研究还较少见,二者对紫色土氮磷流失综合影响机制还不清楚。前期,Guo等^[16]分析了不同坡长下翻耕除草对产流率与产沙率的影响,而未阐明该条件下随径流及泥沙流失的氮磷变化特征。因此,本研究通过对紫色土区不同坡长扰动地表降雨侵蚀事件定位监测,研究自然降雨下翻耕除草和坡长对产流产沙、氮磷流失变化的影响,并探究降雨强度与产流产沙、氮磷流失的耦合机制,为紫色土及三峡库区水土流失及农业面源污染防治提供科学支撑。

1 材料与方法

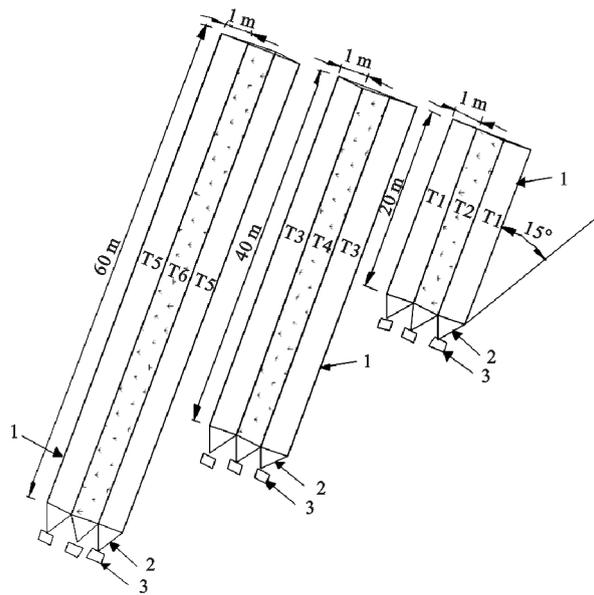
1.1 试验区概况

试验点位于重庆市北碚区歇马镇(106°14′—106°25′E,29°43′—106°48′N),海拔高度为175~1312 m。试验区属亚热带温暖湿润季风区,年均降水量1174 mm,年均气温18.6℃,平均日照时间1006.2 h,无霜期359 d。试验小区土壤为侏罗纪沙溪庙组母质发育的灰棕紫泥土(坡度为15°)。雨季前采集研究区土样,其基本理化性质为:容重1.38 g/cm³,粒径分布中砂粒(2~0.02 mm)36.10%,粉粒(0.02~0.002 mm)38.19%,黏粒(<0.002 mm)25.17%,pH 7.25,有机质含量25.13 g/kg,全氮含量1.35 g/kg,全磷含量0.49 g/kg。

1.2 试验设计

在2013年雨季开展侵蚀性降雨事件观测。在同一坡面(坡度为15°)设置了6个处理,即20,40,60 m

3种坡长及翻耕除草和自然恢复2种坡面处理(各坡长下翻耕除草坡面均设置2次重复),共9个径流小区,各小区宽均为1 m(图1)。各径流小区间用水泥埂隔开,埂宽15 cm,地下埋深30 cm,地上高出地面20 cm。在径流小区下游末端设置径流池,由沿小区宽度方向设立的集流槽连接。集流槽中间位置设“V”形径流入水口。集流槽与径流池皆用铁皮覆盖,以消除直接降雨对径流量的影响。各小区径流入水口高度一致。9个小区处理前土壤条件一致。监测试验开始前,翻耕除草坡面(T1、T3、T5)处理为:人工翻松表土约30 cm,并拔去荒草植被,表面耙平;自然恢复坡面(T2、T4、T6)不作松土和拔草处理,保持自然坡面,其上长有杂草,覆盖度约为60%。



注:1为水泥墙;2为“V”形径流出口;3为集水桶;T1、T3、T5为翻耕除草坡面;T2、T4、T6为自然恢复坡面。

图1 试验设计示意

1.3 样品采集与分析

在试验点设置自计雨量计记录降雨量和降雨历时。监测试验期间,共记录到8场侵蚀性降雨事件(2013年5月13日至7月18日),其降雨量为30.3~71.4 mm,降雨强度为2.72~6.66 mm/h(图2)。待侵蚀性降雨产流完成后,先测定径流总量,然后用清洁竹竿充分搅匀,进行不同部位、不同深度多点采样。将各水样转入500 mL去离子水润洗后的塑料瓶中,贴上标签。一次侵蚀性降雨事件中,各小区均采集2瓶水样。在取样结束后,用清水将径流池清洗干净,以备下一次采样和计量。将采集到的2瓶水样带回实验室,其中1瓶供泥沙浓度分析,并以此计算总产沙量;另外1瓶水样则先通过0.45 μm混合纤维素酯水系滤膜,滤液用于分析溶解性总氮(DN)及溶解性总磷(DP),滤膜上泥沙则风干后称重,保存备用。由于各次侵蚀性降雨事件中获得的泥沙量较少,无法单独分析氮磷含量,因此将相同处理下各次降雨事件的

产沙总量加权平均制得混合样(6份),用于测定各处理下泥沙中的 TN 及 TP 平均浓度,并用于计算各次降雨事件各处理下的氮磷流失量。径流中 DN 含量采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定;DP 含量采用过硫酸钾氧化钼锑抗分光光度法测定;泥沙中 TN 含量采用半微量凯氏蒸馏法测定;TP 含量采用钼蓝比色法测定^[17]。

计算公式为:

$$W = V_i C_{泥i} \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$L = \frac{V_i C_{径i}}{S \times 10^3} \quad (2)$$

$$M = \frac{W_i C_{均}}{S \times 10^3} \quad (3)$$

$$S = ab \quad (4)$$

式中: W 为产沙量(kg); V_i 为降雨径流量(L); $i = 1 \sim n$ (n 是降雨事件的编号); $C_{泥i}$ 为样品泥沙浓度(g/L); L 为径流 DN、DP 流失量(mg/m^2); $C_{径i}$ 为径流 DN、DP 浓度(g/L); S 为小区面积(m^2); a 为小区宽度(m); b 为小区长度(m); M 为泥沙 TN、TP 流失量(mg/m^2); $C_{均}$ 为泥沙 TN、TP 平均浓度(g/kg)。

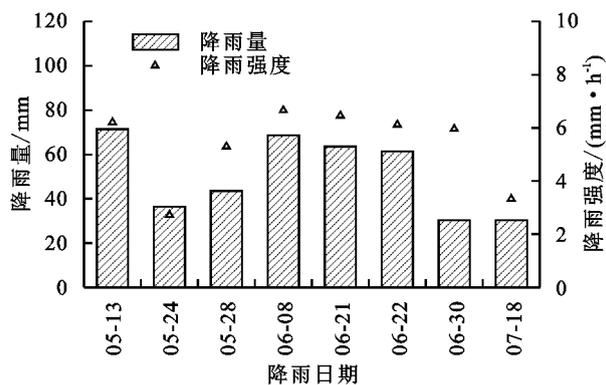
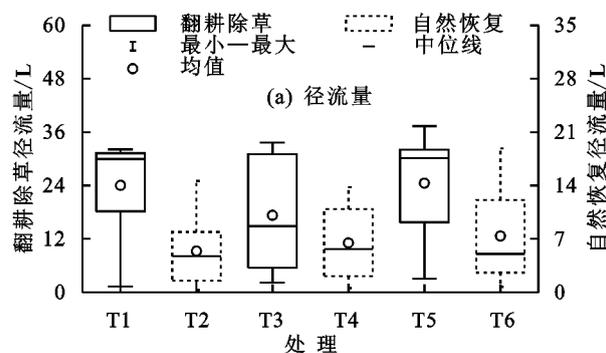


图 2 各次降雨事件特征



1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 软件进行数据处理和分析。采用 Kruskal—Wallis 检验同一坡面处理不同坡长对径流和泥沙中 N、P 流失量的影响,用 Mann—Whitney 检验同一坡长下 2 种坡面处理对径流和泥沙中 N、P 流失量的影响。本文显著性水平设置为 $P < 0.05$ 为差异显著; $P < 0.01$ 为差异极显著。采用 AutoCAD 2018 和 Originlab 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 产流产沙特征

在 8 场侵蚀性降雨事件中,不同坡长和坡面处理下的径流量、产沙量见图 3,显著性检验结果见表 1。同一坡面处理不同坡长小区间的径流量差异不显著($P > 0.05$),即翻耕除草坡面中的 T1、T3 和 T5 间差异不显著($P > 0.05$),自然恢复坡面中的 T2、T4 和 T6 间差异不显著($P > 0.05$)。在 20 m 坡长条件下,不同坡面处理小区的径流量差异极显著($P < 0.01$),表现为 T1(24.05 L) > T2(5.40 L);在 40 m 坡长条件下,不同坡面处理小区的径流量差异不显著($P > 0.05$),即 T3 与 T4 差异不显著($P > 0.05$);在 60 m 坡长条件下,不同坡面处理小区的径流量差异显著($P < 0.05$),表现为 T5(24.55 L) > T6(7.38 L)。

同一坡面处理不同坡长小区间的产沙量差异均不显著($P > 0.05$),即翻耕除草坡面中的 T1、T3 和 T5 间差异不显著($P > 0.05$),自然恢复坡面中的 T2、T4 和 T6 间差异不显著($P > 0.05$)。各坡长下 2 种坡面处理小区的产沙量均差异极显著($P < 0.01$),表现为 T1(0.34 kg)为 T2(0.02 kg)的 17 倍,T3(0.20 kg)为 T4(0.01 kg)的 20 倍,T5(0.27 kg)为 T6(0.01 kg)的 27 倍。

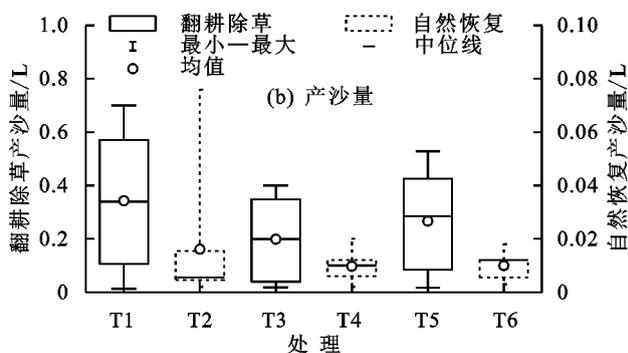


图 3 不同处理下径流量与产沙量

2.2 氮磷流失特征

2.2.1 不同处理下径流中 DN、DP 流失特征 不同坡长和坡面处理下径流 DN、DP 流失量见图 4,显著性检验结果见表 2。在翻耕除草坡面处理下,不同坡长之间径流 DN 流失量差异显著($P < 0.05$),表现为 T1($2.44 \text{ mg}/\text{m}^2$) > T3($1.50 \text{ mg}/\text{m}^2$) > T5($0.80 \text{ mg}/\text{m}^2$)。

在自然坡面处理下,不同坡长之间径流 DN 流失量差异不显著,即 T2、T4 和 T6 间差异不显著。在 20 m 坡长条件下,不同坡面处理间径流 DN 流失量差异极显著($P < 0.01$),表现为 T1($2.44 \text{ mg}/\text{m}^2$) > T2($0.45 \text{ mg}/\text{m}^2$);在 40 m 坡长条件下,不同坡面处理间径流 DN 流失量不显著($P > 0.05$),即 T3 与 T4

差异不显著($P>0.05$);在 60 m 坡长条件下,不同坡面处理间径流 DN 流失量差异显著($P<0.05$),表现为 $T5(0.80 \text{ mg/m}^2)>T6(0.30 \text{ mg/m}^2)$ 。

同一坡面处理不同坡长间径流 DP 流失量均不显著($P>0.05$),即翻耕除草坡面中 T1、T3 和 T5 间差异不显著($P>0.05$),自然恢复坡面中的 T2、T4 和 T6 间差异不显著($P>0.05$)。在 20 m 坡长条件下,不同坡面处理间径流 DP 流失量差异显著($P<0.05$),表现为 $T1(0.69 \text{ mg/m}^2)>T2(0.49 \text{ mg/m}^2)$;在 40 m 坡长条件下,不同坡面处理间 DP 流失量差异不显著($P>0.05$),即 T3 与 T4 差异不显著($P>0.05$);在 60 m 坡长条件下,不同坡面处理间 DP 流失量差异显著($P<0.05$),表现为 $T5(0.12 \text{ mg/m}^2)>T6(0.05 \text{ mg/m}^2)$ 。

2.2.2 不同处理下泥沙中 TN、TP 流失特征 不同坡长和坡面处理下泥沙中 TN、TP 流失量见图 5,显著性检验结果见表 3。翻耕除草坡面处理下,不同坡长之间泥沙 TN 流失量差异不显著($P>0.05$),即翻耕除草坡面中 T1、T3 和 T5 间差异不显著($P>0.05$);自然坡面处理下,不同坡长之间泥沙 TN 流失量差异显著($P<0.05$),表现为 $T2(0.93 \text{ mg/m}^2)>T4(0.27 \text{ mg/m}^2)>$

$T6(0.17 \text{ mg/m}^2)$ 。各坡长下 2 种坡面处理小区的泥沙 TN 流失量均差异极显著($P<0.01$),表现为 T1 (23.03 mg/m^2)为 T2(0.93 mg/m^2)24.76 倍、T3(6.28 mg/m^2)为 T4(0.27 mg/m^2)23.26 倍、T5(5.18 mg/m^2)为 T6(0.17 mg/m^2)30.47 倍。

表 1 不同处理下径流量与产沙量显著性检验结果

处理	指标	标准差	非参数检验显著水平
坡面	翻耕除草	径流量	12.56
		产沙量	0.21
	自然恢复	径流量	5.29
		产沙量	0.01
坡长	20 m	径流量	13.00
		产沙量	0.24
	40 m	径流量	11.04
		产沙量	0.15
	60 m	径流量	13.36
		产沙量	0.19

注:K—W 检验坡长对同一坡面处理下产沙量、产沙量的影响;M—W 检验坡面处理在同一坡长下对产沙量、产沙量的影响;* 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$;ns 表示差异不显著。下同。

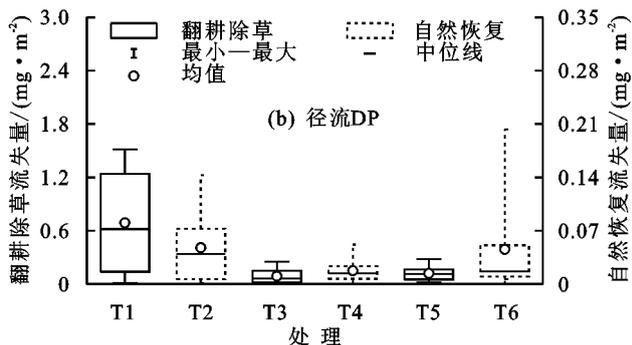
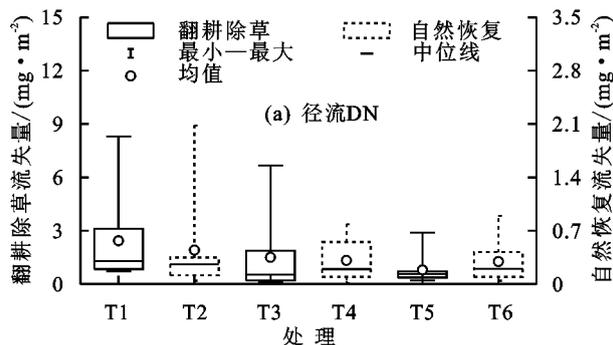


图 4 不同处理下径流中 DN、DP 流失量

表 2 不同处理下径流中 DN、DP 流失量显著性检验结果

处理	指标流失量	标准差	非参数检验显著水平
坡面	翻耕除草	径流 DN	2.14
		径流 DP	0.44
	自然恢复	径流 DN	0.44
		径流 DP	0.05
坡长	20 m	径流 DN	2.16
		径流 DP	0.52
	40 m	径流 DN	1.67
		径流 DP	0.71
60 m	径流 DN	0.68	
	径流 DP	0.08	

翻耕除草坡面处理下,不同坡长之间泥沙 TP 流失量差异不显著($P>0.05$),即翻耕除草坡面中 T1、T3 和 T5 间差异不显著($P>0.05$);自然坡面处理不

同坡长间泥沙 TP 流失量差异显著($P<0.05$),表现为 $T2(0.34 \text{ mg/m}^2)>T4(0.09 \text{ mg/m}^2)>T6(0.06 \text{ mg/m}^2)$ 。各坡长下 2 种坡面处理小区间的泥沙 TP 流失量均差异极显著($P<0.01$),表现为 T1(9.02 mg/m^2)为 T2(0.34 mg/m^2)的 26.53 倍, T3(2.51 mg/m^2)为 T4(0.09 mg/m^2)的 27.89 倍, T5(1.89 mg/m^2)为 T6(0.06 mg/m^2)的 31.33 倍。

2.3 降雨强度与产流产沙量、氮磷流失量的相关性

图 6 为翻耕除草与自然恢复坡面处理下,降雨强度因子与径流量、产沙量、径流中 DN 和 DP 流失量、泥沙中 TN 和 TP 流失量等的回归关系。从图 6 可以看出,翻耕除草处理下,降雨强度与产流量、产沙量、泥沙中 TN 和 TP 流失量呈极显著幂函数关系,而与径流中 DN 和 DP 流失量无显著函数关系;在自然恢复坡面下,降雨强度与产流产沙及 N、P 流失量间无显著函数关系。

3 讨论

3.1 翻耕除草对不同坡长紫色土产流产沙的影响

本研究结果表明,相比翻耕除草坡面,自然恢复坡面可显著减少产流产沙量。这可能是因为翻耕除草破坏地表土壤结构,降低了土壤抗蚀性,在雨滴击溅下裸露土壤表面易板结,坡面径流对土壤颗粒分散

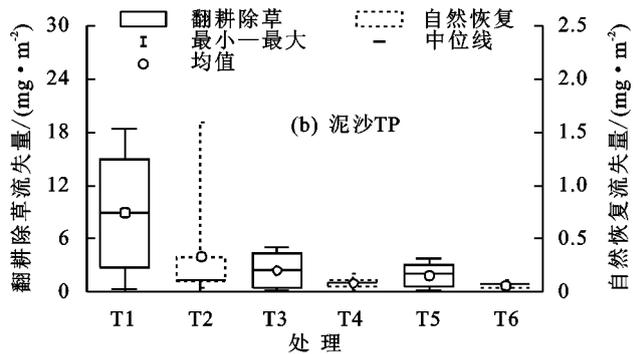
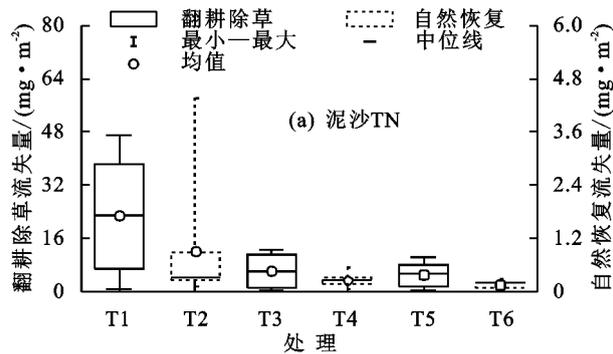


图 5 不同处理下泥沙中 TN、TP 流失量

表 3 不同处理下泥沙中 TN、TP 流失量显著性检验结果

处理	指标流失量	标准差	非参数检验 显著水平
坡面	翻耕除草 泥沙 TN	13.18	0.057 ^{ns}
	翻耕除草 泥沙 TP	5.17	0.048 [*]
	自然恢复 泥沙 TN	0.87	0.016 [*]
	自然恢复 泥沙 TP	0.32	0.039 [*]
坡长	20 m 泥沙 TN	16.49	0.002 ^{**}
	20 m 泥沙 TP	6.46	0.002 ^{**}
	40 m 泥沙 TN	4.62	0.001 ^{**}
	40 m 泥沙 TP	1.85	0.001 ^{**}
	60 m 泥沙 TN	3.70	0.001 ^{**}
	60 m 泥沙 TP	1.34	0.001 ^{**}

降雨是产生径流和土壤侵蚀的先决条件^[23]。本研究中,翻耕除草坡面处理下,降雨强度与径流量、产沙量呈极显著幂函数关系,这与姚冲等^[24]的研究结果相似。江森华等^[25]在闽北裸露红壤坡地研究发现,小雨和中雨时降雨强度与径流量、产沙量呈线性相关。然而,陈强等^[26]通过在重庆黄壤坡耕地上的模拟降雨试验发现,降雨强度与侵蚀产沙量呈显著线性关系,而与径流量无显著相关性,这可能与自然降雨过程变化更复杂有关。在本研究中,降雨强度是各次降雨事件的综合描述,未能反映降雨过程的变化^[25]。此外,微地貌、土壤前期含水率、土壤团聚体含量等因素也影响着产流、产沙量^[27]。未来还需要更多野外监测数据来揭示自然降雨与坡面产流产沙的数学关系。

3.2 翻耕除草对不同坡长紫色土 N、P 流失的影响

在本研究区域,土壤 N、P 流失主要途径为泥沙,泥沙中 N、P 养分流失量分别占总流失量的 86.11%, 93.24%, 这与倪九派等^[28]研究结果相似;黄丽等^[29]通过室内模拟

和搬运作用增强^[18-19];另一方面,自然恢复坡面植被根系及地表枯枝落叶为土壤提供有机源和胶结分泌物,增加土壤抗蚀能力^[20];植被覆盖能削减雨滴动能,增加了坡面粗糙度和径流下渗时间,改变了坡面流水动力学特征以及侵蚀产沙的发生发展过程^[21-22],使得产流产沙量显著减小。

降雨发现,紫色土坡地土壤养分流失主要载体为泥沙中的微团聚体(<0.02 mm)和黏粒(<0.002 mm);傅涛等^[11]在不同雨强和坡度条件下发现,紫色土泥沙中 N、P 浓度和流失量远大于径流。然而,王洪杰等^[30]通过监测 3 个紫色土小流域发现,径流为 N、P 流失主要途径,这可能是因为流域尺度下泥沙在输移过程中发生沉积,养分则更多通过径流流失。此外,本研究发现,雨强较大时养分主要流失载体为泥沙,而雨强较小时则表现为径流流失(图 6),这主要是因为大雨强下产沙量较大,颗粒态养分流失占主要地位,而小雨强下溶解态流失占主要地位,该结果与马琨等^[31]研究结果类似。

本研究发现,自然恢复坡面相比翻耕除草坡面可显著增加径流入渗,减小产沙量,削减 N、P 流失。这主要是因为人类活动破坏表层土壤结构,降低土壤抗蚀力,致使土壤易被破碎和分离,增加土壤侵蚀和土壤养分流失几率^[32-33]。相反,地表植被覆盖通过消减降雨动能,避免土壤结构破坏,减少坡面侵蚀,进而有效减少坡面养分流失^[34]。张晓艳等^[35]研究发现,次降雨下川中丘陵区农田、果园的土壤侵蚀和养分流失量明显大于草地、灌丛、林地;黄河仙等^[36]研究表明,在南方红壤坡地农事耕作会促进养分流失,自然植被具有良好的水土和养分保持作用。本研究发现,翻耕除草坡面处理下,降雨强度与泥沙中 TN 和 TP 流失量呈极显著幂函数关系,但与径流中 DN 和 DP 流失量均无显著函数关系;在自然恢复坡面处理下,上述关系均不显著。康玲玲等^[37]通过室内人工模拟降雨试验发现,黄土径流中养分流失较少,降雨强度与泥沙中 TN、TP 流失量呈显著线性函数关系;马琨

等^[31]研究表明,模拟降雨下红壤坡地降雨强度与径流中养分流失量没有明显相关性,与泥沙中养分流失量呈正相关;傅涛等^[11]通过模拟研究不同雨强下三峡库区紫色土养分流失规律发现,径流和泥沙中养分

流失量皆与降雨强度无关。说明降雨强度与产流产沙以及 N、P 流失间的数学耦合关系受试验条件的显著影响。未来需要更多的野外监测数据,以便精确揭示降雨特性与产流产沙及养分流失间的耦合机制。

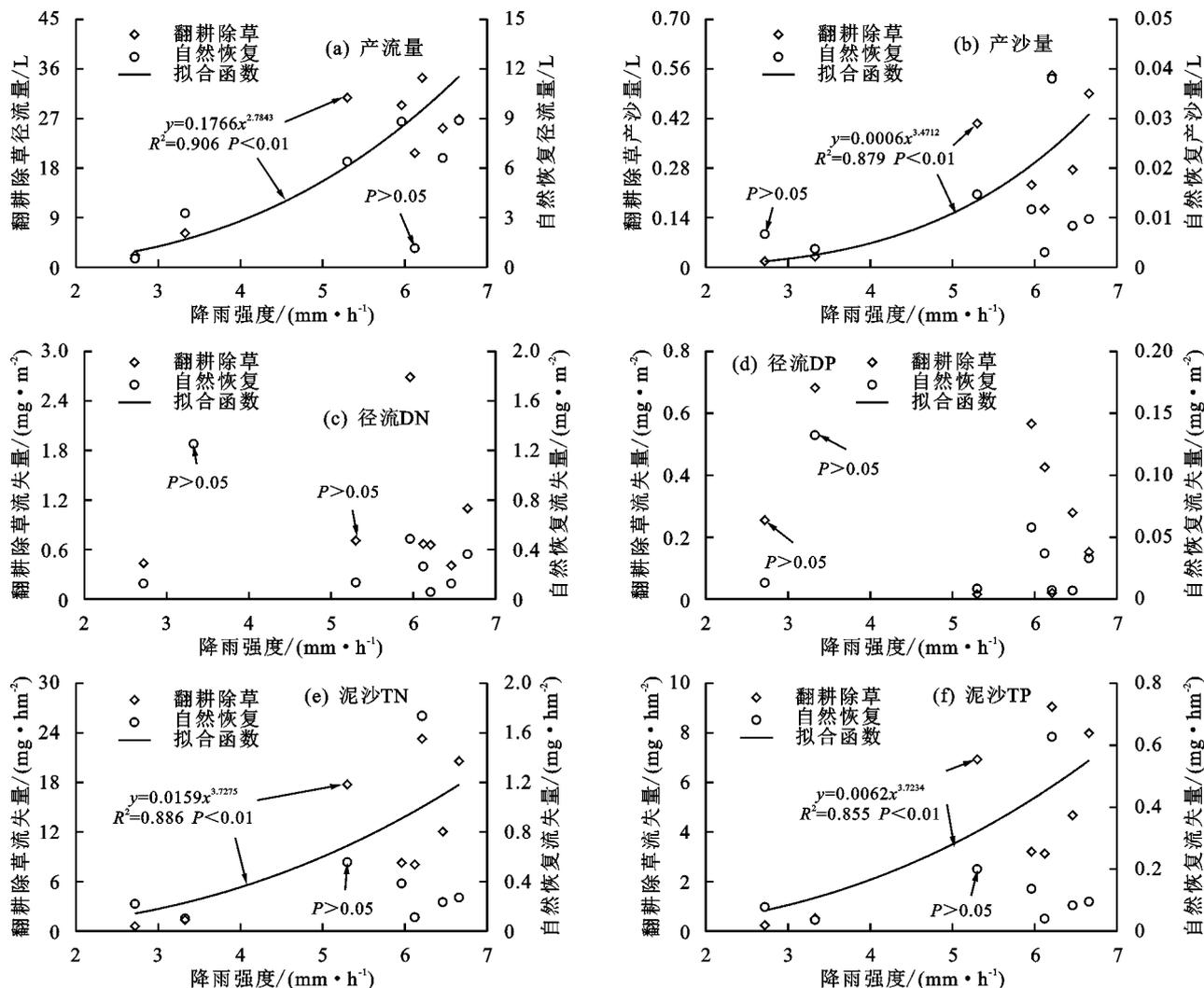


图 6 不同坡面条件下降雨强度与产流量、产沙量、径流中 DN、DP 流失量及泥沙中 TN、TP 流失量间的函数关系

4 结论

同一坡面处理下,不同坡长间的产流产沙、径流中 DN 和 DP 流失量总体上差异不显著($P > 0.05$),而泥沙中 TN 和 TP 流失量差异显著($P < 0.05$)。与翻耕除草坡面相比,自然恢复坡面可显著减少径流量及产沙量,且减少 N、P 流失,其中径流流失的 DN 可减少 75.13%,DP 减少 80.22%,而随泥沙流失的 TN、TP 减少率分别高达 96.07%,96.38%。不同坡面处理下,降雨强度与产流产沙量以及 N、P 流失量的耦合关系显著不同。翻耕除草处理下,降雨强度与产流量、产沙量、泥沙中 TN 和 TP 流失量呈极显著幂函数关系,而与径流中 DN 和 DP 流失量无显著函数关系;在自然恢复坡面,上述关系均不显著。

参考文献:

[1] 高懋芳,邱建军,刘三超,等.基于文献计量的农业面源

污染研究发展态势分析[J].中国农业科学,2014,47(6): 1140-1150.

- [2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M].United States, Dept. of Agriculture: Agriculture handbook (USA), 1978: 537.
- [3] 胡昱彦,庄舜尧,郭益昌,等.不同施肥模式对雷竹林氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):51-57.
- [4] 张梦,李冬杰,周玥.雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):85-90.
- [5] 范晓娟,张丽萍,邓龙洲,等.植被覆盖和施肥对不同坡长坡地总磷流失的影响[J].水土保持学报,2017,31(6): 27-32.
- [6] Vahed B S, Masoud J S, Asghar F. Sediment-bound soil nutrient loss under simulated rainfall[J].Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University,2017,67(1):37-48.

- [7] Diego S, Villegas J C, Juan D L, et al. Vegetation cover and rainfall seasonality impact nutrient loss via runoff and erosion in the Colombian Andes[J]. *Regional Environmental Change*, 2016, 17(3): 1-13.
- [8] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 巢湖流域不同耕作和施肥方式下农田养分径流流失特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 6-11.
- [9] 彭梦玲, 吴磊, 乔闪闪. 不同雨强下黄土裸坡水—沙—氮磷流失耦合模拟[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(3): 1109-1116.
- [10] 李南洁, 肖新成, 曹国勇, 等. 面源污染下三峡库区农业生态环境效率及影子价格测算[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(11): 203-210.
- [11] 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, 101.
- [12] 陈正维, 朱波, 刘兴年. 不同坡度下紫色土坡耕地径流与氮素流失特征[J]. *中国农村水利水电*, 2014(10): 68-72.
- [13] Gao Y, Zhu B, Zhou P, et al. Effects of vegetation cover on phosphorus loss from a hillslope cropland of purple soil under simulated rainfall: A case study in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 85(3): 263-273.
- [14] 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. *环境科学*, 2012, 33(10): 3390-3396.
- [15] 闫建梅, 何丙辉, 田太强, 等. 施肥水平与耕作模式对紫色土坡耕地地表径流磷素流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 132-136.
- [16] Guo X M, Li T Y, He B H, et al. Effects of land disturbance on runoff and sediment yield after natural rainfall events in southwestern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(10): 9259-9268.
- [17] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [18] 李会, 周运超, 刘娟, 等. 喀斯特土壤抗蚀性对不同土地利用方式的响应[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5): 16-23.
- [19] 郭晓朦, 何丙辉, 姚云, 等. 扰动地表下不同长度坡面土壤物理性质及水分入渗特征[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(7): 57-65.
- [20] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤微团聚体分形特征研究[J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 571-575.
- [21] 潘成忠, 上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 371-377.
- [22] Xu C, Yang Z J, Qian W, et al. Runoff and soil erosion responses to rainfall and vegetation cover under various afforestation management in subtropical montane forest[J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(14): 1711-1724.
- [23] 代数, 蒋光毅, 夏清, 等. 坡度和雨强对重庆市黄壤旱坡地产生沙特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 1-5, 11.
- [24] 姚冲, 查瑞波, 黄少燕, 等. 模拟降雨条件下第四纪红黏土坡面侵蚀过程[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 10-15.
- [25] 江森华, 黄荣珍, 谢锦升, 等. 不同雨强对裸露坡地水土流失的影响研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2011, 6(4): 24-28.
- [26] 陈强, 史冬梅, 陈正发, 等. 重庆市黄壤坡耕地降雨侵蚀的产沙特征研究[J]. *现代农业科技*, 2012(8): 266-267, 282.
- [27] Mamedov A I, Levy G J, Shainberg I, et al. Wettable rate, sodicity, and soil texture effects on infiltration rate and runoff[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 39(6): 1293-1305.
- [28] 倪九派, 魏朝富, 高明, 等. 三峡库区坡耕地土壤养分流失的实验研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 38-42.
- [29] 黄丽, 丁树文, 董舟, 等. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 12(1): 9-14, 22.
- [30] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 四川紫色土区小流域土壤养分流失初步研究[J]. *土壤通报*, 2002, 33(6): 441-444.
- [31] 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.
- [32] 张燕, 张洪, 彭补拙, 等. 不同土地利用方式下农地土壤侵蚀与养分流失[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(1): 23-26, 31.
- [33] 宋晓强, 张长印, 刘洁. 开发建设项目水土流失成因和特点分析[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(5): 108-113.
- [34] 杨春霞, 姚文艺, 肖培青, 等. 植被覆盖结构对坡面产流产沙的影响及调控机制分析[J]. *水利学报*, 2019, 50(9): 1078-1085.
- [35] 张晓艳, 李琴书. 不同土地利用方式对土壤侵蚀及养分流失的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 12-17.
- [36] 黄河仙, 谢小立, 王凯荣, 等. 不同覆被下红壤坡地地表径流及其养分流失特征[J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1645-1649.
- [37] 康玲玲, 朱小勇, 王云璋, 等. 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. *土壤学报*, 1999, 36(4): 536-543.