

# 不同土地利用方式对土壤侵蚀及养分流失的影响

张晓艳<sup>1</sup>, 李琴书<sup>2</sup>

(1. 云南经济管理学院, 昆明 650106; 2. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 昆明 650093)

**摘要:**研究川中丘陵区次降雨过程中不同土地利用方式对土壤侵蚀及养分流失的影响。结果表明:(1) 不同土地利用方式下,地表径流量的变化均随着降雨时间的增加呈对数变化趋势,在同一降雨时间内,地表径流量均表现为农田>果园>草地>灌丛>林地。(2) 农田泥沙流失量随降雨时间的增加幅度较大,且在降雨后期出现陡增陡降的变化特征,其他土地利用方式下泥沙流失量的增加幅度较小;不同土地利用下泥沙流失量大小顺序为:农田>果园>草地>灌丛>林地。(3) 农田和果园地表径流量和壤中流总量显著高于灌丛和林地( $p<0.05$ ),地表径流量和壤中流均表现为:农田>果园>草地>灌丛>林地。(4) 不同土地利用方式下泥沙积累量均随降雨时间的延续而呈指数变化趋势。(5) 不同土地利用方式下水相氮磷流失量、泥沙氮磷流失量和氮磷流失总量均表现为:农田>果园>草地>灌丛>林地;不同土地利用方式下降雨径流过程中,氮素的流失是以径流水相为主,而磷的流失是以侵蚀泥沙相为主。(6) 不同土地利用方式降雨前期土壤全氮和全磷含量大小均表现为农田>果园>草地>灌丛>林地,泥沙氮磷含量比雨前土壤表层氮磷含量有所增加,说明侵蚀泥沙对氮、磷具有富集作用,并且不同土地利用方式下侵蚀泥沙富集磷素能力高于富集氮素能力,综合比较可知,农田和果园侵蚀泥沙富集养分的能力最高,而灌丛和林地是减少水土流失的土地利用方式。

**关键词:**土地利用方式; 土壤侵蚀; 养分流失

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2018)05-0012-06

## Effects of Land Use Types on Soil Erosion and Soil Nutrient Losses in Purple Soil

ZHANG Xiaoyan<sup>1</sup>, LI Qinshu<sup>2</sup>

(1. Yunnan College of Business Management, Kunming 650106, China; 2. Faculty of Environmental Sciences and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Characteristics of soil nutrient losses under different land use types in purple soil during course of rainfall were studied. The results indicated that: (1) the surface runoff under different land use types had a logarithmic change tendency with the duration of rainfall, which followed the order: farmland>orchard>grassland>shrub land>woodland; (2) the increasing range of soil erosion of grassland was larger, and farmland, woodland, orchard was lower, which decreased in the order: farmland>orchard>grassland>shrubland>woodland; (3) the surface runoff and interflow of orchard and farmland were significant higher than those in the woodland and shrub land ( $p<0.05$ ), which decreased in the order: farmland>orchard>grassland>shrubland>woodland; (4) the sediment accumulation under different land use types had a exponential function change tendency with the increase of rainfall; (5) the nitrogen and phosphorus losses along with runoff, nitrogen and phosphorus losses along with sediment and the total losses of nitrogen and phosphorus decreased in the order: farmland>orchard>grassland>shrubland>woodland; (6) the total contents of nitrogen and phosphorus under different land use types decreased in the order: farmland>orchard>grassland>shrubland>woodland before rainfall; contents of nitrogen and phosphorus in the sediment was higher, indicating that erosion and sediment had the enrichment effect of nitrogen and phosphorus, and the nitrogen enrichment was higher than phosphorus enrichment, the nutrient enrichment is the highest in the grassland.

**Keywords:** land use type; soil erosion; soil nutrients loss

水土流失是地表物质在降雨、径流、风、冻融等外营力驱动下发生位移与再分配的一种自然过程,主要包括侵蚀、剥离、搬运、沉积等环节<sup>[1-2]</sup>。土壤坡面水土流失是坡地表层土壤与降雨、径流相互分散、剥离和搬运的复杂的物理化学过程,也是大量营养元素流失的过程,受降雨特性、产流排水率、径流泥沙浓度等因素的影响<sup>[3-5]</sup>。在 20 世纪初期,国内外对于土壤侵蚀的研究多限于侵蚀过程中的产流产沙动态变化和机理分析,而忽略了由此带来的养分流失问题。在降雨条件下,雨水在土壤剖面以入渗和径流 2 种形式进行运移,当雨水入渗量超过土壤最大蓄水量时,径流产生,土壤表层易受降雨冲刷侵蚀,径流随后发展为泥沙流失,引起土壤养分流失,恶化生态环境<sup>[6-8]</sup>;另一方面导致土壤肥力下降,土地生产力降低,破坏土地资源,尤其是在人为活动频繁,且不尽合理的强烈干扰下,水土流失过程进一步加剧,从而引发了各种各样的资源与环境问题<sup>[9-10]</sup>。因此,防治坡地水土流失,减少养分损失,保护生态环境成为当前中外学者共同关注的热点之一。

川中丘陵区是中国典型的农业区,人地矛盾尤为突出,零散坡耕地较多,加之不合理的耕作管理,造成严重的水土流失,在降雨侵蚀过程中不仅形成地表径流,同时也产生大量的壤中流,造成坡耕地大量的磷素随之流失<sup>[11-12]</sup>。因此,深入研究川中丘陵区不同土

地利用方式下水土流失及磷素流失状况,可为该区寻求合理土地利用方式、养分流失预测评价以及防治提供理论依据。本研究通过降雨模拟试验,研究不同土地利用方式下的地表径流产流产沙及其磷素流失动态过程,将有助于明确该区水土流失及特征,为协调区域土地管理和改善生态环境提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

供试样品采自川中丘陵区紫色坡耕地不同土地利用类型的土壤(农田、果园、草地、灌丛、林地),2016 年 6 月,取 0—20 cm 的表层土壤,带回室内风干,剔除石块、植物根茎以及杂草,过 2 mm 粗筛备用,试供土壤理化性质及肥力特征如表 1 所示。基于野外实地调查,本研究将试验小区设计为 1.5 m×1.5 m 的 15 个微小区(每种土地利用方式重复 3 次),控制与原位土体一样的容重,随机每个小区下垫面用混泥土固化防渗形成相对不透水层(保持与土面相同坡度),使渗入土体中的水分到达此相对不透水层时,可通过挡板上直径为 2 cm 的小孔流入集水槽,用于收集壤中流。相对不透水层上铺 10 cm 厚石英砂,上面覆土 60 cm。每个小区坡面下部用水泥砌成 V 形集水槽,集水槽通过 PVC 管连接到径流收集桶,每种土地利用方式重复 3 次。

表 1 土壤理化性质及肥力特征

项目	pH 值	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/ %	有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
林地	7.01±0.23bc	1.43±0.06a	42.10±0.58c	13.25±1.23b	1.13±0.15ab	1.05±0.20a	28.45±3.02b	75.02±6.54b
草地	7.16±0.15b	1.25±0.13ab	43.56±0.39c	15.32±1.56a	1.23±0.23a	1.03±0.16a	32.65±3.65a	85.36±5.23a
灌丛	6.23±0.16d	1.19±0.15b	45.98±0.61b	13.02±1.14b	1.08±0.16b	1.12±0.17a	25.69±2.54c	62.31±5.89c
果园	6.89±0.19c	1.03±0.18c	46.02±0.54b	10.78±1.20c	0.87±0.18c	1.08±0.15a	24.16±2.15c	57.43±7.13d
农田	8.06±0.18a	0.98±0.08d	48.26±0.78a	14.03±1.45b	1.20±0.19a	0.98±0.11a	31.04±2.69a	82.14±5.02a
Mean	7.07	0.94	45.19	13.28	1.10	1.05	28.40	72.45
<i>p</i>	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	>0.05	<0.05	<0.05
<i>F</i>	163.98	89.52	145.78	123.65	187.46	72.20	157.84	163.59

1.2 试验设计

1.2.1 试验装置 目前国内多数设备是依据黄土高原或华北地区的气象条件设计的,而不同的气象条件下降雨的各种参数是不同的。本文在分析其年内分布规律和雨强范围基础上,设计适合该地区的降雨设备。2016 年 5—9 月,设计本试验降雨强度为 80 mm/h,降雨历时为 60 min。模拟降雨装置采用西安清远公司的 QYJY-502 型便携式人工模拟降雨器,主要由降雨喷头、供水管路、压力表、回水阀、供水水泵、不锈钢支架、开关阀等部分组成。降雨高度为 4 m,雨强连续变化范围为 10~150 mm/h。装置喷头系统为美国 V-80100,由喷头

体、出水孔板和碎流挡板等部件组成的变孔式喷头。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,雨滴直径和雨滴分布与天然降雨相似,降雨均匀度大于 80%。土槽由 PVC 板组成,尺寸 1 400 mm×600 mm×400 mm,土槽径流溢流孔( $\varphi=5$  mm)按棋盘式布局,土槽底部设有渗流溢流孔,土槽通过合页与降雨器支架焊接,后端与降雨器支架后端的手动葫芦相连,可手动调节坡度,调节范围 0°~15°,槽的一侧设置延伸槽,高度 5 cm,并开设孔径 1 cm 的平行管孔,用于方便收集表面径流。

1.2.2 降雨过程与分析测定 模拟降雨时选择天晴、无风日,不同土壤依次开展 3 场平行降雨试验。用实验室自来水作雨水,降雨前取样分析本底作为径流水样对照。每次降雨结束,静置一段时间,使土槽内部土壤水分的再分配达到应力均匀,以土壤表面不出现径流为限。前期降雨 24 h 后进行降雨强度为 60 mm/h 的模拟降雨,降雨直至坡面即将发生产流为止,然后用塑料布覆盖并静置,使水分自由运动下渗以接近自然状态下土壤水分分布状况,同时又能保证各场次降雨的前期土壤含水率基本一致。从试验土槽产流时开始记时,每场试验前对降雨强度进行两次率定,并且两次的误差不超过 5%,以确保降雨的强度和均匀度达到试验要求。降雨开始计时,记录降雨开始时间和径流产生时间,同时观察坡面侵蚀过程,每场次降雨时间 60 min(不含径流产生前时间);产生径流后,每 5 min 采集 1 次径流水样,取样时间为 2 min,分别测量各时段径流水体积,同时收集泥沙,所有泥沙样品静置 48 h,倾倒上层清水,经过自然风干、称重,测定泥沙中的总氮、总磷含量,以雨前土壤氮磷含量作为泥沙对照,然后置于烘箱中(105℃)烘至恒重,称量得出径流泥沙含量。降雨结束后,取土壤表层土测定氮磷含量。将收集的地表径流水样静置后分为两部分:一部分用于测定总氮(TN)、总磷(TP);另一部分水样经 0.45 μm 滤膜过滤后用于测定溶解态氮(DN)、溶解态磷(DP)。

### 1.3 样品测定及数据分析

TN、DN 测定采用 GB11894—89 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,TP、DP 采用 GB11893—89 钼酸铵分光光度法,径流水相悬浮颗粒态氮(PN)和悬浮颗粒态磷(PP)利用差减法计算得出。土壤和泥沙中全氮的测定采用半微量凯氏法,全磷测定采用碳酸钠熔融法<sup>[11-12]</sup>。

统计分析:利用 Excel 2003 和 SPSS 18.00 软件对数据进行分析,采用 Origin 7.5 作图,单因素方差进行分析(One-way ANOVA),显著性分析采用 LSD 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用方式对地表径流的影响

地表径流携带养分是水土流失的主要途径,因此在降雨过程中,径流的变化必然导致了径流中养分的变化特征。由图 1 可知,5 种不同土地利用方式下,地表径流量的变化均随着降雨的时间的增加呈对数变化趋势,其相关方程分别为:

$$y_{\text{农田}} = 1.2225 \ln x + 1.0112, R^2 = 0.835, p < 0.01$$

$$y_{\text{草地}} = 1.1218 \ln x - 0.9705, R^2 = 0.7994, p < 0.01$$

$$y_{\text{农田}} = 1.1604 \ln x - 1.0869, R^2 = 0.7826, p < 0.01$$

$$y_{\text{林地}} = 1.0839 \ln x - 1.0107, R^2 = 0.7263, p < 0.01$$

$$y_{\text{果园}} = 1.0873 \ln x - 1.1008, R^2 = 0.7825, p < 0.01$$

式中:  $y$  表示地表径流量;  $x$  表示降雨时间。由此可知,降雨开始后坡面产流量与降雨时间呈极显著正相关关系( $p < 0.01$ ),且 5 种土地利用方式的径流量均在降雨产流初期增加幅度较大,后期缓慢增加逐渐趋于稳定;由图还可知,在同一降雨时间内,地表径流量均表现为:农田>果园>草地>灌丛>林地。

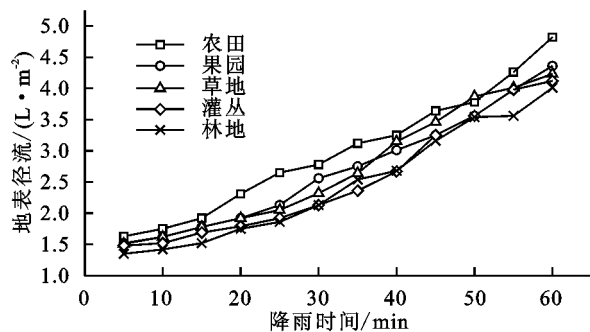


图 1 不同土地利用方式对地表径流的影响

### 2.2 不同土地利用方式对侵蚀产沙的影响

由图 2A 可知,不同土地利用方式下侵蚀泥沙量随降雨历时的增加呈现出非线性的变化特征。农田泥沙流失量随时间的增加幅度较大,且在降雨后期出现陡增陡降的变化特征,在降雨后 35~45 min 达到峰值,其他 4 种土地利用方式下泥沙流失量的增加幅度较小,在降雨后 35~45 min 达到峰值,当泥沙流失量达到峰值后随产流时间的持续呈现稳定增加趋势,在降雨即将结束时泥沙流失量又有所减少,由此可见,其他 5 种土地利用方式对泥沙的调控作用要小于农田,土地利用方式对产沙峰值出现的时间调控作用较大。不同土地利用下的降雨侵蚀产沙过程分异不明显,由于降雨强度大,对地表瞬间产生的冲击较大,开始时泥沙产生量很大,随着降雨历时的增加,土壤表层形成了一层水膜,起到缓冲作用,泥沙产生量就逐渐减少,并趋于平稳,泥沙流失量大小顺序为:农田>果园>草地>灌丛>林地,泥沙流失量的大小反映了不同土地利用方式对水土流失的作用程度,试验结果表明,农田和果园的水土流失程度最大,其次是草地和灌丛,最后是林地。由图 2B 可知,径流中含沙量的变化一定程度上反映了径流的携沙能力,不同土地利用方式下径流含沙量随径流过程逐渐降低,说明不同土地利用方式下径流对坡面的冲刷力度是极强的。

### 2.3 不同土地利用方式对地表径流及壤中流的影响

由图 3 可知,农田和草地径流量显著高于果园( $p < 0.05$ ),果园显著高于灌丛和草地( $p < 0.05$ ),灌丛和草地径流量差异不显著( $p > 0.05$ ),主要是由于农田和

草地地表覆盖度相对较小,坡面输水量较大,加之在水流方向微地形起伏较小,积水顺水能力较强,雨水到达坡面来不及下渗就已经顺坡面流下,同时对坡面形成高强度冲刷,这也是造成农田和草地壤中流较小的主要原因。

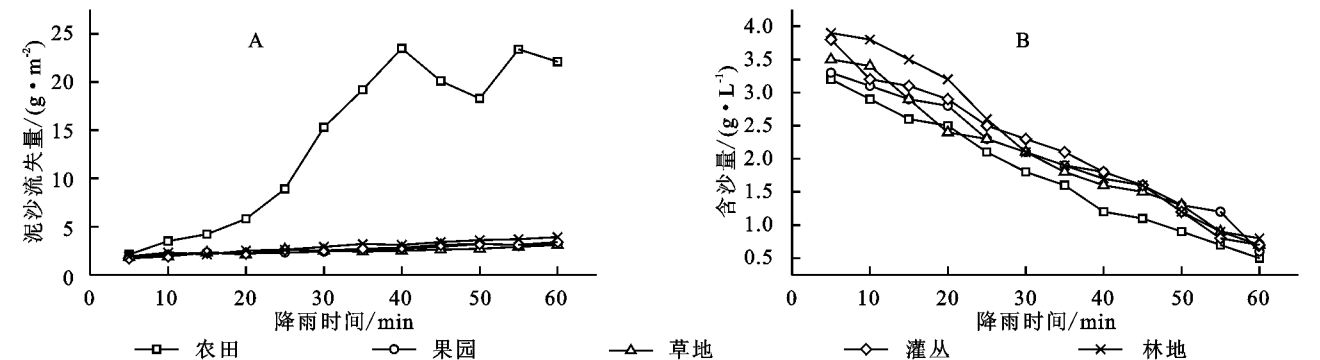


图 2 不同土地利用方式对侵蚀产沙的影响

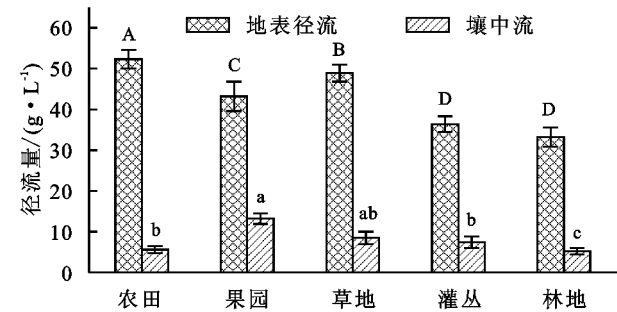


图 3 不同土地利用方式对地表径流及壤中流的影响

2.4 不同土地利用方式对泥沙累积量的影响

从图 4 不同土地利用方式下泥沙累积流失量变化过程分析得出,泥沙的累积量在各个措施下均随降雨时间的延续而呈线性增加,其相关方程分别为:

$$y_{\text{草地}} = 2.189e^{0.0758x}, R^2 = 0.952, p < 0.01$$
$$y_{\text{农田}} = 2.056e^{0.0624x}, R^2 = 0.941, p < 0.01$$
$$y_{\text{林地}} = 1.823e^{0.0823x}, R^2 = 0.975, p < 0.01$$
$$y_{\text{果园}} = 1.752e^{0.0836x}, R^2 = 0.907, p < 0.01$$
$$y_{\text{灌丛}} = 1.589e^{0.0755x}, R^2 = 0.923, p < 0.01$$

式中:  $y$  表示泥沙累积量;  $x$  表示降雨时间,整个径流过程中果园和农田的泥沙流失最严重,且随时间延续大幅度的增加,灌丛和林地的流失量均较小,灌丛和林地的拦截作用下土壤侵蚀量最小,控蚀效果最好,这与前人的研究结果一致。所以,灌丛和林地是减少水土流失的土地利用方式。

2.5 不同土地利用方式对降雨径流中氮、磷流失特征的影响

2.5.1 径流水相中氮磷流失特征 在降雨条件下,不同土地利用下的土壤氮磷迁移量受土壤中各种因素共同作用的影响,根据公式<sup>[13]</sup>:

$$M = \sum_{i=1}^n c_i \times Q_i$$

式中:  $c_i$  为径流中氮磷浓度;  $Q_i$  为径流量,计算得到

因。从整个降雨过程中产生的径流总量来看,农田总径流量最大,果园和草地次之,从壤中流总量变化特征来看,果园与草地产生的壤中流差异不显著,农田、草地、灌丛产生的壤中流显著高于林地( $p < 0.05$ )。

随径流输出的氮磷总量见表 2。在降雨条件下,不同土地利用方式下水相氮磷流失量、泥沙氮磷流失量和氮磷流失总量均表现为:农田>果园>草地>灌丛>林地,这表明土壤表层氮素和磷素流失量的大小主要取决于地表土壤氮和磷的含量,径流水相中氮磷的流失量与土壤氮和磷含量具有一致性。

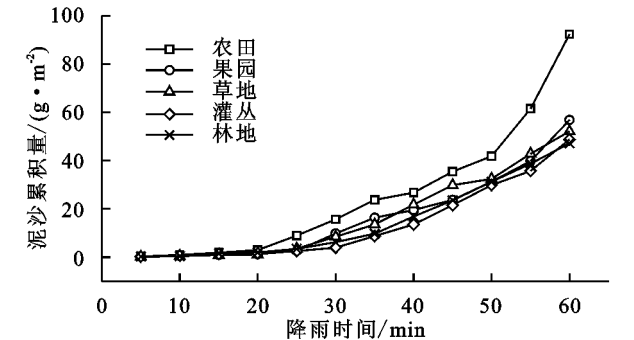


图 4 不同土地利用方式对泥沙累积量的影响

2.5.2 侵蚀泥沙中氮磷流失特征 侵蚀泥沙是指径流中粒径比较大的颗粒,径流水样静置一段时间后泥沙会沉淀下来。降雨径流产生过程中,有相当一部分氮磷是富集到泥沙中随径流流失的,对被侵蚀土壤的质量和水质有重要的影响,其在地表径流氮磷流失中的作用应予以重视。对泥沙中氮素和磷素的累积流失量进行统计,氮素和磷素流失总量大小均表现为农田>果园>草地>灌丛>林地,农田和果园差异不显著( $p > 0.05$ ),显著高于灌丛和林地( $p < 0.05$ ),灌丛和林地差异不显著( $p > 0.05$ );降雨前期农田和果园土壤全磷含量差异不显著( $p > 0.05$ ),显著高于其他土地利用方式( $p < 0.05$ ),灌丛和林地土壤全磷含量差异不显著( $p > 0.05$ )。经过计算可知,不同土地利用方式下的泥沙氮磷含量比雨前土壤表层氮磷含量有所增加,说明侵蚀泥沙对氮、磷等营养盐具有富集作用,可以用富集率来表示,即侵蚀泥沙中养分含量与被侵蚀土壤中养分

含量之比。不同土地流失的泥沙对氮素的富集率分别为 0.89;对磷素的富集率分别为农田 1.16,果园 1.15,为农田 1.23,果园 1.21,草地 1.13,灌丛 0.91,林地 草地 0.76,灌丛 0.53,林地 0.61(图 5)。

表 2 径流水相中总氮和总磷随径流过程的变化

项目	水相氮流失量/mg			水相磷流失量/mg		
	TN	DN	PN	TP	DP	PP
农田	12.23±2.03	4.56±0.56	8.56±0.89	2.98±0.36	0.46±0.05	1.86±0.26
果园	12.01±1.56	452±0.62	8.43±0.56	2.95±0.26	0.32±0.03	1.87±0.15
草地	11.78±2.14	4.01±0.49	7.14±0.67	2.31±0.25	0.31±0.04	1.23±0.19
灌丛	10.26±1.98	3.52±0.42	6.78±0.68	1.21±0.43	0.21±0.02	0.85±0.28
林地	10.15±2.05	3.56±0.51	6.23±0.72	1.23±0.41	0.23±0.04	0.73±0.13
Mean	11.29	93.53	7.43	2.14	0.31	1.31
p	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
F	169.23	154.78	158.91	203.14	187.45	156.88

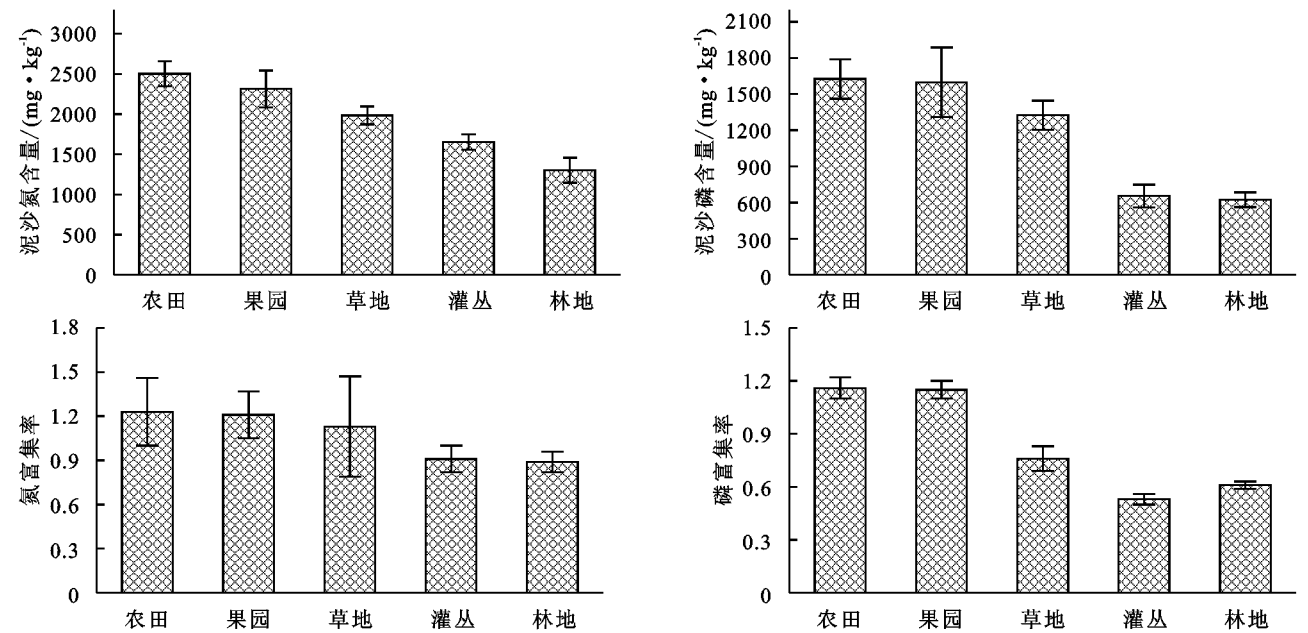


图 5 侵蚀泥沙中氮磷流失特征

3 讨论

土地利用方式是影响土壤侵蚀的重要因素之一,对土壤侵蚀的影响主要表现为,土地利用方式可以增加地表糙度,大量雨水汇集于坡面增加蓄水深、土壤孔隙率和地表产流阻力,农田和果园汇水能力较强,坡面流流速最大,易汇集雨水,从而造成较大的侵蚀量<sup>[14-15]</sup>。本试验条件模拟的是零散坡耕地,面积较小,无法将雨水均匀分散起到很好的控蚀效果,径流汇集垄沟时间较短,当径流在垄沟中汇集后,随着降雨的延续,积水界面延伸至断垄处,导致大量积水流下,最终导致汇集大量的径流<sup>[16-17]</sup>。但林地和灌丛具有明显的蓄水作用,所以其产流时间最晚,雨水在坡面停留时间较长,减少地表侵蚀量的同时也增加了壤中流流量,且其壤中流中磷素含量较高,同时,其总径流量较小。所以,从地表及地下全面分析来看,林地和灌丛在控制泥沙及泥沙中有效磷流失方面效果较好。

有研究指出,土磷素流失以泥沙携带为主,流失泥沙中的磷素远远大于径流中磷素,并且可以将泥沙中携带的磷素流失量看成坡面磷素流失量<sup>[18]</sup>。而本研究结果与此结论有一定的差异,可能是因为以往研究没有考虑壤中流的影响,且本研究得出,壤中流中磷素含量较大,不容忽视。泥沙的变化与泥沙中有效磷含量的变化趋势相反,在整个降雨过程中泥沙的流失量呈增加趋势,而有效磷含量虽然呈下降趋势,但下降幅度远没有泥沙增幅大,所以有效磷的总流失量趋势并没有随降雨时间的增加而降低,而与泥沙较一致,受泥沙影响较大<sup>[19]</sup>。综合径流泥沙来看,农田和果园磷素流失量最大,主要是由于磷素作为一种沉积性元素,由母质类型和成土条件决定,在土壤中的存在形式较稳定、不易流失,因此短期的模拟降雨很难造成磷素的变化<sup>[20-22]</sup>。本研究表明,径流损失主要是以地表径流为主,壤中流只占到 30%左右。磷素流失量也是以地表径流携带较多,壤中流最高也只达到总量的 40%,

但壤中流中磷素浓度较高。可见,降雨所形成的壤中流携带的磷素流失不容忽视。径流中磷素流失以可溶性磷流失为主,与前人研究结果一致<sup>[23-24]</sup>。主要是因为,紫色土以蓄满产流为主,土壤中大量的可溶性磷被蓄积径流充分浸提出来随径流流失。

## 4 结论

(1) 不同土地利用方式下,地表径流量的变化均随着降雨时间的增加呈对数变化趋势,在同一降雨时间内,地表径流量均表现为农田>果园>草地>灌丛>林地。农田泥沙流失量随降雨时间的增加幅度较大,且在降雨后期出现陡增陡降的变化特征,其他土地利用方式下泥沙流失量的增加幅度较小。

(2) 农田和果园地表径流量和壤中流总量显著高于灌丛和林地( $p<0.05$ ),不同土地利用方式下泥沙积累量均随降雨时间的延续而呈指数变化趋势,不同土地利用方式下水相氮磷流失量、泥沙氮磷流失量和氮磷流失总量均表现为:农田>果园>草地>灌丛>林地;不同土地利用方式下降雨径流过程中,氮素的流失是以径流水相为主,而磷的流失是以侵蚀泥沙相为主。

(3) 不同土地利用方式泥沙氮磷含量比雨前土壤表层氮磷含量有所增加,说明侵蚀泥沙对氮、磷具有富集作用,并且不同土地利用方式下侵蚀泥沙富集磷素能力高于富集氮素富集能力,综合比较可知,农田和果园侵蚀泥沙富集养分的能力最高,而灌丛和林地是减少水土流失的土地利用方式。然而,模拟降雨与土壤溶质迁移关系的研究只是初步结果,模拟降雨对坡面侵蚀的影响较为复杂,模拟降雨对坡面土壤溶质向径流释放机理影响及其动力学机制还有待深入研究。

### 参考文献:

[1] 傅伯杰,邱扬,王军,等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响[J]. 地理学报,2002,57(6):717-722.

[2] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(2):169-175.

[3] 郭新送,宋付朋,高杨,等. 模拟降雨下3种类型土壤坡面的泥沙流失特征及其养分富集效应[J]. 水土保持学报,2014,28(3):23-28.

[4] 顾儒馨,倪九派,刘月娇. 模拟降雨对工程建设区裸露坡地产流产沙及氮素流失的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(2):33-39.

[5] 苏付安,松同清,王文丽,等. 模拟降雨对亚热带阔叶林土壤坡面产流产沙及养分流失的影响[J]. 水土保持学

报,2016,30(4):25-32.

- [6] 杨艳生,史德明,孙志刚. 降雨,径流因子的初步研究. II:土壤坡面侵蚀量预报[J]. 水土保持通报,1985,6(3):51-55.
- [7] 张翔,高照良,杜捷,等. 工程堆积体坡面产流产沙特性的现场试验[J]. 水土保持学报,2016,30(4):19-24.
- [8] 程甜甜,张兴刚,李亦然,等. 鲁中南山丘区坡面产流产沙与降雨关系[J]. 水土保持学报,2017,31(1):12-16.
- [9] 朱子龙,周大迈,张爱军,等. 不同下垫面太行山片麻岩坡面水土及养分流失规律研究[J]. 水土保持学报,2014,28(6):61-65.
- [10] 程圣东,李占斌,李鹏,等. 不同草被格局坡面水土—养分流失动力过程试验研究[J]. 水土保持学报,2014,28(5):58-61.
- [11] 张腾飞,查轩,黄少燕. 天然降雨条件下3种土壤坡面的侵蚀过程及颗粒组成[J]. 中国水土保持科学,2014,12(6):30-35.
- [12] 张海涛,宫渊波,付万权,等. 次降雨对马尾松低效林改造初期坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(3):51-55.
- [13] 杨帅,尹忠,郑子成,等. 四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析[J]. 水土保持学报,2016,30(4):7-12.
- [14] 陈美淇,魏欣,张科利,等. 基于CSLE模型的贵州省水土流失规律分析[J]. 水土保持学报,2017,31(3):16-21.
- [15] 杜捷,高照良,王凯. 布设植物篱条件下工程堆积体坡面产流产沙过程研究[J]. 水土保持学报,2016,30(2):102-106.
- [16] 王静,王允青,郭熙盛,等. 不同农艺措施对巢湖沿岸坡耕地水土及径流氮输出的控制效果[J]. 水土保持学报,2016,30(4):38-43.
- [17] 夏振尧,梁永哲,张雪娇,等. 植被对含碎石土壤坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(3):92-97.
- [18] 马悦,郭年冬,张瑞芳,等. 片麻岩坡面花生不同生长期水土及养分流失规律[J]. 水土保持研究,2016,23(5):304-309.
- [19] 戴金梅,查轩,黄少燕,等. 不同植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(3):33-38.
- [20] 郭新送,宋付朋,高杨,等. 模拟降雨下2种尿素的坡地氮素流失特征[J]. 水土保持学报,2014,28(5):26-30.
- [21] 杨波,王全九. 退耕还林后榆林市土壤侵蚀和养分流失功效研究[J]. 水土保持学报,2016,30(4):57-63.
- [22] 王丽,王力,王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. 水土保持学报,2015,29(2):69-75.
- [23] 陈美淇,魏欣,张科利,等. 基于CSLE模型的贵州省水土流失规律分析[J]. 水土保持学报,2017,31(3):16-21.
- [24] 杜捷,高照良,王凯. 布设植物篱条件下工程堆积体坡面产流产沙过程研究[J]. 水土保持学报,2016,30(2):102-106.