

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.016.

邱业, 曲芝旭, 韩玉国, 等. 模拟降雨条件下肥料类型对坡面磷素流失的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 106-112.

QIU Ye, QU Zhixu, HAN Yuguo, et al. Effect of Fertilizer Types on Phosphorus Loss on Slope Under Simulated Rainfall [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 106-112.

# 模拟降雨条件下肥料类型对坡面磷素流失的影响

邱业<sup>1</sup>, 曲芝旭<sup>1</sup>, 韩玉国<sup>1,2</sup>, 彭玉麟<sup>1</sup>, 吴墩睿<sup>3</sup>

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

2.北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083; 3.北京市水务执法总队, 北京 102400)

**摘要:** [目的]明确有机肥和无机肥的磷素流失机理, 探讨施用有机肥能否减少磷素流失, 为防控面源污染提供科学依据。[方法]以鸡粪作为有机肥, 五氧化二磷作为无机肥, 进行人工模拟降雨试验, 分析了不同肥料类型下坡面磷素流失的规律。[结果]90 mm/h降雨强度处理下坡面产流率和产沙率较60 mm/h降雨强度处理分别高47.40%, 64.48%, 降雨强度对坡面产流率和产沙率影响显著( $p < 0.05$ ), 肥料类型对产流产沙率无显著影响( $p > 0.05$ )。随着降雨强度增大, 径流中的正磷酸盐及可溶性总磷浓度均呈现下降趋势, 无机肥处理下分别下降30.43%和26.35%, 有机肥处理下为13.56%和33.08%; 随着降雨强度增大, 无机肥处理下泥沙有效磷浓度、颗粒态总磷浓度分别降低27.78%, 19.47%, 而在有机肥处理下则分别增加128.11%, 36.28%。降雨强度增加会使坡面磷素流失量增加, 溶解态总磷、径流正磷酸盐、颗粒态总磷、泥沙有效磷流失量平均增加11.81%, 27.82%, 68.45%, 144.64%。施用有机肥可以减少坡面的磷素流失, 相比施用无机肥, 溶解态总磷、径流正磷酸盐、颗粒态总磷、泥沙有效磷平均减少了68.11%, 85.51%, 54.47%, 80.69%。[结论]使用有机肥替代无机肥能够减少磷素流失, 建议有施用条件的地区选择有机肥, 且保证一定施用深度。

**关键词:** 人工模拟降雨; 肥料类型; 磷素流失量; 磷素流失浓度

**中图分类号:** S157.4; X501

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)05-0106-07

## Effect of Fertilizer Types on Phosphorus Loss on Slope Under Simulated Rainfall

QIU Ye<sup>1</sup>, QU Zhixu<sup>1</sup>, HAN Yuguo<sup>1,2</sup>, PENG Yulin<sup>1</sup>, WU Dunrui<sup>3</sup>

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University,

Beijing 100083, China; 2.Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation,

Beijing 100083, China; 3.Beijing General Brigade of Water Affairs Law Enforcement, Beijing 102400, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the reasons for the differences in phosphorus loss between organic fertilizer and inorganic fertilizer and expound whether inorganic fertilizer could be replaced with organic fertilizer to reduce phosphorus loss, and then to prevent and control pollution from non-point sources. [Methods] Simulated rainfall experiment was carried out to compare the differences in the characteristics of phosphorus losses on the slopes with chicken manure as organic fertilizer and phosphorus pentoxide as inorganic fertilizer. [Results] Rainfall intensity had significant effects on the runoff yield and sediment yield on the slope ( $p < 0.05$ ). The runoff yield and sediment yield under 90 mm/h rainfall intensity treatment were 47.40% and 64.48% higher than those under 60 mm/h rainfall intensity treatment, respectively. Fertilizer type had no significant effect on runoff yield ( $p > 0.05$ ). With the increase of rainfall intensity, soluble total phosphorus concentration in runoff and orthophosphate concentration in runoff decreased by 29.72% and 22.00% on average, respectively. The increase of rainfall intensity also reduced the total particulate phos-

收稿日期: 2022-06-22

修回日期: 2022-07-24

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07102-001, 2017ZX07108-002)

第一作者: 邱业(1998—), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与养分流失研究。E-mail: qiuYe19980518@163.com

通信作者: 韩玉国(1979—), 男, 内蒙古通辽人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与养分流失研究。E-mail: yghan@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

phorus concentration and available sediment phosphorus concentration on the slope with inorganic fertilizer application by 19.47% and 27.78% on average. As the rainfall intensity increased, the concentrations of particulate total phosphorus and available phosphorus in sediment on the slope with organic fertilizer application increased by 36.28% and 128.11% on average. The increase of rainfall intensity also led to the loss of dissolved total phosphorus, runoff phosphate, particulate total phosphorus and sediment available phosphorus, which increased by 11.81%, 27.82%, 68.45% and 144.64% on average, respectively. The phosphorus concentration in the treatment of inorganic fertilizer was several times higher than that in organic fertilizer treatment, and the dissolved total phosphorus, runoff orthophosphate, particulate total phosphorus and sediment available phosphorus were 2.22 times, 6.83 times, 2.73 times and 8.20 times, respectively. Compared with inorganic fertilizer treatment, organic fertilizer treatment could reduce slope phosphorus loss, where dissolved total phosphorus, runoff orthophosphate, particulate total phosphorus, sediment available phosphorus loss decreased by 68.11%, 85.51%, 54.47%, 80.69% on average, respectively. [Conclusion] Replacing inorganic fertilizer with organic fertilizer could reduce phosphorus loss concentration and phosphorus loss on slope. In agricultural production, organic fertilizer should be considered first, and a certain depth of fertilization should be necessary to avoid surface application.

**Keywords:** simulated rainfall; fertilizer type; phosphorus loss; phosphorus loss concentration

磷是植物生长必需的大量元素,我国土壤普遍存在缺磷现象,农业中常选择大量施用无机磷肥来提高土壤磷含量,以增加农作物产量<sup>[1-2]</sup>。无机磷肥进入土壤后,易与土壤中的离子结合,或被等氧化物、微生物固定,形成无法被吸收利用的无效态磷<sup>[3]</sup>,在土壤中留存大量磷素,降雨时进入水体会造成面源污染,引发环境问题<sup>[4]</sup>。由于农业生产中长时间施用无机磷肥,我国当季磷肥利用率仅有 13.0%~16.9%左右,而发达国家能达到 40%以上<sup>[5-6]</sup>。为此,部分学者提出能否使用有机肥来替代传统磷肥,以提高利用率,控制面源污染。

磷素流失浓度方面,Ohno 和 Crannell 等的研究表明,有机肥的施用增加了土壤中的有机酸含量,进而降低土壤吸附磷的能力,提高磷在土壤中的迁移能力和地表径流中的磷素浓度<sup>[7]</sup>;韩笑等在昆明菜地开展的研究结果显示,施用有机肥会使径流总磷浓度比化肥处理提高 12.3%~49.1%<sup>[8]</sup>;而 Khan 等认为施用有机肥可以提高磷肥利用率<sup>[9]</sup>;孔文杰也通过油稻轮作田间试验表明,有机肥较无机肥能显著减少地表径流全磷浓度<sup>[10]</sup>。在磷素流失量方面,袁浩凌等通过田间试验得出有机肥较无机肥会增加径流总磷流失量的 26.33%<sup>[11]</sup>;马凡凡等研究结果表明有机肥替代无机肥会显著增加稻季农田径流全磷流失量<sup>[12]</sup>;

而原政等在洱海流域的试验研究表明,施用有机肥可以减少径流总磷流失量的 13.63%~27.63%<sup>[13]</sup>;裘培栋等在紫色土坡耕地径流小区的试验结果表明,有机肥较无机肥可以显著减少径流中磷素流失量,达 20.03%~58.01%<sup>[14]</sup>。

目前对不同肥料类型下的坡面磷素流失特征存在初步认识,但并没有统一结论。因此,本研究以鸡粪作为有机肥,五氧化二磷作为无机肥,进行人工模拟降雨试验,分析不同肥料类型下坡面磷素流失的规律,明确有机肥和无机肥的磷素流失机理,探讨施用有机肥能否减少磷素流失,为农业生产合理施用磷肥和防治面源污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采集于北京市典型坡耕地的无种植区域,采集深度为 0—35 cm,土壤类型为碳褐土,母质类型为黄土,试验开始前先除去土壤中的碎石块、植物根茬等杂质,后过 4 mm 孔筛网,风干、混合均匀,测定理化性质,见表 1;商用鸡粪有机肥出厂有机质含量为 36.5%,含磷量为 0.93%;化学磷肥选择五氧化二磷,含磷量为 44%。

表 1 供试土壤理化性质

容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	pH	土壤粒径组成/%			有机质含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
		黏粒 (<0.001 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	砂粒 (>0.05 mm)			
1.26	8.25	9.83	53.50	36.74	16.70	0.32	18.55

## 1.2 试验设计与方法

2019年8月于鹭峰降雨大厅开展人工模拟降雨试验。试验用土槽规格为3 m×0.5 m×0.5 m(长×宽×高),底部打孔以渗水,试验槽底端设置“V”形集流口以收集产流产沙。模拟天然裸坡进行填土;依据自然侵蚀和加速侵蚀的临界值,土槽坡度设置为5°,并根据北京地区侵蚀性强降雨特征<sup>[15]</sup>,选择60 mm/h,90 mm/h作为降雨强度;走访调查,获得当地无机磷肥施用量,为272.8 kg/hm<sup>2</sup>,折算出有机肥施用量(磷折纯量相同)。不同雨强、肥料处理下每场降雨均设置3个相同土槽作为重复。

土槽底部铺设4层纱布,纱布中间覆上5 cm沙。槽内土层厚度为35 cm,通过计算称量使得填槽密度为1.26 g/cm<sup>3</sup>,在装填每一层土壤之前,抓毛下层土壤表面,在表层5 cm土壤混施肥料后,耙平土槽坡面并沉降4 h。试验开始前4 h,对坡面进行雾状喷水处理,以保证上层的土壤达到饱和含水量,喷水过程中也要防止结皮。模拟降雨前用烘干法测定坡面3处土壤的含水量;并在开始降雨前对降雨强度进行率定,保证雨区均匀度达到90%,实测雨强与目标强度的差值小于5%时正式开始降雨。降雨试验场次安排见表2。

表2 降雨试验安排

处理	初始土壤	设定降雨强度/	实际降雨强度/	降雨	降雨	肥料施用量/g	
	含水量/%	(mm·h <sup>-1</sup> )	(mm·h <sup>-1</sup> )			鸡粪	五氧化二磷
60 有机肥	30.41	60	61	90	92	4400	—
90 有机肥	29.87	90	89	90	92	4400	—
60 无机肥	30.03	60	60	90	91	—	91
90 无机肥	31.72	90	93	90	95	—	91

记录降雨时间以及开始产流时间。由于产流初期坡面径流量、泥沙量变化波动较大,所以在产流开始的5 min内用塑料小桶分别在1,3,5 min收集3次径流样;在此之后,每隔10 min使用大桶收集径流样。降雨历时为90 min,降雨停止后收集尾样,并记录产流停止的时间。称量桶中水、沙混合样重量,过滤后得到澄清水样以及土样。水样放入4℃冷储存柜中保存,泥沙烘干后封袋避光保存,水样、土样均于24 h内测定。

## 1.3 样品测定

称重法换算出径流量与泥沙量。使用AMS Alliance FUTURA连续流动分析仪测定水样、泥沙的氮磷指标,水样经0.45 μm滤膜过滤后测定可溶性正磷酸盐,经过硫酸钾消解后测定可溶性总磷;颗粒态总磷和泥沙有效磷是过滤后土样分别经过HClO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>消解和0.5 mol/L的NaHCO<sub>3</sub>浸提后测定。

## 1.4 数据处理与分析

试验数据为3个土槽测定的均值,使用Excel 2019进行初步分析,使用SPSS 26进行显著性分析,并用Origin 2021进行绘图。

# 2 结果与分析

## 2.1 坡面产流产沙特征

坡面产流率随产流时间变化见图1。不同处理下产流率变化趋势相近,随着降雨进行产流率逐渐增加,一段时间后保持稳定。90 mm/h降雨强度下坡

面产流率较60 mm/h降雨强度平均高47.40%,降雨强度对坡面产流率影响显著( $p<0.05$ );肥料类型对产流率影响不显著( $p>0.05$ )。上述现象可能是由于本试验为室内模拟降雨试验,土槽坡面为平整裸坡,无明显坑洼,故降雨初期无填洼现象,且降雨前通过喷水使得坡面土壤含水量接近饱和,前期降雨强度大于坡面土壤入渗率,坡面含水率迅速上升,使得径流形成时间很短。产流率取决于降雨强度和入渗率,表层混施时,肥料类型并不能影响入渗率,故本试验中降雨强度成为响坡面产流率的唯一因素<sup>[16]</sup>。

坡面产沙率随产流时间变化见图1。不同处理下的产沙率有着相近的变化趋势,降雨初期产沙率增加,后逐渐下降并趋于稳定。90 mm/h降雨强度下坡面产沙率较60 mm/h降雨强度平均高64.48%,降雨强度对坡面产沙率影响显著( $p<0.05$ );肥料类型对产沙率影响不显著( $p>0.05$ )。可能是由于降雨初期,坡面产流量低,侵蚀能力弱,随着降雨的进行,径流作用增强,加之降雨前期,坡面松散的土壤在雨滴击溅和径流冲刷作用下被快速搬运,而随着径流趋于稳定,可搬运物质减少,使得产沙率逐渐降低并趋于稳定<sup>[17]</sup>。

## 2.2 坡面磷素流失浓度

不同处理下坡面径流可溶性总磷浓度和正磷酸盐浓度的变化趋势相似,见图2。均表现为初始浓度较低,后迅速升高,接下来逐渐降低并趋于稳定。可能是由于刚开始径流携带磷素能力较弱,随着降雨的

进行逐渐增大,表层土壤中的磷素迅速流失,使得径流磷素浓度开始时迅速升高,后缓慢降低并趋于稳定。

过程中出现小幅度上下波动可能是由于表层土壤结皮的周期性<sup>[18-20]</sup>。

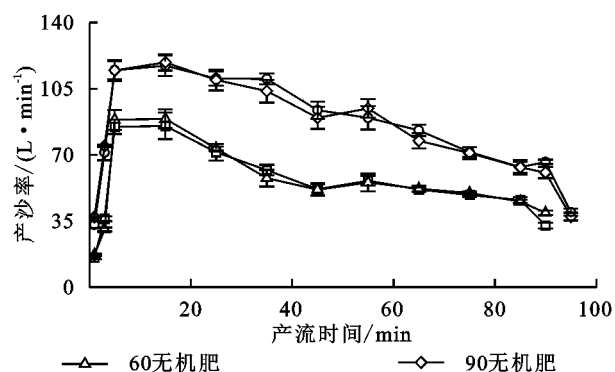
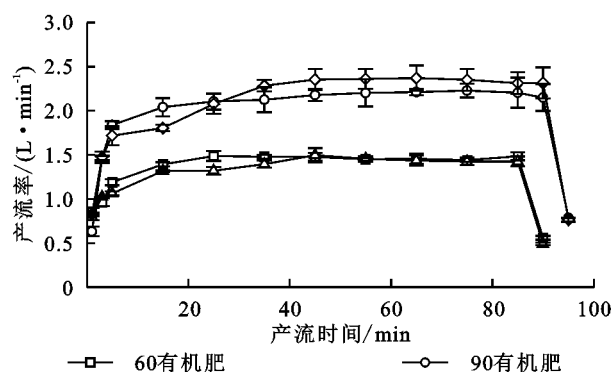


图1 坡面产流产沙特征

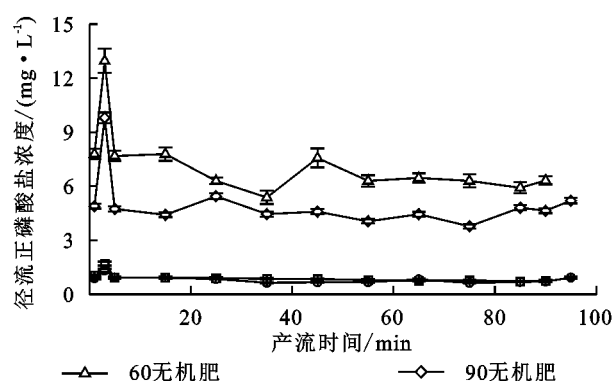
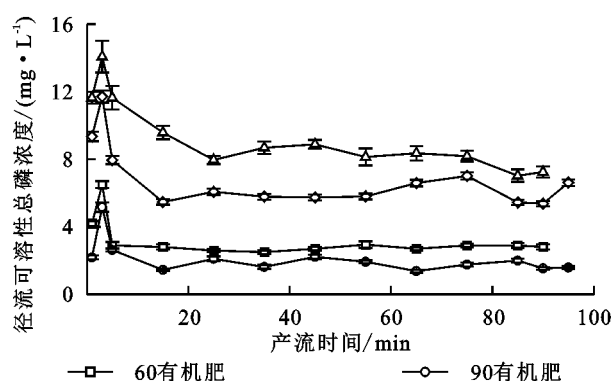


图2 坡面溶解态磷素流失特征

由图2可知,降雨强度的增大导致径流可溶性总磷浓度下降,施用有机肥的坡面平均下降幅度为33.08%,施用无机肥的坡面平均下降幅度为26.35%;降雨强度增大也会使径流正磷酸盐浓度下降,施用有机肥的坡面平均下降幅度为13.56%,施用无机肥的坡面平均下降幅度为30.43%。这可能是在肥料类型和施用量相同时,不同处理下坡面土壤所能提供的磷素量相同,在发生降雨时,径流磷素浓度取决于径流作用以及携带磷素能力。显然大雨强下坡面径流有着更大的作用力和携带磷素能力,同时大雨强也带来了更多径流量,在坡面土壤磷库相同的情况下,径流量增大使得稀释作用更为明显,即浓度偏低<sup>[21]</sup>。

施用无机肥的坡面径流可溶性总磷浓度是施用有机肥的217%~227%;施用无机肥的坡面径流正磷酸盐浓度是施用有机肥处理的481%~885%。这可能是因为五氧化二磷溶于水生成磷酸,使得土壤溶液中磷含量上升,降雨时,土壤溶液与径流间发生物质交换,使得径流中磷含量上升,而鸡粪中的可溶性磷含量较低,进入土壤后不会使土壤溶液中磷含量大幅度上升,所以其径流磷素浓度相对较低<sup>[22]</sup>。

不同处理下坡面颗粒态总磷浓度和泥沙有效磷浓度存在差异,但变化趋势相似,见图3。均表现为产流初

期相对较高,随着产流的进行逐渐降低并趋于稳定。原因可能是在产流初期,径流刚形成时,坡面土壤较为松散,而细颗粒土壤比表面积大,能够富集更多磷素,因此产流初期浓度较高;而随着降雨的进行,加上雨滴击溅和径流冲刷,径流搬运的粗颗粒土壤增加,浓度逐渐降低;直至径流稳定时,浓度也逐渐趋于稳定<sup>[23]</sup>。

由图3可知,施用有机肥的坡面下,降雨强度增大使坡面颗粒态总磷浓度增加14.35%~58.21%,泥沙有效磷浓度增加47.92%~208.29%;施用无机肥的坡面,降雨强度增大使坡面颗粒态总磷浓度降低6.65%~32.29%,泥沙有效磷浓度降低16.38%~39.18%。出现上述现象,一方面可能是降雨强度较大时,击溅作用明显,鸡粪很快被浸润、分散,随着径流流出断面出口,所以浓度较高;另一方面可能是降雨发生时,五氧化二磷迅速溶解,土壤溶液中磷酸盐含量增大,更多地与土壤颗粒结合,使得流出断面出口的颗粒态浓度取决于径流磷浓度,从上述研究结果来看,60 mm/h雨强下,径流磷浓度更高,故其颗粒态浓度也相对较高。

施用无机肥的坡面颗粒态总磷浓度为施用有机肥的147%~399%;施用无机肥的坡面泥沙有效磷浓度也高于施用有机肥的,是其263%~1376%。这



可能是由于磷易被土壤吸附,土壤溶液中磷浓度越高,颗粒态磷浓度也就越高。在降雨发生时,施用无

机肥的坡面能够释放更多的磷,使得其土壤溶液和径流中的磷浓度较高,故其颗粒态磷浓度也相对较高。

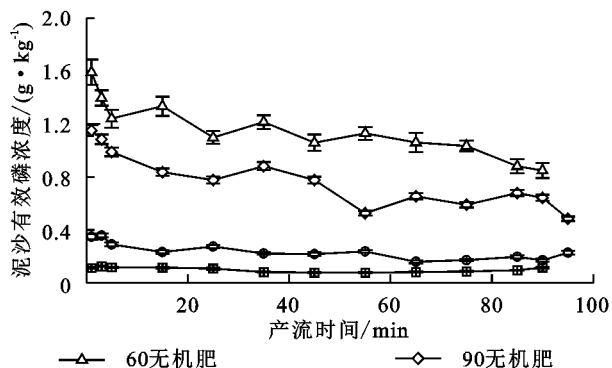
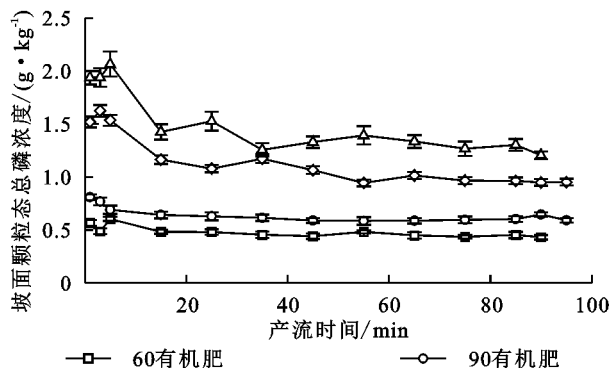


图3 坡面颗粒态磷素流失特征

### 2.3 坡面磷素流失量

表3为各处理下的坡面磷素流失量。大雨导致更多的磷素流失,溶解态总磷、径流正磷酸盐、颗粒态总磷、泥沙有效磷分别多流失了3.14%~20.48%,

16.11%~39.52%,23.07%~113.83%,4.45%~284.82%。施用有机有效减少了坡面磷素流失,上述4种形式的磷流失量分别减少了65.63%~70.58%,84.18%~86.84%,42.20%~66.73%,69.62%~91.75%。

表3 坡面磷素流失量

处理	溶解态 总磷/mg	径流正磷 酸盐/mg	颗粒态 总磷/mg	泥沙 有效磷/mg
60 有机肥	346.06±23.82b	103.32±8.31b	2348.16±237.68c	470.26±48.17c
90 有机肥	356.91±37.78b	144.16±13.77b	5021.13±459.27b	1809.63±168.52b
60 无机肥	1006.77±75.70a	784.82±64.95a	7058.00±682.64a	5702.12±559.94a
90 无机肥	1212.97±95.21a	911.26±71.39a	8686.57±731.39a	5955.71±502.17a

注:不同小写字母表示处理间差异显著( $p<0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 降雨强度对坡面磷素流失的影响

降雨是导致坡面磷素流失的主要因素,坡面氮素主要以径流和泥沙的形式流失<sup>[24]</sup>,进而造成土壤肥力减退和水环境污染<sup>[25]</sup>。降雨强度是降雨过程中的能量来源,分析降雨强度对坡面磷素流失特征的影响,有助于揭示坡面磷素流失机理。

研究发现,降雨强度越大,磷素流失量越大,这印证了毕磊等<sup>[26]</sup>的研究结果,即98%以上的磷素流失都发生在大雨强降雨事件中。颗粒态总磷流失量占总流失量的85%以上,这与前人研究成果相似<sup>[27-28]</sup>,因此泥沙仍是防控的主体。

本研究中径流可溶性总磷和正磷酸盐浓度均表现为降雨初期浓度较高,后逐渐降低,主要是受径流冲刷作用影响,也是径流磷污染的基本特征<sup>[29]</sup>。研究表明,暴雨初期由于冲刷作用流失的磷可占整个过程的62%<sup>[30]</sup>,在防控面源污染时,暴雨初期尤为重要。

发现小雨强下径流磷浓度高,由此推断,降雨量相同时,长历时降雨会造成更多的磷流失。截取相同

降雨量不同处理下磷流失量(图4),施用相同肥料类型的坡面,不同雨强下坡面颗粒态总磷流失量无显著差异( $p>0.05$ ),甚至施用无机肥的坡面在小雨强下流失了更多的颗粒态总磷;60 mm/h降雨强度下坡面溶解态总磷流失量均高于90 mm/h雨强处理,且施用无机肥的坡面差异显著( $p<0.05$ )。因此大雨强较小雨强磷素流失量高的主要原因是其总产流量和产沙量高。自然条件下,降雨强度通常较小,甚至会发生只产流不产沙的情况<sup>[31]</sup>,磷素流失以径流溶解态形式流失,因此长历时、小雨强降雨也应密切关注。

### 3.2 肥料类型对坡面磷素流失的影响

本研究表明,施用有机肥替代无机肥可以有效减少坡面径流磷浓度,其中径流可溶性总磷浓度降低幅度达53.82%~79.13%、径流正磷酸盐浓度达79.21%~88.70%,与吴美玲等<sup>[32]</sup>在稻田中的研究结果相似。本研究中,施用无机肥的坡面径流正磷酸盐浓度占径流可溶性总磷浓度的3/4以上,是径流磷素流失的主要形式,施用无机肥的地区应以正磷酸盐作为水质磷含量的检测指标。施用有机肥的坡面,径流正磷酸盐浓度仅占29.86%~40.39%,径流中,磷主要为可溶

性小分子有机磷,进入水体会使水体需氧量(COD)上升,引发水体有机物污染。此外,本试验中无机肥施用量参考了北京地区耕地实际施用量,推算此施

肥水平会造成 53.77~66.00 kg/hm<sup>2</sup> 的磷素流失。从磷素流失量来看,施用有机肥替代无机肥可以减少 45.67%~66.59% 的坡面磷素流失。

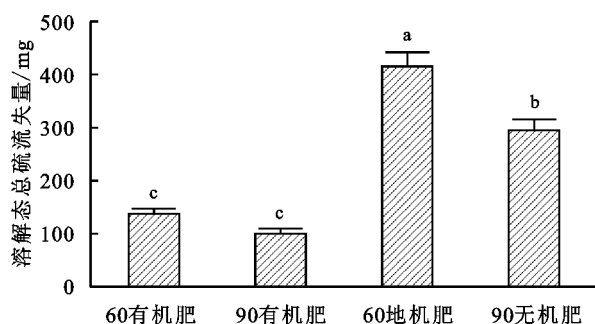
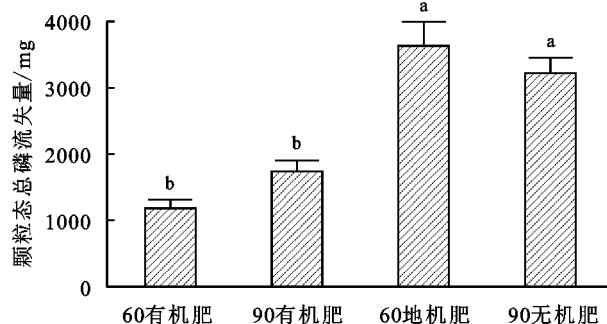


图4 等雨量下坡面磷素流失量



部分研究认为施用有机肥替代无机肥会使磷素流失量和流失浓度增加,可能原因有二。一方面,其选择畜禽粪便作为有机肥,且为鲜粪。罗春燕等研究发现,畜禽鲜粪便易流失的可溶性总磷含量可占总磷的 20.00%~44.00%<sup>[33]</sup>;杜会英等在淮河流域的研究也认为畜禽鲜粪便易溶性总磷平均可占全磷 47.00%~63.00%,最高达到 98.00%<sup>[34]</sup>。因此当选择畜禽鲜粪便作为有机肥时,降雨可能导致更高的地表径流总磷浓度和流失量。而通常施用有机肥前会对有机肥进行腐熟处理<sup>[35-36]</sup>,以往的鲜粪研究可能更适用于畜禽养殖场粪便的磷流失情况;另一方面,部分研究虽使用商品有机肥,但其施肥方式为表施。养分存于土壤表层,坡面发生土壤侵蚀时,缺少土体支撑,随径流流出断面出口,使得施用有机肥较无机肥有着更大的磷素流失量<sup>[22,37]</sup>。因此在施用有机肥时,应保有一定深度。

综上,有机肥替代无机肥可以减少磷素流失浓度和磷素流失量,农业生产中有条件的地区应尽量选择有机肥,并保有一定施肥深度;畜禽有机肥施用前要进行腐熟处理。

## 4 结论

(1) 降雨强度对坡面产流率和产沙率影响显著( $p < 0.05$ )。随着降雨强度增大,径流可溶性总磷浓度、径流正磷酸盐浓度下降,降雨强度的增大还会导致施用无机肥坡面颗粒态总磷浓度、泥沙有效磷浓度降低,施用有机肥坡面颗粒态总磷浓度、泥沙有效磷浓度增加;大雨强会导致更多的坡面磷素流失。

(2) 肥料类型对产流率影响不显著( $p > 0.05$ )。施用无机肥的坡面径流可溶性总磷浓度、径流正磷酸盐浓度、颗粒态总磷浓度、泥沙有效磷浓度均远高于有机肥。有机肥处理较无机肥可以减少坡面磷素流失。

(3) 明确大雨强下磷素流失量高的主要原因是其产流量和产沙量较大;施用无机肥坡面磷素流失量高的主要原因是其磷素浓度高。农业生产中有施用条件的地区应尽量选择有机肥,并避免表施,畜禽鲜粪便施用前要进行腐熟。

### 参考文献:

- [1] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,61(5):915-924.
- [2] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
- [3] 李慧敏,王瑞,施卫明,等.菜地土壤解磷微生物特征及其在磷形态转化调控中的作用[J].土壤,2020,52(4):668-675.
- [4] Lee C H, Wang C C, Lin H H, et al. In-situ biochar application conserves nutrients while simultaneously mitigating runoff and erosion of an Fe-oxide-enriched tropical soil[J]. Science of the Total Environment, 2018,619:665-671.
- [5] 闫湘,金继运,梁鸣早.我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J].土壤,2017,49(6):1067-1077.
- [6] 王静,叶壮,褚贵新.水磷一体化对磷素有效性及磷肥利用率的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(11):1377-1383.
- [7] Ohno T, Crannell B S. Green and animal manure-derived dissolved organic matter effects on phosphorus sorption[J]. Journal of Environmental Quality, 1996,25(5):1137-1143.
- [8] 韩笑,席运官,田伟,等.有机肥施用模式对环水有机蔬菜种植氮磷径流的影响[J].中国生态农业学报,2021,29(3):465-473.
- [9] Khan A, Lu G, Ayaz M, et al. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018,256:1-11.

- [10] 孔文杰. 油稻轮作下有机无机肥配施对作物产量及氮磷流失的影响[J]. 作物杂志, 2013, 29(3): 63-66.
- [11] 袁浩凌, 黄思怡, 孔小亮, 等. 不同施肥模式对早稻季农田氮磷径流流失的影响[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(4): 776-784.
- [12] 马凡凡, 邢素林, 甘曼琴, 等. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[J]. 作物杂志, 2019, 35(5): 89-96.
- [13] 原政, 欧阳铖人, 杨德海, 等. 不同用量有机肥替代化肥对洱海流域氮磷养分流失和烟叶产质量的影响[J]. 江西农业学报, 2022, 34(1): 94-99.
- [14] 袁培栋, 张鹏程, 何为媛, 等. 模拟降雨下不同农作措施紫色土坡耕地氮磷流失特征[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(6): 69-76.
- [15] 孙继松, 雷蕾, 于波, 等. 近10年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. 气象学报, 2015, 73(4): 609-623.
- [16] 曲芝旭, 韩玉国, 郭虎林, 等. 不同肥料类型及用量对坡面氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 1-6.
- [17] 李苗, 王晓, 庞宗强, 等. 沛沿河流域农田地表径流氮流失的模拟研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(12): 18-21.
- [18] 周明华, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1374-1381.
- [19] 陈玲, 宋林旭, 崔玉洁, 等. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 49-55.
- [20] 雷胜友, 唐文栋. 黄土在受力和湿陷过程中微结构变化的CT扫描分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4166-4169.
- [21] 单保庆, 尹澄清, 于静, 等. 降雨—径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 7-12.
- [22] 姜海斌, 沈仕洲, 谷艳茹, 等. 洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1305-1313.
- [23] 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.
- [24] 彭遥, 周蓓蓓, 陈晓鹏, 等. 间歇性降雨对黄土地水土养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 54-60.
- [25] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰, 等. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 131-140.
- [26] 毕磊, 谭启玲, 胡承孝, 等. 养分管理措施对丹江口库区橘园氮磷流失的影响[J]. 华中农业大学学报, 2011, 30(4): 474-478.
- [27] 刘娟, 张乃明, 徐红娇, 等. 不同土地利用方式下红壤磷素径流流失特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 103-110.
- [28] 袁兴程, 钱新, 庞宗强, 等. 不同土地利用方式土壤表层氮、磷流失特征研究[J]. 环境化学, 2011, 30(9): 1657-1662.
- [29] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区小流域典型降雨径流氮磷流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 28(4): 1353-1358.
- [30] 严坤, 王玉宽, 刘勤, 等. 三峡库区规模化顺坡沟垄果园氮、磷输出过程及流失负荷[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3646-3656.
- [31] 张晶玲, 周丽丽, 马仁明, 等. 天然降雨条件下横垄与顺垄坡面产流产沙过程[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 114-119.
- [32] 吴美玲, 张绍荣, 龙国, 等. 有机肥控制稻田氮磷流失风险效果初步研究[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(18): 4328-4332.
- [33] 罗春燕, 冀宏杰, 张维理, 等. 鸭粪和猪粪中易溶性磷含量特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 28(4): 1320-1325.
- [34] 杜会英, 张泽, 张爱, 等. 淮河流域畜禽粪便中易溶性磷特征[J]. 农业环境与发展, 2010, 27(6): 103-106.
- [35] 郭立月, 刘雪梅, 战丽杰, 等. 不同方式处理牛粪对大豆生长和品质的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5738-5746.
- [36] 黄绍文, 唐继伟, 李春花. 我国商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分和盐分状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 162-173.
- [37] 臧玲, 姚静华, 田光明. 水稻田磷素径流流失形态变化特征的模拟研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 12-15.