

网络出版时间:2019-11-27 15:19 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2020.06.012
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20191127.0922.024.html

有机肥对滇中红壤烤烟坡耕地氮磷流失的影响

唐倩¹,王克勤¹,宋娅丽¹,温昌焄²,杨小倩¹,张晓花¹

(1 西南林业大学生态与环境学院,云南昆明 650224;2 玉溪市红塔区水土保持工作站,云南玉溪 653100)

【摘要】【目的】研究自然降雨条件下施用有机肥对滇中坡耕地产流产沙与氮磷流失特征的影响,旨在为该地区肥料合理施用及坡耕地土壤侵蚀状况改善提供科学依据。【方法】以滇中二龙潭小流域红壤烤烟坡耕地为研究对象,在施用相同化肥的基础上,设置 6 种有机肥用量处理,分别为 0 kg/m²(CK)、0.25 kg/m²(T1)、0.50 kg/m²(T2)、0.75 kg/m²(T3)、1.00 kg/m²(T4)和 1.25 kg/m²(T5),选取 4 场自然降雨,研究不同有机肥用量条件下坡耕地径流及其泥沙中的氮磷流失特征。【结果】(1)4 场降雨条件下,不同处理的径流量和产沙量无显著差异,而降雨量和降雨强度对径流量和产沙量影响较大。(2)随着有机肥用量的增加,径流中总氮(TN)、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 质量浓度总体降低,表现为 CK>T1>T2>T3>T4>T5;溶解态氮是径流中氮素的主要存在形式,而 NO₃⁻-N 又是溶解态氮的主要组成部分。(3)随着有机肥用量的增加,径流中总磷(TP)及 PO₄³⁻-P 质量浓度明显降低,均表现为 CK>T1>T2>T3>T4>T5;径流中 TP、PO₄³⁻-P 质量浓度随着施肥时间的延长呈明显降低趋势。(4)在 4 场降雨过程中,泥沙中的 TN 和 TP 含量均随着有机肥用量的增加而降低。(5)有机肥用量的增加降低了坡耕地 TN、TP 流失总量,TN 流失以径流输出为主,TP 流失以泥沙输出为主。【结论】探明了自然降雨条件下施用有机肥后红壤坡耕地氮磷流失规律,为减少研究区氮磷流失量,雨季应尽量减少或避免农事活动,暴雨情况下应控制氮磷的输出,并可以通过增加有机肥用量和减少化肥用量的方式降低氮磷的输出。

【关键词】 有机肥;烤烟坡耕地;产流产沙;氮磷流失;滇中红壤

【中国分类号】 S157.4⁺1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2020)06-0106-11

Effects of organic fertilizer on nitrogen and phosphorus loss in flue-cured sloping farmland of red soil in central Yunnan

TANG Qian¹, WANG Keqin¹, SONG Yali¹, WEN Changtao²,
YANG Xiaoqian¹, ZHANG Xiaohua¹

(1 College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China;

2 Soil and Water Conservation Workstation, Hongta District of Yuxi, Yuxi, Yunnan 653100, China)

Abstract: 【Objective】 Under natural rainfall conditions, the effects of organic fertilizer application on runoff, sediment, and nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of central Yunnan were studied to provide basis for rational application of fertilizer and soil erosion of slope farmland. 【Method】 In this study, the sloping farmland of Erlongtan watershed in central Yunnan was selected for 6 different treatments of CK, T1 (0.25 kg/m²), T2 (0.50 kg/m²), T3 (0.75 kg/m²), T4 (1.00 kg/m²) and T5 (1.25 kg/m²) with same organic fertilizer. Four natural rainfalls were selected to study nitrogen and phosphorus loss and runoff and sediment characteristics under different organic fertilizer applications. 【Result】 (1) Under 4 rainfall

【收稿日期】 2019-05-24

【基金项目】 云南省重点研发计划项目(2018BC001);国家自然科学基金项目(30660037);云南省应用基础研究青年项目(2016FD044);云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目;国家林业局生态学重点学科项目

【作者简介】 唐倩(1996—),女,云南宣威人,硕士,主要从事生态恢复研究。E-mail: tangqian0703@163.com

【通信作者】 宋娅丽(1985—),女,山西长治人,讲师,博士,主要从事生态系统功能研究。E-mail: songyali19851205@sina.com

conditions, there was no significant difference between runoff and sediment in different treatments, while rainfall and rainfall intensity had great impacts on runoff and sediment. (2) With the increase of organic fertilizer, the concentrations of TN, NO_3^- -N and NH_4^+ -N in runoff under different treatments decreased with the order of $\text{CK} > \text{T1} > \text{T2} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T5}$. Dissolved nitrogen was the main form of nitrogen in runoff and NO_3^- -N was the main component of dissolved nitrogen. (3) With the increase of organic fertilizer, the concentrations of TP and PO_4^{3-} -P in runoff were significantly reduced in the order of $\text{CK} > \text{T1} > \text{T2} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T5}$. The concentrations of TP and PO_4^{3-} -P in runoff showed a decreasing trend along time. (4) In the process of 4 rainfall events, the contents of TN and TP in sediment decreased with the increase of organic fertilizer. (5) The total losses of TN and TP in slope farmland were reduced with the increase of organic fertilizer. The main loss of total nitrogen was runoff and that of total phosphorus was sediment. 【Conclusion】 The agricultural activities should be reduced or avoided in rainy season to reduce nitrogen and phosphorus loss. The output of nitrogen and phosphorus should be controlled under heavy rain, and can be reduced by increasing the application of organic fertilizer and reducing the application of chemical fertilizer.

Key words: organic fertilizer; flue-cured sloping farmland; runoff and sediment production; nitrogen and phosphorus loss; red soil in central Yunnan

坡耕地是我国重要的农业土地资源,也是水土流失的主要策源地^[1]。坡耕地水土流失不仅导致土壤肥力下降,加剧江河湖库淤积和内涝,同时也是面源污染发生的重要载体和运输形式。坡耕地中土壤颗粒随径流的迁移是坡面侵蚀的主要表现方式,侵蚀产沙受降雨强度和下垫面等因素的综合影响,N、P等养分随地表径流和泥沙流出并汇入水体,增加水体污染的风险^[2-3]。据统计,云南省中部坡耕地面积69.1万 hm^2 ,占全省坡耕地的19.83%,但该区坡耕地水土流失面积比例达47.53%^[4-5]。加之该省降雨主要集中在5—10月份,雨季雨量充沛,暴雨易导致降雨—径流—侵蚀—水污染负荷输出^[6],造成水体富营养化。因此,深入研究滇中坡耕地产流产沙与养分流失特征,对当地农业生产及环境保护具有重要的现实意义。

近年来,研究者对不同区域产流产沙及氮磷流失特征进行了研究,主要集中于降雨特征、土壤管理措施及土地利用方式的影响等方面。如邓龙洲等^[3]对不同雨强(30,60,90,120和150 mm/h)和坡度下(5° , 8° , 15° , 25°)侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征进行了研究;闫建梅等^[6]分析了不同施肥水平与耕作模式对坡地产流及磷素流失特征的影响;于兴修等^[7]在沂蒙山区设置不同的降雨强度(40和70 mm/h)处理,对其氮磷输出特征进行了模拟分析;朱利群等^[8]设置6种耕作方式和秸秆还田方式,分析其对稻田径流及氮磷养分流失特征的影响;刘方谊等^[9]对湖北省三峡库区不同种植模式下农田地表径流中的氮磷流失特征进行了研究。但以上研究

多集中在降雨特征及农艺措施对氮磷流失的影响方面,而关于滇中坡耕地不同有机肥用量对产流产沙及养分流失影响的研究较少。

以往研究表明,施用有机肥不仅可以提高土壤养分含量和改善土壤环境,还能促进当地主要经济作物烟草的生长及根系建成^[10-11]。云南是生猪养殖大省,养殖业产生了大量有机肥,如果有机肥得不到有效利用,会使氮、磷在土壤中形成积累,并在降雨集中期通过地表径流和土壤渗漏等多种途径进入地表水体和地下水,从而污染土壤及水体环境^[12-13]。因此,本试验以滇中二龙潭小流域坡耕地为研究对象,在施用化肥基础上,设置6种有机肥用量处理,研究自然降雨条件下不同有机肥用量对滇中坡耕地产流产沙与氮磷流失特征的影响,旨在为该地区肥料的合理施用及坡耕地土壤侵蚀状况的改善提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区地处云南省中部玉溪市红塔区东南部,位于北纬 $24^\circ 08' 30'' \sim 24^\circ 32' 18''$,东经 $102^\circ 17' 32'' \sim 102^\circ 41' 37''$,为云南省面源污染流域及地表径流监测试验点。该区属北亚热带半湿润冷冬高原季风气候,多年平均降雨量787.8 mm,其中,5—10月降雨量占全年总降雨量的85%,平均气温 $15.4 \sim 24.2^\circ\text{C}$,年平均蒸发量1 801 mm。试验区土壤多为红壤土,由砂页岩发育而成,大多岩石裸露,土层浅薄,土壤肥力较低,水土流失严重。研究区内林地面积为383 hm^2 ,占流域总面积的20.63%,树种以云南松

(*Pinus yunnanensis* Franch)分布最为广泛,其次有桉树(*Eucalyptus Labill*)、桤树(*Longpeduncled Alder*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* Hook)、栎类(*Quereus*)等。

1.2 材 料

试验材料为烤烟,品种为 K326,由玉溪市烟草公司统一调入,种植密度为 16 500 株/hm²。化肥为烟草复合肥,购自当地化肥厂, $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})=12:12:48$;有机肥来源于当地农户堆沤的猪粪,主要理化性质为:有机碳 325.72 g/kg,全氮 20.62 g/kg,全磷 13.24 g/kg,全钾 5.58 g/kg,含水量 60.28%。

1.3 试验设计

在试验地选取坡度为 15°的坡耕地,布设 6 组不同施肥量的样方(面积为 1 m×1 m),各样方四周用

铁皮隔开,各样方之间相隔均大于 2 m,以防径流在各样方之间渗漏。在样方下部设置导管和塑料桶,雨季每一场自然降雨后的田面径流通过导管流入塑料桶中。每个样方径流入水口高度保持一致。每个处理 3 个重复,各样方随机排列。

于 2018 年 4 月 18 日移栽烤烟,化肥用量根据当地农户烤烟种植习惯设置,总的用量为 0.345 kg/m²,分 3 次施入,其中 26%化肥作为基肥,于移栽当日施入;7 d 后 4%化肥作为提苗肥,以追肥形式施入;20 d 后 70%化肥作为追肥施入。在施用化肥基础上,设置 6 种有机肥用量,分别为 0 kg/m²(CK)、0.25 kg/m²(T1)、0.50 kg/m²(T2)、0.75 kg/m²(T3)、1.00 kg/m²(T4)和 1.25 kg/m²(T5),于烤烟移栽当日以基肥形式施入。不同处理的肥料用量以及折合纯氮和纯磷量见表 1。于 8 月底采收烤烟。

表 1 不同处理的肥料用量

Table 1 Fertilizer applied in different treatments						kg/m ²		
处理 Treatment	化肥					有机肥 Organic fertilizer		
	基肥 Base fertilizer	提苗肥 Seeding fertilizer	追肥 Top fertilizer	折合纯氮 Pure nitrogen	折合纯磷 Pure phosphorus	用量	折合纯氮 Pure nitrogen	折合纯磷 Pure phosphorus
CK	0.09	0.015	0.24	0.038 4	0.019 2	0.00	0.000 0	0.000 0
T1	0.09	0.015	0.24	0.038 4	0.019 2	0.25	0.012 5	0.006 25
T2	0.09	0.015	0.24	0.038 4	0.019 2	0.50	0.025 0	0.012 5
T3	0.09	0.015	0.24	0.038 4	0.019 2	0.75	0.037 5	0.018 75
T4	0.09	0.015	0.24	0.038 4	0.019 2	1.00	0.050 0	0.025 0
T5	0.09	0.015	0.24	0.038 4	0.019 2	1.25	0.062 5	0.031 25

1.4 样品采集

在烤烟移栽前期使用“对角线法”采集各样方表层(0~20 cm)土壤,用于调查土壤养分背景值。土壤基本理化性质:平均体积质量 1.29 g/cm³,有机质含量 15.9 g/kg,全氮含量 0.69 g/kg,碱解氮含量 66.79 mg/kg,全磷含量 0.58 g/kg,有效磷含量 35.21 mg/kg。在小流域设有雨量计,记录试验期间的降雨量与降雨强度,各样方保持原有地貌。在 2018 年 6—8 月的 4 场具有较大产流的自然降雨条件下,将样方塑料桶内泥沙与水样混匀,测定泥沙含量,进行不同深度多点采样,并将各水样转入干净的矿泉水瓶中,取 1 000 mL 径流样品于 4 ℃保存,并在 24 h 内过滤,测定其中的总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)、磷酸根(PO₄³⁻-P)质量浓度。取完水样后,将径流继续放置沉淀,待径流澄清后,弃掉上层清水,收集泥沙并称质量,在避光条件下自然风干,用于测定泥沙 TN 和 TP 含量。

1.5 测定指标与方法

降雨量(12 h)采用雨量计进行观测,径流量用

体积法测定,泥沙量利用 711 型便携式悬浮物/界面分析仪测定。

径流中 TN 质量浓度采用过硫酸钾(K₂S₂O₈)氧化-紫外分光光度法测定,NO₃⁻-N 质量浓度采用酚二磺酸分光光度法测定,NH₄⁺-N 质量浓度采用纳氏试剂比色法测定,颗粒态氮(PN)质量浓度由总氮与溶解态氮质量浓度之差得出,TP 质量浓度采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定,PO₄³⁻-P 质量浓度采用分光光度法测定^[14]。

泥沙中 TN 含量采用凯式定氮法测定,TP 含量采用酸溶-钼锑抗比色法测定^[15]。各个指标均做 3 组平行试验,取平均值。

各场降雨径流和泥沙中的 TN(TP)流失量(mg/m²)由以下公式计算得到:

径流中 TN(TP)流失量=降雨径流量(kg/m²)×径流平均 TN(TP)质量浓度(mg/L);

泥沙中 TN(TP)流失量=降雨产沙量(g/m²)×泥沙平均 TN(TP)含量(g/kg)。

1.6 数据处理与分析

试验采用 Excel 2016 进行数据处理和图表绘

制,并采用 SPSS 25.0 软件对研究区降雨量与径流量、降雨强度与产沙量之间的相关性,以及不同有机肥用量下径流量、产沙量、氮磷流失量之间的差异性进行分析,其中相关性分析采用皮尔逊双尾相关性分析法,方差分析采用最小显著性差异(LSD)法。

2 结果与分析

2.1 有机肥用量对坡耕地产流与产沙特征的影响

2018 年 6—8 月,研究区降雨量为 456.20 mm,占全年降雨量(770.8 mm)的 59.19%,记录产流的降雨事件共 12 场,从中选取了 4 场具有明显产流的降雨,由此计算了各样方平均径流量和产沙量(表 2)。根据我国气象部门规定的降雨强度标准可知,12 h 降雨量≥30 mm 或 24 h 降雨量≥50 mm 为暴

雨,选取的 4 场降雨中,06-27,08-04 和 08-09 的降雨属于暴雨,降雨量(12 h)分别为 30.81、35.62 和 32.24 mm;07-26 的降雨量(12 h)较小,仅为 11.05 mm。06-27,08-04 和 08-09 的径流量平均值均较高,07-26 的径流量平均值较低,说明降雨量与径流量之间呈正相关。降雨条件下产生径流从而导致土壤侵蚀,而土壤侵蚀产生的泥沙量并不稳定。当 06-27 降雨强度达 24.02 mm/h 时,土壤产沙量平均值最高,为 4.24 g/m²;07-26,08-04 和 08-09 降雨强度均较低,土壤产沙量也较低。说明降雨强度对土壤产沙量的影响较大,两者之间呈正相关。由表 2 还可知,不同处理之间的径流量和产沙量无显著差异,说明自然降雨条件下施用有机肥对径流量和产沙量无显著影响。

表 2 有机肥用量对滇中红壤烤烟坡耕地径流量和产沙量的影响

测定指标 Index parameter		降雨日期 Rainfall date			
		06-27	07-26	08-04	08-09
降雨量/mm Precipitation		30.81	11.05	35.62	32.24
降雨强度/(mm·h ⁻¹) Rainfall intensity		24.02	7.42	11.31	10.82
径流量/(kg·m ⁻²) Runoff	CK	3.55±0.02 a	1.95±0.17 a	5.05±0.35 a	6.09±0.36 a
	T1	3.63±0.25 a	1.43±0.12 a	5.58±0.35 a	5.83±0.50 a
	T2	4.11±0.32 a	1.75±0.07 a	6.27±0.54 a	6.12±0.46 a
	T3	3.78±0.23 a	1.85±0.12 a	5.69±0.57 a	5.91±0.31 a
	T4	3.74±0.17 a	2.31±0.19 a	6.10±0.06 a	5.33±0.28 a
	T5	3.42±0.21 a	1.85±0.01 a	5.75±0.29 a	6.17±0.19 a
	平均值 Average	3.71±1.47	1.86±1.80	5.74±1.45	5.91±2.06
	CK	4.48±0.28 a	1.09±0.09 a	2.65±0.15 a	2.47±0.25 a
	T1	3.65±0.14 a	0.91±0.05 a	3.04±0.19 a	2.19±0.19 a
	T2	4.21±0.35 a	1.27±0.07 a	2.31±0.16 a	2.36±0.16 a
产沙量/(g·m ⁻²) Sediment	T3	4.87±0.16 a	0.93±0.01 a	3.05±0.25 a	2.24±0.22 a
	T4	3.98±0.28 a	1.04±0.05 a	3.02±0.21 a	1.98±0.09 a
	T5	4.23±0.17 a	1.11±0.14 a	2.85±0.12 a	2.11±0.14 a
	平均值 Average	4.24±1.20	1.14±0.97	2.82±0.67	2.23±0.92

注:同列数据后标相同字母表示不同处理间差异不显著(P>0.05)。
Note:Same letters indicate insignificant difference between treatments (P>0.05).

2.2 有机肥用量对坡耕地地表径流中氮磷质量浓度的影响

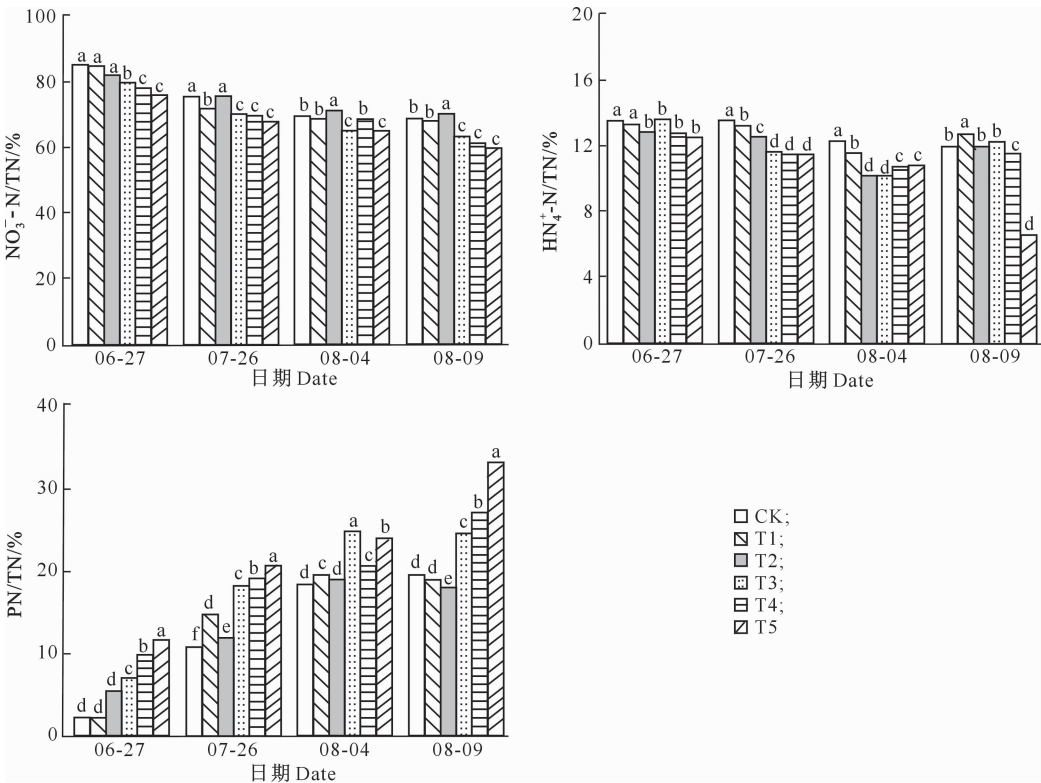
2.2.1 氮素质量浓度动态变化特征 从表 3 可以看出,相同降雨条件下,随着有机肥用量的增加,TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 质量浓度均逐渐降低,均表现为 CK>T1>T2>T3>T4>T5,且 T1、T2、T3、T4 和 T5 处理与 CK 差异显著(P<0.05),说明施用有机肥显著降低了径流中不同形态氮的质量浓度,且施肥时间越长,降低幅度越大。08-09 T5 处理 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 质量浓度分别为 0.15、0.09 和 0.01 mg/L,其中 TN 质量浓度低于 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中规定的 V 类标准(2 mg/L)^[16]。不同的降雨条件下,同一处理

TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 质量浓度变化也较大,说明降雨条件也是导致施肥后径流中 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 质量浓度差异较大的一个重要原因。随着施肥时间的延长,同一处理 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 质量浓度变化趋势一致,即总体上呈降低趋势。
地表径流中氮素的主要存在形式包括溶解态氮和颗粒态氮(PN),由于亚硝态氮在溶解态氮中所占比例很小,故用 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 质量浓度之和计算溶解态氮,总氮质量浓度减去溶解态氮质量浓度得到 PN 质量浓度^[17]。有机肥用量对滇中红壤烤烟坡耕地径流中 NO₃⁻-N/TN、NH₄⁺-N/TN 及 PN/TN 的影响见图 1。

表 3 有机肥用量对滇中红壤烤烟坡耕地径流中氮素质量浓度的影响

Table 3 Effect of organic fertilizer application on nitrogen concentration in different runoff of slope farmland of red soil in central Yunnan		mg/L					
指标 Index	日期 Date	CK	T1	T2	T3	T4	T5
TN	06-27	2.74±0.05 a	2.41±0.11 b	1.87±0.10 c	1.40±0.07 d	1.33±0.11 d	1.28±0.12 d
	07-26	2.45±0.02 a	2.04±0.16 b	1.76±0.06 c	1.54±0.05 d	1.31±0.01 e	1.22±0.11 e
	08-04	2.28±0.12 a	1.90±0.08 b	1.86±0.01 b	1.57±0.01 c	1.02±0.13 d	0.46±0.04 e
	08-09	1.34±0.03 a	0.95±0.02 b	0.67±0.04 c	0.41±0.03 d	0.26±0.01 e	0.15±0.01 e
NO ₃ ⁻ -N	06-27	2.31±0.03 a	2.04±0.13 b	1.53±0.03 c	1.11±0.02 d	1.03±0.03 d	0.97±0.02 d
	07-26	1.86±0.02 a	1.47±0.02 b	1.33±0.12 c	1.08±0.09 d	0.91±0.02 e	0.83±0.03 e
	08-04	1.58±0.13 a	1.31±0.06 b	1.32±0.10 b	1.02±0.07 c	0.70±0.04 d	0.30±0.01 e
	08-09	0.92±0.03 a	0.65±0.02 b	0.47±0.02 c	0.26±0.02 d	0.16±0.03 e	0.09±0.00 e
NH ₄ ⁺ -N	06-27	0.37±0.06 a	0.32±0.01 b	0.24±0.01 c	0.19±0.01 d	0.17±0.01 d	0.16±0.01 d
	07-26	0.33±0.04 a	0.27±0.00 b	0.22±0.01 c	0.18±0.02 d	0.15±0.00 e	0.14±0.02 e
	08-04	0.28±0.03 a	0.22±0.01 b	0.19±0.00 c	0.16±0.00 d	0.11±0.01 e	0.05±0.00 f
	08-09	0.16±0.01 a	0.12±0.00 b	0.08±0.00 c	0.05±0.00 d	0.03±0.00 e	0.01±0.00 f

注:同行数据后标相同字母表示不同处理间差异不显著($P>0.05$),标不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下表同。
Note:Same letters indicate insignificant difference between treatments ($P>0.05$),different letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$). The same below.



图柱上标不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下图同

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below

图 1 有机肥用量对滇中红壤烤烟坡耕地径流中 NO₃⁻-N/TN、NH₄⁺-N/TN 及 PN/TN 的影响

Fig. 1 Effects of organic fertilizer application on NO₃⁻-N/TN, NH₄⁺-N/TN and PN/TN of runoff in slope farmland of red soil in central Yunnan

由图 1 可以看出,在自然降雨和施用有机肥处理下,NO₃⁻-N 占 TN 质量浓度的比例(NO₃⁻-N/TN)为 60.00%~84.65%,对径流中 TN 质量浓度有直接影响,为溶解态氮的主要组成部分。NO₃⁻-N/TN 随着有机肥用量的增加总体呈降低的趋势。

NH₄⁺-N 占 TN 质量浓度的比例(NH₄⁺-N/TN)仅为 6.67%~13.50%,NH₄⁺-N/TN 随着有机肥用量的增加总体上呈波动式降低趋势。随着有机肥用量的增加,PN 占 TN 质量浓度的比例(PN/TN)则总体上呈增加趋势,但均低于 40%,说明溶解态氮

是径流水体中氮素污染的主要污染物。

由图 1 还可知,4 次降雨过程中,不同处理的 $\text{NO}_3^- \text{-N/TN}$ 在 06-27 均最高,此时有机肥施用时间为 9 d,说明施肥后其他形态的氮主要转化为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 。 $\text{NH}_4^+ \text{-N/TN}$ 是反映氮素转化与流失的重要指标。与 06-27 相比,施肥后 51 d(08-09),CK、T1、T2、T3、T4 和 T5 处理 $\text{NH}_4^+ \text{-N/TN}$ 分别下降了 11.56%,4.89%,6.94%,10.10%,9.70% 和 46.64%,说明施肥后期 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 转换为其他形态氮,此时氮素流失风险仍较高。 PN/TN 随着施肥时间的延长呈波动性上升的趋势,说明施肥后期 PN 将增加氮流失风险。

2.2.2 磷素质量浓度动态变化特征 由图 2 可以看出,径流中不同处理的 TP 和 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 质量浓度分别为 0.37~1.43 和 0.10~1.09 mg/L。在相同降雨条件下,随着有机肥用量的增加,径流中 TP 及 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 质量浓度均明显降低,总体上均表现为 $\text{CK} > \text{T1} > \text{T2} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T5}$ 。06-27—08-09,与 CK 相比,T5 处理的 TP 及 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 质量浓度平均值分别降低了 35.09%~55.71% 和 43.32%~

76.84%,说明施用有机肥明显降低了径流中 TP、 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 的质量浓度,且施肥时间越长,降低幅度越高。08-09 T5 处理的 TP 及 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 质量浓度均最低,且 T5 处理的 TP 质量浓度低于 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中规定 V 类标准(0.4 mg/L);其余处理的 TP 质量浓度为 0.45~0.57 mg/L,显著高于 T5 处理。06-27 降雨强度为 24.02 mm/h,明显高于其他 3 场降雨,说明当降雨强度提高时,随径流流失的 TP 质量浓度也会增加。随着施肥时间的延长,同一处理 TP、 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 质量浓度变化趋势基本一致,均呈明显的降低趋势,有机肥施用 51 d 时(08-09),各处理 TP 及 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 质量浓度均最低,分别为 06-27 的 47.63%~60.39% 和 64.44%~84.56%。由图 2 还可以看出,不同处理 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 占 TP 质量浓度的比例($\text{PO}_4^{3-} \text{-P/TP}$)为 23.11%~77.30%,说明不同处理径流总磷输出主要以溶解态磷为主。随着施肥时间的延长, $\text{PO}_4^{3-} \text{-P/TP}$ 总体呈波动式下降趋势,且时间越长,下降幅度越高。

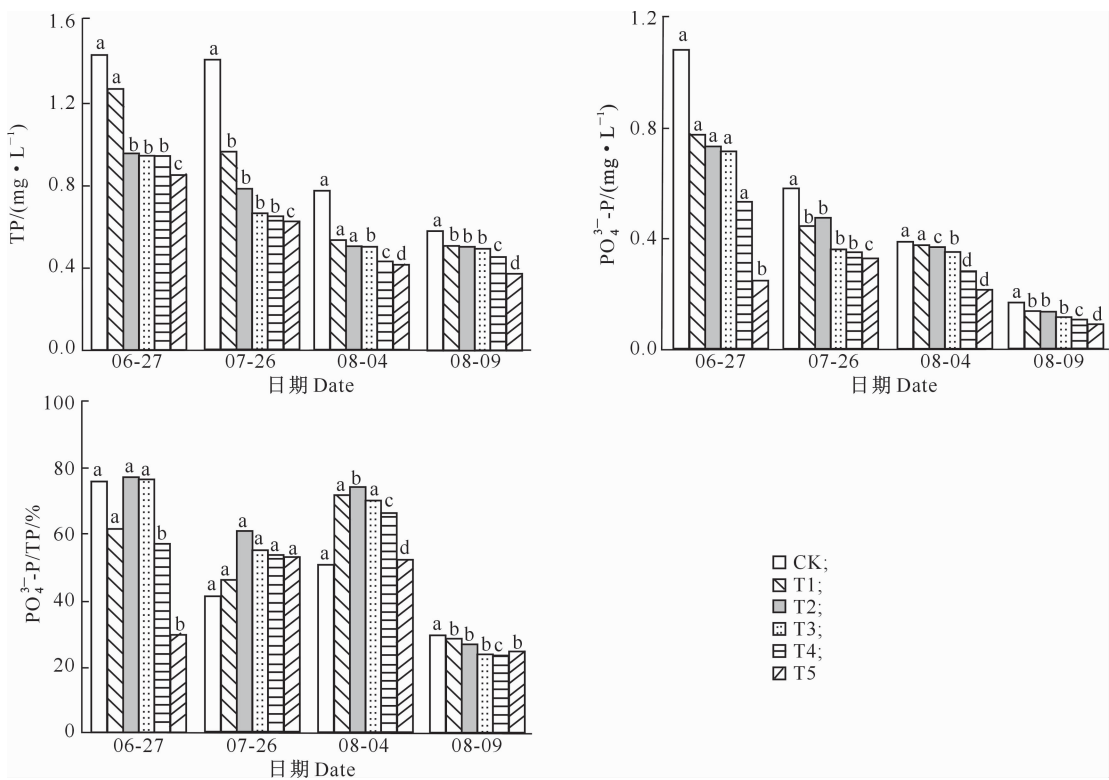


图 2 有机肥用量对滇中红壤烤烟坡耕地径流中总磷质量浓度及 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P/TP}$ 的影响

Fig. 2 Effects of organic fertilizer application on TP and $\text{PO}_4^{3-} \text{-P/TP}$ of runoff in slope farmland of red soil in central Yunnan

2.3 有机肥用量对坡耕地泥沙中氮磷含量的影响

2.3.1 氮素含量动态变化特征 表 4 显示,在 4 场

降雨过程中,各处理泥沙中的 TN 含量平均值表现为 $\text{CK} > \text{T1} > \text{T2} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T5}$,即随着有机肥用量

的增加泥沙中的 TN 含量总体降低,T5 处理 TN 含量为 0.14~0.49 g/kg,是 CK 的 37.84%~90.57%。说明施用有机肥明显降低了泥沙中 TN 含量,且施肥后时间越长,泥沙中 TN 含量降低幅度越高。当 06-27 降雨强度达到 24.02 mm/h 时,各处

理泥沙 TN 含量均较高(0.47~0.58 g/kg),说明泥沙中 TN 含量与降雨强度有关。06-27—08-09,随着施肥时间的延长,同一处理泥沙中 TN 含量逐渐降低,至 08-09,各处理泥沙中 TN 含量均最低,分别为 06-27 的28.57%~63.79%。

表 4 有机肥用量对滇中红壤烤烟坡耕地泥沙中总氮含量的影响

Table 4 Effects of organic fertilizer application on TN of sediments in slope farmland of red soil in central Yunnan g/kg						
日期 Date	CK	T1	T2	T3	T4	T5
06-27	0.58±0.01 a	0.52±0.01 b	0.52±0.00 b	0.53±0.02 b	0.47±0.00 c	0.49±0.02 c
07-26	0.53±0.03 a	0.54±0.00 a	0.48±0.04 b	0.46±0.02 b	0.42±0.00 c	0.48±0.01 b
08-04	0.46±0.02 a	0.43±0.02 b	0.43±0.03 b	0.40±0.03 c	0.34±0.00 d	0.32±0.00 d
08-09	0.37±0.00 a	0.29±0.01 b	0.26±0.01 c	0.23±0.01 d	0.21±0.01 e	0.14±0.01 f
平均值 Average	0.49±0.02	0.45±0.01	0.42±0.02	0.41±0.02	0.36±0.01	0.36±0.01

2.3.2 磷素含量动态变化特征 有机肥用量对坡滇中红壤烤烟耕地泥沙中总磷含量的影响如图 3 所示。

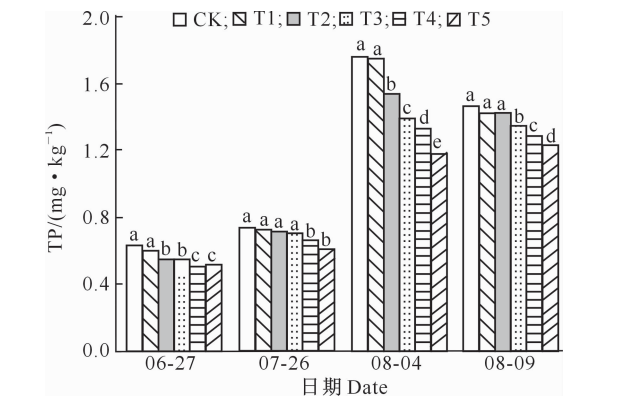


图 3 有机肥用量对滇中红壤烤烟坡耕地泥沙中总磷含量的影响

Fig. 3 Effects of organic fertilizer application on TP of sediments in slope farmland of red soil in central Yunnan

图 3 显示,随着有机肥用量的增加,泥沙中的 TP 含量平均值表现为 CK>T1>T2>T3>T4>T5,即随着有机肥用量增加,泥沙中的 TP 含量降低,

与 CK 相比,T5 处理 TP 含量下降了 16.10%~32.71%。说明施用有机肥显著降低了泥沙中 TP 含量。随着施肥时间的延长,同一处理坡耕地泥沙中的 TP 含量并未降低,反而总体上呈升高趋势。

2.4 有机肥用量对坡耕地氮磷流失量的影响

表 5 和表 6 显示,在 4 场降雨过程中,06-27,07-26,08-04 和 08-09 各处理 TN 总流失量分别为 6.83~12.63,2.82~5.16,3.54~14.39 和 1.20~8.75 mg/m²; TP 总流失量分别为 4.16~5.15,1.24~1.46,4.24~6.27 和 3.05~4.10 mg/m²。在相同降雨条件下,随着有机肥用量的增加,TN 和 TP 总流失量逐渐降低,且各处理间差异显著(P<0.05),均表现为 CK>T1>T2>T3>T4>T5,说明有机肥用量的提高显著降低了农田中 TN 和 TP 的流失量。在 4 场降雨中坡耕地 TN 流失以径流输出为主,占流失量的 69.55%~90.97%;而 TP 流失以泥沙输出为主,占流失量的 51.19%~89.83%,土壤侵蚀严重。T5 处理 TN 和 TP 平均流失量较 CK 分别降低了 64.84%和 24.23%,可知施用有机肥对 TN 流失量的降低效果优于 TP。

表 5 有机肥用量对滇中红壤烤烟坡耕地总氮流失量的影响

Table 5 Effects of organic fertilizer application on TN loss in slope farmland of red soil in central Yunnan mg/m ²							
日期 Date	来源 Resource	CK	T1	T2	T3	T4	T5
06-27	径流 Runoff	10.17±0.85 a	8.94±0.31 a	6.94±0.46 b	5.19±0.39 c	4.93±0.29 c	4.75±0.37 c
	泥沙 Sediment	2.46±0.31 a	2.20±0.09 a	2.20±0.11 a	2.25±0.12 a	1.99±0.13 a	2.08±0.09 a
	总和 Total	12.63±1.16 a	11.14±0.40 a	9.14±0.57 b	7.44±0.51 c	6.92±0.42 c	6.83±0.46 c
07-26	径流 Runoff	4.56±0.22 a	3.79±0.14 b	3.27±0.26 b	2.86±0.11 c	2.44±0.10 c	2.27±0.12 c
	泥沙 Sediment	0.60±0.03 a	0.62±0.03 a	0.55±0.03 a	0.52±0.04 a	0.48±0.03 a	0.55±0.04 a
	总和 Total	5.16±0.25 a	4.41±0.17 a	3.82±0.29 a	3.38±0.15 b	2.92±0.13 b	2.82±0.16 b
08-04	径流 Runoff	13.09±0.10 a	10.91±0.85 b	10.68±0.91 b	9.01±0.78 c	5.85±0.46 d	2.64±0.17 e
	泥沙 Sediment	1.30±0.09 a	1.21±0.06 a	1.21±0.03 a	1.13±0.10 a	0.96±0.05 b	0.90±0.07 b
	总和 Total	14.39±0.19 a	12.12±0.91 b	11.89±0.94 b	10.14±0.88 c	6.81±0.51 d	3.54±0.24 e
08-09	径流 Runoff	7.92±0.43 a	5.61±0.42 b	3.96±0.23 c	2.42±0.15 d	1.54±0.09 e	0.89±0.06 e
	泥沙 Sediment	0.83±0.02 a	0.65±0.04 b	0.58±0.01 b	0.51±0.03 b	0.47±0.03 b	0.31±0.01 c
	总和 Total	8.75±0.45 a	6.26±0.46 b	4.54±0.24 c	2.93±0.18 d	2.01±0.12 d	1.20±0.07 e
	合计 Total	40.93±2.05 a	33.93±1.94 b	29.39±2.04 b	23.89±1.72 c	18.66±1.18 d	14.39±0.93 d

表 6 有机肥用量对滇中红壤烤烟坡耕地总磷流失量的影响

Table 6 Effects of organic fertilizer application on TP loss in slope farmland of red soil in central Yunnan							mg/m ²
日期 Date	来源 Resource	CK	T1	T2	T3	T4	T5
06-27	径流 Runoff	2.46±0.09 a	2.20±0.13 a	2.20±0.08 a	2.25±0.11 a	1.99±0.01 a	2.08±0.19 a
	泥沙 Sediment	2.69±0.12 a	2.55±0.09 a	2.36±0.21 a	2.36±0.19 a	2.17±0.19 a	2.23±0.07 a
	总和 Total	5.15±0.21 a	4.75±0.22 b	4.56±0.31 b	4.61±0.31 b	4.16±0.20 b	4.31±0.26 b
07-26	径流 Runoff	0.60±0.03 a	0.62±0.36 a	0.55±0.04 a	0.52±0.10 a	0.48±0.03 a	0.55±0.03 a
	泥沙 Sediment	0.84±0.05 a	0.84±0.07 a	0.83±0.03 a	0.82±0.04 a	0.76±0.34 a	0.70±0.02 a
	总和 Total	1.44±0.08 a	1.46±0.43 a	1.38±0.07 a	1.34±0.14 a	1.24±0.37 a	1.25±0.05 a
08-04	径流 Runoff	1.30±0.11 a	1.21±0.08 a	1.21±0.01 a	1.13±0.06 a	0.96±0.05 b	0.90±0.01 b
	泥沙 Sediment	4.97±0.35 a	4.96±0.35 a	4.37±0.35 a	3.94±0.18 a	3.76±0.19 a	3.34±0.09 a
	总和 Total	6.27±0.46 a	6.17±0.43 a	5.58±0.36 a	5.07±0.24 b	4.72±0.24 b	4.24±0.10 b
08-09	径流 Runoff	0.83±0.05 a	0.65±0.04 b	0.58±0.38 b	0.51±0.03 b	0.47±0.03 b	0.31±0.01 c
	泥沙 Sediment	3.27±0.26 a	3.19±0.28 a	3.17±0.29 a	3.03±0.17 a	2.86±0.20 a	2.74±0.29 a
	总和 Total	4.10±0.31 a	3.84±0.32 a	3.75±0.67 a	3.54±0.20 a	3.33±0.23 a	3.05±0.30 a
合计 Total		16.96±1.06 a	16.22±1.40 a	15.27±1.41 b	14.56±0.89 b	13.45±1.04 c	12.85±0.71 c

3 讨 论

3.1 坡耕地氮磷流失形态变化特征

降雨量、降雨强度是影响水土与养分流失的重要因素。本研究中,滇中二龙潭小流域红壤坡耕地在 2018 年的降雨量为 770.8 mm,与多年平均降雨量 787.8 mm 持平,雨季 6—8 月的总降雨量为 456.20 mm,占全年降雨量的 59.19%。降雨强度不同导致雨滴的溅蚀能力、超渗产流程度不同,进而影响地表径流以及其中的氮磷浓度^[18]。降雨强度较大时,雨滴动力更容易促使氮磷溶解并随径流流失。地表径流作为土壤侵蚀和氮磷养分流失的主要动力和载体,其流失过程实际上是降雨-表层土壤养分-径流相互作用的过程,也是泥沙和氮磷流失的主要源动力^[19]。本研究中,径流量、产沙量随降雨量的增大而增加,径流量、产沙量与降雨量之间呈正相关。

本研究表明,施用有机肥可明显降低红壤坡耕地径流和土壤侵蚀泥沙中的氮磷含量,有机肥用量与径流中氮磷质量浓度具有明显的负相关关系,即有机肥的用量越高,径流中氮磷质量浓度越低。由于有机肥和化肥供肥特点的差异,CK 中只施用化肥,而化肥中氮磷释放速度快,导致 CK 径流中氮磷质量浓度高于施用有机肥处理。随着有机肥用量的增加,其对氮磷流失的缓解作用更加明显。本研究中,06-27 降雨导致的地表径流中氮磷质量浓度最高的原因也可能与基施化肥有关。因为基施化肥最易导致土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 随地表径流流失^[20]。此外,06-27 烤烟仍处于生长前期,此时为施用肥料后第 9 天,土壤中养分含量较高,但烤烟对养分的需求量较少,这就导致大量养分储存在土壤

中,降雨条件下大量氮磷随径流流失。在相同降雨条件下,泥沙中 TN 和 TP 含量也随有机肥用量的增加而降低,这主要是由于有机肥可改善土壤的结构,促进土壤团聚结构的形成,提高土壤团聚体对养分的吸附能力,从而降低氮磷的流失。

本研究中,NO₃⁻-N 是自然降雨条件下坡耕地径流中流失氮素的主要形态,其占 TN 质量浓度的 60.00%~84.65%;NH₄⁺-N 的质量浓度较小,仅占 TN 质量浓度的 6.67%~13.50%。这与陈秋会等^[21]对太湖流域麦季径流的研究结果一致,即氮流失主要以 NO₃⁻-N 为主。黄东风等^[20]的研究表明,在小白菜地,地表径流中 NO₃⁻-N 占 NO₃⁻-N+NH₄⁺-N 质量浓度的 80.43%~89.86%,而 NH₄⁺-N 仅占 10.14%~19.57%。这是由于土壤矿化作用释放 NH₄⁺-N,NH₄⁺-N 又氧化为 NO₃⁻-N,而土壤胶体和硝态氮均带负电荷,NO₃⁻-N 不易被土壤吸附,容易随径流流失,故径流中的氮素主要以 NO₃⁻-N 的形态存在。本研究中,不同处理径流中的氮素主要以溶解态为主,由此说明土壤中仅有少量颗粒态氮随径流输出;径流中磷素流失与氮素类似,即径流中流失磷素主要以溶解态为主。说明有机肥与化肥配施可以缓解溶解态磷随土壤径流的流失,而施肥初期施入土壤的磷很快被吸附到土壤颗粒表面或与土壤物质作用形成难溶性磷,导致土壤中难溶解的磷不易被释放和迁移^[22]。这与乔闪闪等^[23]对黄土坡面氮磷流失特征的研究结果一致。本研究中,在相同降雨条件下,泥沙氮磷含量随着有机肥用量的增加而总体降低。

3.2 坡耕地氮磷流失量的变化特征

本研究中,滇中二龙潭小流域红壤坡耕地氮素

流失的主要途径是径流流失(69.55%~90.97%),而磷素流失的主要途径为侵蚀泥沙(51.19%~89.83%),氮磷流失不仅对农田造成了直接的损坏,容易造成水体的富营养化,还会降低化肥的利用率。而王甜等^[24]在三峡库区退耕还林模式及坡耕地的研究中认为,地表径流量及侵蚀泥沙流失量与降雨量存在着显著的正相关关系,但侵蚀泥沙氮磷流失量高于地表径流流失量。此结论中前者与本研究结论相同,而后者出现差异的原因是,在多种自然因素(降雨量、降雨强度、植物类型、植物生长情况等)和人为因素(土地利用类型、人为管理状况)相互作用下,导致不同研究区不同植被类型条件下径流泥沙养分富集度有所差异。地表径流和泥沙中的氮磷流失量取决于径流量与产沙量以及养分含量^[25],径流量和产沙量取决于降雨特征,而氮磷含量则主要取决于施肥量及植物生长过程。在本研究中,径流的 TN、TP 流失量分别为 0.89~13.09 和 0.31~2.46 mg/m²,远低于太湖流域稻田有机种植模式下径流 TN、TP 流失量^[21]。

本研究中,随着有机肥用量的增加,烤烟坡耕地径流泥沙中的 TN、TP 总流失量逐渐降低。说明有机肥可有效控制径流泥沙中的 TN、TP 流失量,降低氮磷流失风险。这主要是由于施用有机肥改善了土壤结构,增加了土壤孔隙,使土壤质地疏松,增加了土壤微生物活性,在一定程度上减缓了降水在地表的横向流动,促使地表水向地下淋溶,从而减少了氮磷流失量^[11-12]。因此,在 T4 和 T5 处理条件下,即当有机肥用量为 1.00 和 1.25 kg/m² 时,有机-无机肥料配施,可最大限度减缓地表径流中的氮磷流失。同样,闫建梅等^[26]在重庆紫色土坡耕地“冬小麦-夏玉米”种植模式下施用有机肥(22 500 kg/hm²)后发现,有机肥可改善土壤结构,促进土壤团粒结构的形成,提高土壤团聚体对养分的吸附能力,从而减少氮磷的流失,这与本研究结论一致。

4 结 论

1)随着有机肥用量的增加,滇中红壤坡耕地径流中 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、TP 及 PO₄³⁻-P 质量浓度总体降低,总体上均表现为 CK>T1>T2>T3>T4>T5;各形态氮磷质量浓度均随施肥时间的延长呈明显降低趋势;溶解态氮是径流水体中氮污染的主要污染物,NO₃⁻-N 为溶解态氮的主要组成部分;各处理径流总磷输出主要以溶解态磷为主。

2)在 4 场降雨过程中,径流泥沙中的 TN 和 TP

含量平均值均随着有机肥用量的增加而降低;随着施肥时间的延长,同一处理泥沙中 TN 含量总体降低,但 TP 含量总体呈升高趋势。

3)在相同降雨条件下,随着有机肥用量的增加, TN 和 TP 总流失量降低,说明施用有机肥可以降低农田氮素和磷素的流失量,其中 TN 流失以径流输出为主,TP 流失以泥沙输出为主。为了减少该流域氮磷流失量,在雨季应尽量减少或避免农事活动,在暴雨情况下控制氮磷的输出,并通过增加施用有机肥和减少施用化肥的方式来降低水土流失及氮磷输出。

[参考文献]

- [1] 吕玉娟,彭新华,高磊,等.红壤丘陵岗地区坡地产沙特征及影响因素研究[J].水土保持学报,2014,28(6):19-23.
Lü Y J, Peng X H, Gao L, et al. Characteristics of runoff and soil loss and their influential factors on sloping land in red soil hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6):19-23.
- [2] 常松果,胡雪琴,史东梅,等.不同土壤管理措施下坡耕地产沙和氮磷流失特征[J].水土保持学报,2016,30(5):34-40.
Chang S G, Hu X Q, Shi D M, et al. Characteristics of runoff and sediment, nitrogen and phosphorus losses under soil management measures in sloping farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5):34-40.
- [3] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.
Deng L Z, Zhang L P, Fan X J, et al. Characteristics of runoff and sediment yield under different rainfall intensities and slope gradients in erosive weathered granite area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(17):143-150.
- [4] 赵成,顾小华,姜宏雷,等.云南省坡耕地现状及水土流失综合治理探索[J].中国水土保持,2015(4):11-12.
Zhao C, Gu X H, Jiang H L, et al. Current situation of sloping farmland in Yunnan Province and comprehensive treatment of soil and water loss [J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(4):11-12.
- [5] 杨子生,贺一梅.中国西南边疆山区耕地水土流失研究:以云南省为例[J].水土保持研究,2009,16(1):1-7.
Yang Z S, He Y M. Soil erosion of cultivated land in mountainous areas at China's southwest border [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(1):1-7.
- [6] 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.
Yan J M, He B H, Tian T Q, et al. Effect of fertilizer levels and tillage methods on phosphorus loss in purple soil area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1):132-136.

- [7] 于兴修,马 骞,刘前进,等. 横坡与顺坡垄作径流氮磷输出及其富营养化风险对比研究 [J]. 环境科学,2011,32(2):428-435.
Yu X X, Ma Q, Liu Q J, et al. Comparative study of N, P output and eutrophication risk in runoff water in cross ridge and longitudinal ridge [J]. Environmental Science, 2011, 32(2): 428-435.
- [8] 朱利群,夏小江,胡清宇,等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响 [J]. 水土保持学报,2012,26(6):6-10.
Zhu L Q, Xia X J, Hu Q Y, et al. Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6): 6-10.
- [9] 刘方谊,夏 颖,黄 敏,等. 湖北省三峡库区不同种植模式下农田地表径流氮磷流失特征 [J]. 农业资源与环境学报,2018,35(6):550-558.
Liu F Y, Xia Y, Huang M, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses from farmlands through surface runoff under different cropping patterns in the Three Gorges Reservoir area of Hubei Province [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(6): 550-558.
- [10] 冯厚平,阳显斌,陈代荣,等. 有机肥对烤烟生长及烟叶品质和效益的影响 [J]. 山西农业科学,2017,45(7):1208-1210.
Feng H P, Yang X B, Chen D R, et al. Effect of organic fertilizer on growth and quality and benefit of flue-cured tobacco [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(7): 1208-1210.
- [11] 尚念杰,张玉涛. 有机厩肥不同施用量调控中等肥力土壤烤烟生产研究 [J]. 耕作与栽培,2018,224(4):10-13.
Shang N J, Zhang Y T. Regulation of organic manure on flue-cured tobacco production in medium fertility soil [J]. Cultivation and Cultivation, 2018, 224(4): 10-13.
- [12] 王 瑞,刘继忠. 禄丰县高原特色农业发展浅析 [J]. 云南农业,2016(11):12-14.
Wang R, Liu J Z. Brief analysis on plateau characteristic agriculture development in Lufeng County [J]. Yunnan Agriculture, 2016(11): 12-14.
- [13] Kleinman P J A, Wolf A M, Sharpley A N, et al. Survey of water-extractable phosphorus in livestock manures [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(3): 701-708.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis methods [M]. 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [15] 鲍士丹. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Bao S D. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd edition. Beijing: China agricultural press, 2005.
- [16] 国家环境保护总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. GB 3838—2002 Environmental quality standard for surface water [S]. Beijing: China Environment Science Press, 2002.
- [17] 宋娅丽,王克勤,董 莉,等. 滇中烤烟坡耕地地表径流氮素的动态变化特征 [J]. 水土保持学报,2010,24(4):7-11.
Song Y L, Wang K Q, Dong L, et al. Dynamic changes feature of nitrogen exports via overland runoff in sloping filed in the middle regions of Yunnan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 7-11.
- [18] 潘忠成,袁 溪,李 敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响 [J]. 水土保持学报,2016,30(1):9-13.
Pan Z C, Yuan X, Li M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil nitrogen loss [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 9-13.
- [19] 鲁 耀,胡万里,雷宝坤,等. 云南坡耕地红壤地表径流氮磷流失特征定位监测 [J]. 农业环境科学学报,2012,31(8):1544-1553.
Lu Y, Hu W L, Lei B K, et al. The monitoring of nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in sloping red soil fields of Yunnan Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(8): 1544-1553.
- [20] 黄东风,王 果,李卫华,等. 不同施肥模式对小白菜生长、营养累积及菜地氮、磷流失的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 619-624.
Huang D F, Wang G, Li W H, et al. Effect of fertilization mode on growth and nutrition accumulation in vegetables, and loss of nitrogen and phosphorus in vegetable fields [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(4): 619-624.
- [21] 陈秋会,席运官,王 磊,等. 太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1550-1558.
Chen Q H, Xi Y G, Wang L, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses in organic and conventional rice-wheat rotation farmland in Taihu Lake Region [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(8): 1550-1558.
- [22] 华元刚,潘长兵,贝美容,等. 橡胶园砖红壤中磷和钾素径流流失特征研究 [J]. 热带作物学报,2012,33(9):1540-1547.
Hua Y G, Pan C B, Bei M R, et al. Studies on the phosphorus and potassium loss on rubber plantation soil [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(9): 1540-1547.
- [23] 乔闪闪,吴 磊,彭梦玲. 人工模拟降雨条件下黄土坡面水沙-氮磷流失特征 [J]. 环境科学研究,2018,31(10):84-91.
Qian S S, Wu L, Peng M L. Simulation of runoff sediment nitrogen and phosphorus loss on bare loess sloping land by simulated rainfall [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(10): 1728-1735.
- [24] 王 甜,黄志霖,曾立雄,等. 三峡库区退耕还林土壤侵蚀及养分流失控制:以兰陵溪小流域为例 [J]. 水土保持研究,2018,130(5):93-98.
Wang T, Huang Z L, Zeng L X, et al. Assessment on the comprehensive control of soil erosion and soil nutrient losses in the reforestation patterns along the Three Gorges Reservoir

area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 130 (5): 93-98.

[25] 王全九, 赵光旭, 刘艳丽, 等. 植被类型对黄土坡地产生沙及氮磷流失的影响 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 195-201.

Wang Q J, Zhao G X, Liu Y L, et al. Effects of vegetation types on yield of surface runoff and sediment, loss of nitrogen and phosphorus along loess slope land [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (14): 195-201.

[26] 闫建梅, 何丙辉, 田太强. 不同施肥与耕作对紫色土坡耕地土壤侵蚀及氮素流失的影响 [J]. 中国农业科学, 2014, 47(20): 4027-4035.

Yan J M, He B H, Tian T Q. Effect of fertilizer levels and tillage methods on soil erosion and nutrient loss in purple soil area [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(20): 4027-4035.

(上接第 105 页)

[19] Pavlidis N, Khalighi M, Myridakis A, et al. A glutathione-S-transferase (*TuGSTd05*) associated with acaricide resistance in *Tetranychus urticae* directly metabolizes the complex II inhibitor cyflumetofen [J]. Insect Biochemistry and Molecular Biology, 2017, 80: 101-115.

[20] Zhou W W, Liang Q M, Xu Y, et al. Genomic insights into the glutathione S-transferase gene family of two rice planthoppers, *Nilaparvata lugens* (Stål) and *Sogatella furcifera* (Horváth) (Hemiptera: Delphacidae) [J]. PLoS One, 2013, 8 (2): e56604.

[21] Enayati A A, Ranson H, Hemingway J. Insect glutathione transferases and insecticide resistance [J]. Insect Molecular Biology, 2005, 14(1): 3-8.

[22] Roncalli V, Cieslak M C, Passamaneck Y, et al. Glutathione S-transferase (GST) gene diversity in the crustacean *Calanus finmarchicus*-contributors to cellular detoxification [J]. PLoS One, 2015, 10(5): e0123322.

[23] Nebert D W, Vasiliou V. Analysis of the glutathione S-transferase (GST) gene family [J]. Human Genomics, 2004, 1(6): 460. [2019-06-12]. <https://doi.org/10.1186/1479-7364-1-6-460>.

[24] Shi H, Pei L, Gu S, et al. Glutathione S-transferase (GST) genes in the red flour beetle, *Tribolium castaneum*, and comparative analysis with five additional insects [J]. Genomics, 2012, 100(5): 327-335.

[25] Hu F, Ye K, Tu X F, et al. Identification and expression profiles of twenty-six glutathione S-transferase genes from rice weevil, *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 1063-1071.

[26] Sookrung N, Reamtong O, Poolphol R, et al. Glutathione S-transferase (GST) of american cockroach, *Periplaneta americana*: classes, isoforms, and allergenicity [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 484. [2018-01-11]. <https://doi.org/10.1038/S41598-017-18759-z>.

[27] Armstrong R N. Glutathione S-transferases: reaction mechanism, structure, and function [J]. Chemical Research in Toxicology, 1991, 4(2): 131-140.