

不同用量猪粪对红壤花生坡地水土流失和磷素流失的影响

杨奕如^{1,2}, 周志高¹, 王兴祥^{1,3}

(1. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院红壤生态实验站, 江西 鹰潭 335211)

摘要: 通过田间径流微区定位试验, 以中亚热带3种典型母质(花岗岩、红砂岩、红黏土)发育红壤花生坡地为研究对象, 以当地常规化肥用量处理为对照, 连续3年研究了在常规化肥用量减半条件下配施6个不同用量腐熟猪粪(猪粪含有0, 0.5, 1, 2, 4, 8倍的对照处理磷用量)对红壤花生坡地水土流失和磷素流失的影响, 以期典型红壤地区合理施用猪粪提供科学依据。结果表明: 化肥减半配施猪粪处理能有效降低红壤坡地的产流产沙, 但随着猪粪用量的增加, 径流水和泥沙磷含量均呈线性增加, 环境风险增大。径流量和泥沙量均为花岗岩红壤>红砂岩红壤>红黏土红壤。配施3 500 kg/(hm²·a)猪粪, 花岗岩红壤的径流量减少了28.0%、泥沙量减少了6.3%, 红砂岩红壤的径流量减少了23.2%、泥沙量减少了37.1%; 而配施7 000 kg/(hm²·a)猪粪, 红黏土红壤的径流量减少了40.7%, 泥沙量减少了12.8%。当花岗岩红壤、红砂岩红壤、红黏土红壤的猪粪用量分别达到14 000, 28 000, 28 000 kg/(hm²·a)时, 径流水总磷平均含量超过地表水环境质量标准V类限值。径流水总磷含量为花岗岩红壤>红黏土红壤>红砂岩红壤, 而泥沙总磷含量则为红黏土红壤>花岗岩红壤>红砂岩红壤。在减半化肥用量条件下花岗岩红壤和红砂岩红壤配施与常规化肥处理等磷量[P含量40 kg/(hm²·a)]的猪粪, 红黏土红壤配施2倍常规化肥处理磷含量[P含量80 kg/(hm²·a)]的猪粪, 可有效减少水土流失, 且3年内不会增加磷素流失风险。

关键词: 猪粪; 红壤; 水土流失; 磷素流失; 母质

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0072-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.05.012

Effects of Different Amounts of Pig Manure on Water and Soil Erosion and Phosphorus Loss of Peanut-grown Sloping Lands in Red Soils

YANG Yiru^{1,2}, ZHOU Zhigao¹, WANG Xingxiang^{1,3}

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. Ecological Experimental Station of Red Soil, Chinese Academy of Sciences, Yingtan, Jiangxi 335211)

Abstract: In order to provide scientific basis for rational application of pig manure as an organic fertilizer in typical red soil sloping lands, a field runoff micro location test in peanut-grown red soils that developed from three typical parent materials (granite, red sandstone and red clay) was conducted for three consecutive years to monitor the effects of different pig manure amounts on water and soil loss and phosphorus loss in red soils in mid-subtropical region of China. The treatments included six application rates of pig manure (phosphorus content was 0, 0.5, 1, 2, 4 and 8 times that of the control) that combined with half amount of local conventional chemical fertilizers, and the application of conventional chemical fertilizers alone was taken as the control. The results showed that runoff and sediment were obviously reduced by the application of pig manure, but the phosphorus content in runoff and sediment increased linearly with the increasing of pig manure application rate, and this suggested a growing environmental risk. Runoff and sediment volume of the three red soils listed in the order of granite > red sandstone > red clay. When the pig manure application rate was 3 500 kg/(hm²·a), runoff and sediment reduced by 28.0% and 6.3%, respectively, in the red soil developed from granite, and the above two parameters reduced by 23.2% and 37.1%, respectively, in the red soil developed from red sandstone. When the pig manure application rate was 7 000 kg/(hm²·a), runoff and sediment reduced by 40.7% and 12.8% respectively in the red soil developed from red clay. When the pig ma-

收稿日期: 2017-04-01

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203050); 中国科学院知识创新项目(ISSASIP1632); 江西省赣鄱英才555工程专项

第一作者: 杨奕如(1984—), 女, 博士研究生, 主要从事农业生态环境方面的研究。E-mail: yryang@issas.ac.cn

通信作者: 王兴祥(1967—), 男, 博士, 研究员, 主要从事红壤退化机制与防治技术、农产品产地土壤环境研究。E-mail: xxwang@issas.ac.cn

nure application rates were 14 000, 28 000 and 28 000 kg/(hm² · a) for red soils from granite, red sandstone and red clay, respectively, the average total phosphorus content in runoff exceeded the standard value of Environmental Quality Standards for Surface Water of Class V. Total phosphorus content in runoff of the three kinds of red soil listed in the order of granite > red clay > red sandstone, and total phosphorus content in sediment of the three red soils listed in the order of red clay > granite > red sandstone. Under the condition of halving the conventional amount of chemical fertilizer, applying pig manure at the rate of 40 kg P/(hm² · a) for soils developed from granite and red sandstone, and at the rate of 80 kg P/(hm² · a) for the soil developed from red clay, could effectively reduce water and soil loss without increasing the risk of phosphorus loss over 3 years.

Keywords: pig manure; red soil; soil erosion; phosphorus loss; parent materials

我国南方红壤丘陵区地形起伏大,雨量多而集中,红壤旱坡地水土流失十分严重^[1-3]。土壤养分随水土一起流失,不仅降低土地肥力,而且面源污染物输入河流、湖泊、水库等,增加了水环境污染的风险^[4]。南方红壤区也是我国重要的生猪生产基地,随着规模化养猪业快速发展,与之伴生的大量粪污所引起的环境问题也日益严重^[5]。猪粪还田利用是消纳猪粪的一条重要途径,已有研究大多关注猪粪施用对土壤养分、土壤团聚结构、土壤生化性状以及土壤污染物积累的影响^[6-10],猪粪施用对土壤水土及养分流失的影响效应还不明确。有研究显示,化肥、有机肥配施能够减少水土流失,但如果有机肥配施比例过高,反而会增加养分流失。王利民等^[11]和李喜喜等^[12]的研究表明,化肥减半配施 50% 有机肥处理的径流磷素流失量增加。张玉平等^[13]研究表明有机肥替代 20% 氮肥,可减少旱地氮磷流失,但配施过高用量猪粪可增加磷素流失风险。郭智等^[14]研究表明有机肥替代 50% 氮肥可减少径流氮磷流失量,全量替代氮肥导致总磷流失量极显著增加。可见,与化肥配施的有机肥用量是影响土壤养分流失特别是磷素流失的重要因素。猪粪是南方红壤区量多质优的有机肥资源,配施猪粪对改良旱坡地土壤和保证作物稳产增产具有重要的现实意义,而猪粪的配施用量与磷素流失的关系需要深入全面的研究,为此本文以中亚热带 3 种典型母质发育的红壤坡地为研究对象,于 2013—2016 年在中国科学院红壤生态实验站布置田间径流微区定位试验,研究了在常规化肥用量减半条件下配施不同用量猪粪对红壤花生坡地径流、泥沙以及磷素流失的影响,以期对红壤坡地合理施用猪粪提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验布设于江西省鹰潭市余江县中国科学院红壤生态实验站(116°55'30" E,28°15'20" N),该地属典型的亚热带季风气候,全年湿润温热,干湿分明。试验从

2013 年 4 月开始连续观测 3 年,试验第 1 年、第 2 年和第 3 年的总降雨量分别为 1 674.6,1 691.4,2 064.4 mm,每年 4—6 月降雨量大,占年降雨量的 43.7%~54.0%,与历史年平均降雨特征基本一致。试验期间观测记录到有坡面产流的降雨事件共计 37 次。

1.2 试验设计

2012 年底建设完成径流小区(2.5 m 长×0.8 m 宽×0.55 m 深),为防止各小区间发生水分和养分交换,小区间用水泥板隔开。供试花岗岩发育红壤(铝质湿润锥形土)采自江西省赣州市兴国县,红砂岩发育红壤(铝质湿润淋溶土)和红黏土发育红壤(黏化湿润富铁土)采集于鹰潭市余江县,按照 0—15,15—55 cm 土层分别采集,将土壤分层填入建好的小区内,自然沉实 4 个月。根据研究区坡耕地坡度分布特点,设置小区坡度为 8°,坡向为正北方向。土壤理化性质见表 1。小区坡底布设集流“U”形槽装置,槽底部中间设计径流溢流孔($\varphi=5$ cm)为径流出水口,连接管道通向观测室内的径流收集桶,径流桶容积 150 L,下管口由里到外分别套上孔径 200 目和 600 目过滤袋收集每次降雨事件后的泥沙。

表 1 供试土壤基本理化性质

指标	花岗岩红壤	红砂岩红壤	红黏土红壤
pH	5.44	4.76	4.90
有机碳/(g · kg ⁻¹)	3.92	2.82	5.16
碱解氮/(mg · kg ⁻¹)	58.48	48.50	59.50
全氮/(g · kg ⁻¹)	0.41	0.30	0.50
有效磷/(mg · kg ⁻¹)	20.40	5.82	28.34
全磷/(g · kg ⁻¹)	0.28	0.11	0.40
速效钾/(mg · kg ⁻¹)	106.17	105.00	262.50
全钾/(g · kg ⁻¹)	3.55	3.10	10.63
石砾(>2 mm)/%	30.38	0.00	0.00
砂粒(2~0.02 mm)/%	51.22	76.68	33.40
粉粒(0.02~0.002 mm)/%	11.61	7.88	20.68
黏粒(<0.002 mm)/%	6.79	15.44	45.92

1.3 试验处理

当地农民常规施肥方式为化肥单施,其中尿素(N 46.4%)225 kg/hm²、钙镁磷肥(P₂O₅ 12%)750 kg/hm² 和氯化钾(K₂O 60%)225 kg/hm²。在常规化肥用量减半条件下,以常规化肥磷用量为基数设置

6 个猪粪用量梯度处理(P0~P5),具体施肥方案见表 2。常规化肥用量处理为对照(CK)。共计 7 个处理,每个处理设置 3 个重复,3 种红壤,共计 63 个试验小区,随机排列。试验从 2013 年 4 月开始连续布置 3 年,猪粪均采自附近同一猪场,堆腐 3 个月后施用,含水量约为 60%,猪粪 NPK 全量平均值分别为 22.7, 11.4, 18.8 g/kg(干样)。花生播种前,化肥和猪粪作

基肥一起撒施,翻耕深度 0—15 cm,然后起垄播种花生。花生播种时间为 2013 年 4 月 15 日、2014 年 4 月 7 日和 2015 年 4 月 14 日。供试花生品种也为当地主栽品种赣花 5 号,横坡垄作共 5 行,每行 4 穴,每穴 2 株(行距 45 cm×株距 17 cm)。除人工除草以外,其他管理措施与当地栽培习惯一致,每年 8 月 10 日左右收获,其他月份农闲休耕。

表 2 不同处理的施肥方案

单位:kg/(hm²·a)

处理		化肥			猪粪
		尿素	钙镁磷肥	氯化钾	
常规化肥	CK	225.0	750(含 P 40)	225.0	0
常规化肥减半	P0	112.5	375(含 P 20)	112.5	0
常规化肥减半配施低用量猪粪	P1	112.5	375(含 P 20)	112.5	1750(含 P 20)
	P2	112.5	375(含 P 20)	112.5	3500(含 P 40)
常规化肥减半配施高用量猪粪	P3	112.5	375(含 P 20)	112.5	7000(含 P 80)
	P4	112.5	375(含 P 20)	112.5	14000(含 P 160)
	P5	112.5	375(含 P 20)	112.5	28000(含 P 320)

注:尿素(含 N 46.4%),钙镁磷肥(含 P₂O₅ 12%),氯化钾(含 K₂O 60%);猪粪用量为干重,NPK 全量平均值分别为 22.7, 11.4, 18.8 g/kg(干样)。

1.4 样品采集与分析

径流观测周期为每降一场有产流降雨则观测 1 次,若遇到连续数天降雨,作为一次降雨事件统计。降雨产流结束后,测量计算径流小区径流量,充分搅匀桶中水体,多点采集径流水样 250 mL,取 50 mL 采用烘干法测定泥水混合样中的泥沙含量,并收集过滤袋和“U”形槽中泥沙样品,风干称重,计算整个小区的泥沙量。径流水样用滤膜(0.45 μm)抽滤,总磷含量采用过硫酸钾消解—钼锑抗比色法测定。泥沙磨细过 100 目筛,总磷含量采用氢氟酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法测定。

1.5 数据处理和统计分析

减流率(η_q)和减沙率(η_w)计算根据 GB/T15774—2008《水土保持综合治理效益计算方法》,即 $\eta_q = (Q_0 - Q_s)/Q_0 \times 100\%$, $\eta_w = (W_0 - W_s)/W_0 \times 100\%$ 。式中: Q_0 、 Q_s 分别为对照小区和施用猪粪处理小区坡面的径流量(mm); W_0 、 W_s 分别为对照小区和施用猪粪处理小区坡面的流失泥沙量(g)^[15]。

地表径流水磷素流失计算公式为 $P = \sum_{i=1}^n Q_i C_i / 100A$ 。式中: P 为单位面积年径流水总磷流失量(kg/hm²); C_i 为次降雨径流水总磷含量(mg/L); Q_i 为次径流体积(L); A 为径流小区面积(m²)。径流泥沙磷素流失计算公式为 $S = \sum_{i=1}^n W_i D_i / 100000A$ 。式中: S 为单位面积年径流泥沙总磷流失量(kg/hm²); D_i 为次降雨泥沙总磷含量(mg/kg); W_i 为降雨冲刷泥沙量(g); A 为径流小区面积(m²)^[16]。

采用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析,各处理间的差异显著性使用 Duncan 法进行检验(显著性水平 0.05)。基础运算和图表绘制采用 Excel 2007 和 SigmaPlot 11.0 进行。

2 结果与分析

2.1 不同用量猪粪配施对花生坡地水土流失的影响

2.1.1 地表径流量 以 3 种母质红壤的对照处理(CK)和最高用量猪粪处理(P5)为例描述径流量变化动态(图 1)。各处理的年际径流量呈现一定的差异,总体上为第 3 年>第 1 年>第 2 年,这与降雨量和降雨强度的年际变化有关。试验前 2 年的总降雨量相当,但第 2 年大雨(25~50 mm/d)和暴雨(50~100 mm/d)降雨量占总降雨量的比例分别比第 1 年低 7.0%和 5.1%,故总径流量比第 1 年低。第 3 年总降雨量比第 2 年增加 22.05%,故总径流量与第 2 年相比明显增加。对照处理(CK)花岗岩、红砂岩和红黏土红壤的径流量与降雨量显著正相关($R=0.546$, $p<0.001$; $R=0.534$, $p<0.001$; $R=0.373$, $p<0.05$),径流量峰值主要出现在每年 5—6 月;而配施猪粪起到减流作用,其径流量与降雨量无明显相关关系。在花生的发芽出苗期(播种后 15 d 内)、苗期(播种后 15~35 d)和开花下针初期(播种后 35~45 d),每种红壤各处理径流量的差异不显著。在开花下针后期(播种后 45~65 d)、结荚期(播种后 65~95 d)和成熟期(播种后 95~120 d),各处理间径流量的差异显著,配施低用量猪粪显著减少了径流量。在休耕期,第 1 年每种红壤各处理间径流量无显著差异,但第 2

年和第 3 年各处理间有显著差异,配施猪粪处理的减流效果增强。

3 年试验期间,与对照处理(CK)相比,除红黏土红壤的 P1 处理年均径流量略有增加外(无显著差异),配施不同用量猪粪均有削减径流的作用,其中花岗岩、红砂岩和红黏土红壤配施 3 500~28 000 kg/(hm²·a)猪粪(P2~P5)径流削减幅度分别为 28.0%~53.2%,23.2%~56.8%,18.6%~50.3%。化肥减半不施猪粪处理(P0)年均径流量有增加趋势,其中花岗岩和红黏土红壤与对照差异显著(表 3)。

不同母质红壤径流量有所差异,花岗岩和红砂岩红壤径流量较大,而红黏土红壤径流量较小,这表明不同质地土壤对径流冲刷流失敏感度不同。

2.1.2 泥沙量 以 3 种母质红壤的对照处理(CK)和最高用量猪粪处理(P5)为例描述泥沙量变化动态(图 2)。各处理的年际泥沙量存在一定的差异,第 1 年泥沙量明显比第 2 年、第 3 年大,这也与降雨量和降雨强度的年际变化有关。第 1 年大雨和暴雨降雨量占比相对较大,对泥沙的冲击相对较强;第 2 年降雨强度相对较小,泥沙侵蚀明显降低,花岗岩、红砂岩和红黏土红壤不同处理总泥沙量分别为第 1 年的 43.5%~60.9%,30.7%~41.1%,44.2%~53.7%;第 3 年雨量较大但雨强较小,除红黏土红壤总泥沙量比第 2 年有明显增幅,花岗岩和红砂岩红壤基本与第 2 年相当。在花生的发芽出苗期和苗期,每种红壤各处理的泥沙量差异不显著。在花生开花下针期和结荚期,花岗岩和红砂岩红壤各处理间的泥沙量差异显著,配施低用量猪粪显著地减少了泥沙量;红黏土红壤的泥沙量较小,各处理差异不显著。休耕期泥沙冲刷较少,处理间差异不显著。泥沙量变化基本与降雨量一致,但在花生开花下针期和结荚期,由于植株长势较好,出现降雨量大而泥沙量却不大的现象。

3 年试验期间,花岗岩、红砂岩和红黏土红壤随猪粪施用量增加(P1~P5)泥沙量明显减少,与对照处理(CK)相比,泥沙量分别减少 5.3%~32.1%,17.3%~52.9%,3.2%~20.8%。化肥减半不施猪粪处理(P0)年均泥沙

量有增加趋势,其中花岗岩红壤与对照差异显著(表 4)。不同母质红壤间泥沙量呈现差异,表现为花岗岩红壤>红砂岩红壤>红黏土红壤。

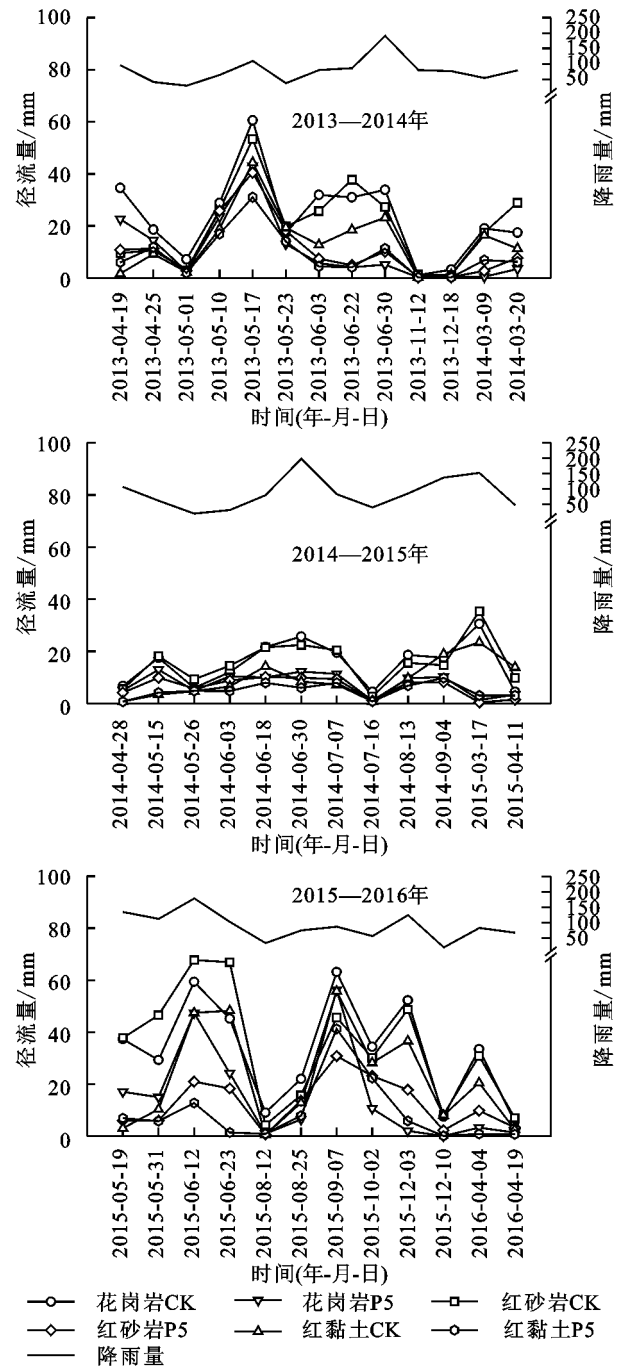


图 1 红壤坡地径流量变化动态(2013—2016 年)

表 3 不同用量猪粪处理下红壤坡地年均径流量(2013—2016 年)

处理	花岗岩红壤		红砂岩红壤		红黏土红壤	
	年均径流量/mm	减流率/%	年均径流量/mm	减流率/%	年均径流量/mm	减流率/%
CK	296±9dB	—	287±17efB	—	188±16cA	—
P0	328±24eC	—	293±1fB	—	218±17dA	—
P1	234±5cB	20.8	271±3eC	5.5	196±8cdA	—
P2	213±18cB	28.0	221±10dB	23.2	153±11bA	18.6
P3	209±10cB	29.3	184±16cB	35.8	112±11aA	40.7
P4	172±11bB	41.8	155±1bB	46.0	106±18aA	43.7
P5	138±10aB	53.2	124±17aB	56.8	94±7aA	50.3

注:表中同列数据后不同小写字母表示同一母质处理间差异显著($p<0.05$);同行数据后不同大写字母表示相同处理母质间差异显著($p<0.05$)。下同。

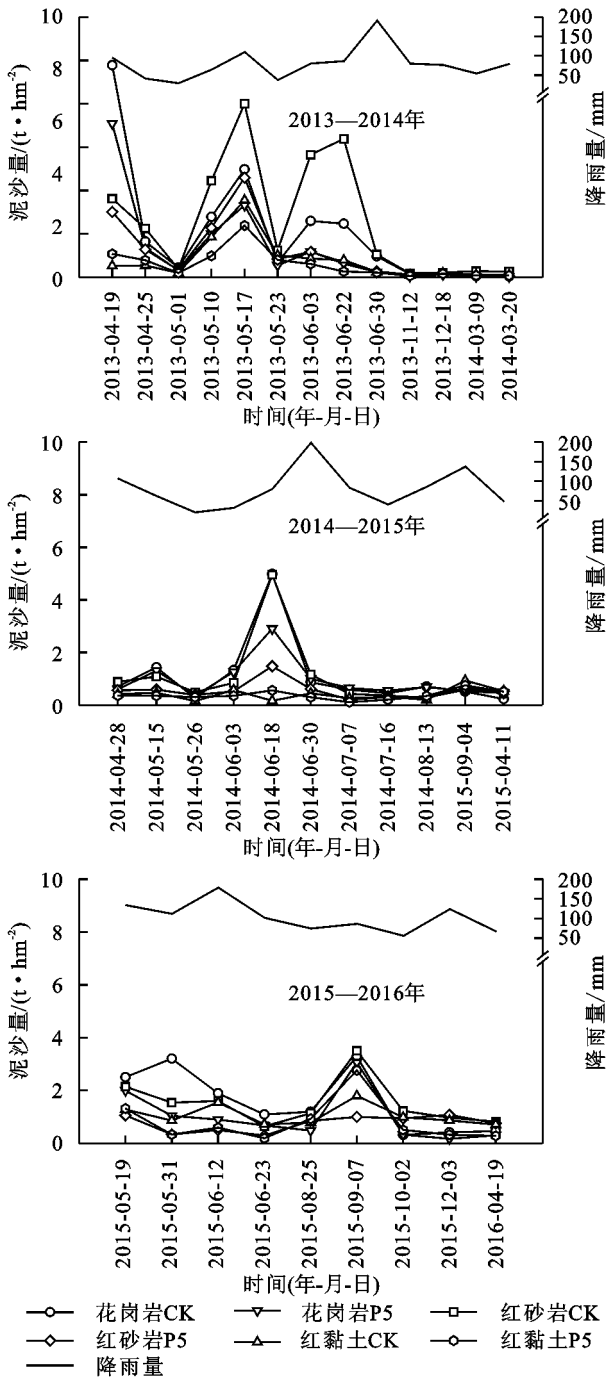


图2 红壤坡地泥沙量变化动态(2013—2016年)

2.2 不同用量猪粪配施对径流磷含量的影响

2.2.1 径流水中总磷含量 以3种母质红壤的对照处理(CK)和最高用量猪粪处理(P5)为例描述径流总

磷含量变化动态(图3)。径流总磷含量与施肥后首次降雨时间有关,2013年施肥后5 d内随即发生较强降雨(2013年4月19日),花岗岩、红砂岩和红黏土红壤配施最高用量猪粪处理的径流总磷含量高达7.05,5.25,5.71 mg/L。如施肥后较长一段时间才发生首次降雨,径流总磷含量不超过2 mg/L,明显低于施肥后随即发生降雨的情况(如2014年4月28日、2015年5月19日),但仍处于较高水平。随着花生生育期的延长,径流总磷含量呈现逐渐下降的趋势。较长一段时间无降雨之后再次降雨(如2013年11月12日、2015年3月17日、2015年8月12日、2015年12月3日、2016年4月4日),配施猪粪处理所产生的径流总磷含量也相对较高。对照处理2013年11月12日和12月18日径流总磷含量较高,除此之外均不超过0.5 mg/L,处于较低水平。

3年试验期间,花岗岩、红砂岩和红黏土红壤的径流总磷平均含量与猪粪施用量均呈线性相关($R=0.989, p<0.001; R=0.990, p<0.001; R=0.992, p<0.001$)。化肥减半不施猪粪处理(P0)径流总磷平均含量与对照无显著差异。配施高用量猪粪处理(P3~P5)径流总磷含量较对照处理显著升高约2~15倍。花岗岩、红砂岩、红黏土红壤猪粪用量分别达到P4、P5、P5时,径流总磷平均含量超过地表水环境质量标准(GB 3838—2002)V类限值0.4 mg/L(表5)。不同母质红壤径流总磷含量总体表现为花岗岩红壤>红黏土红壤>红砂岩红壤。

2.2.2 径流泥沙中总磷含量 以3种母质红壤的对照处理(CK)和最高用量猪粪处理(P5)为例描述径流泥沙总磷含量变化动态(图4)。径流泥沙总磷含量与施肥后首次降雨时间有关,2013年施肥后5 d内发生较强降雨,泥沙携带的猪粪流失较大,花岗岩、红砂岩和红黏土红壤配施最高用量猪粪处理径流泥沙总磷含量分别高达2 191,1 218,1 221 mg/kg。随着花生生育期的延长,径流泥沙总磷含量逐渐下降,施肥约半个月后维持在一定水平。与之对比,2014年施肥后较长一段时间才发生首次有效降雨(2014年4月28日),径流泥沙总磷含量没有显著升高。试验期间对照处理(CK)泥沙总磷含量始终处于低水平范围。

表4 不同用量猪粪处理下红壤坡地年均泥沙量(2013—2016年)

处理	花岗岩红壤		红砂岩红壤		红黏土红壤	
	年均泥沙量/ (t·hm ⁻²)	减沙率/%	年均泥沙量/ (t·hm ⁻²)	减沙率/%	年均泥沙量/ (t·hm ⁻²)	减沙率/%
CK	17.7±0.1dB	—	19.7±0.1fC	—	8.0±0.3dA	—
P0	20.6±1.0eB	—	19.8±0.3fB	—	8.3±0.4dA	—
P1	16.8±0.4cB	5.3	16.3±0.4eB	17.3	7.8±0.3cdA	3.2
P2	16.6±0.5cC	6.3	12.4±0.2dB	37.1	7.1±0.3bcA	11.0
P3	16.2±0.4cC	8.4	11.3±0.2cB	42.8	7.0±0.5abA	12.8
P4	13.4±0.3bC	24.2	10.1±0.4bB	48.9	6.7±0.2abA	16.9
P5	12.0±0.6aC	32.1	9.3±0.3aB	52.9	6.4±0.5aA	20.8

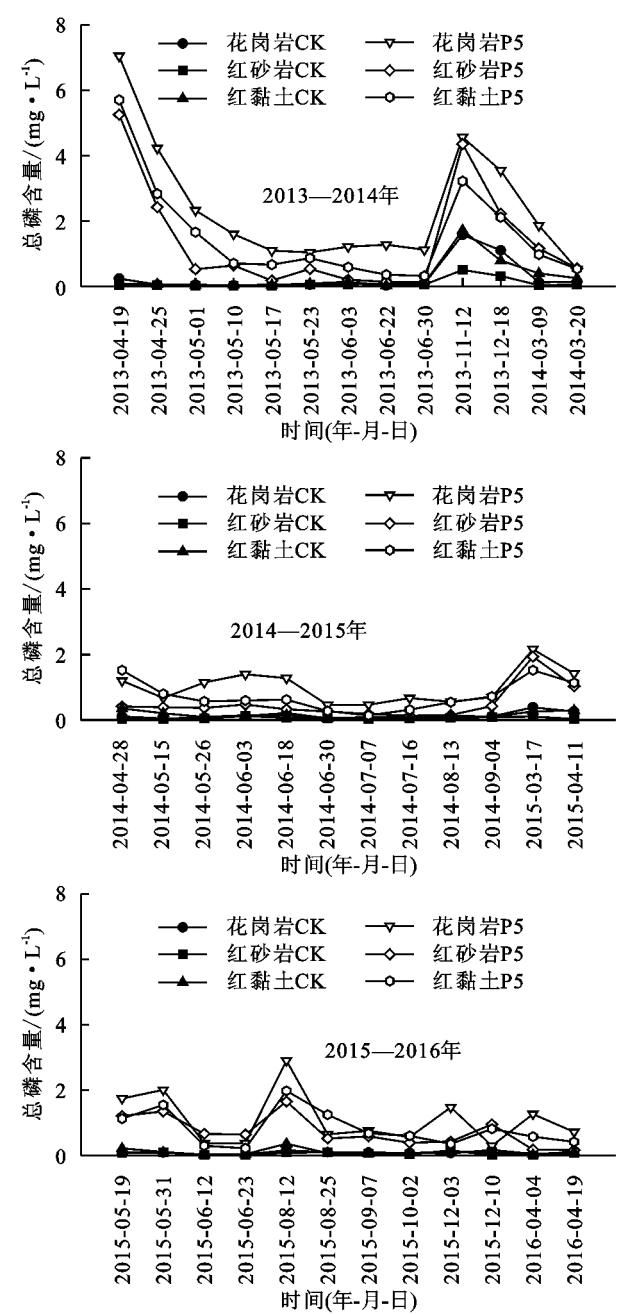


图 3 红壤坡地径流总磷含量变化动态(2013—2016 年)

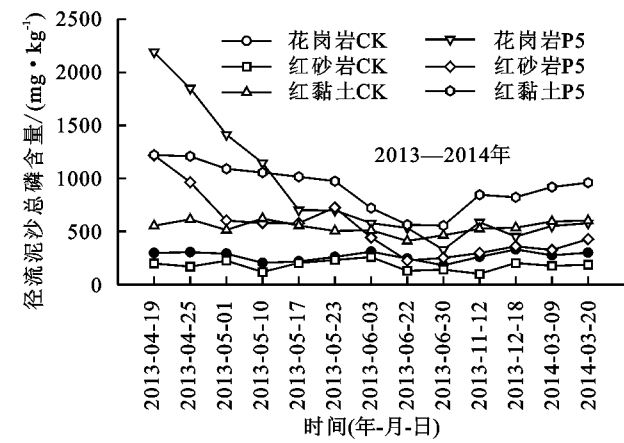


图 4 红壤坡地径流泥沙总磷含量变化动态(2013—2015 年)

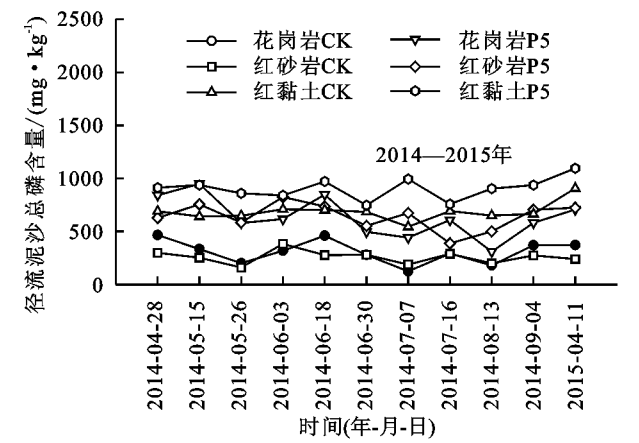
化肥减半不施猪粪处理(P0)和配施低用量猪粪处理(P1~P2)径流及泥沙总磷年均流失负荷与对照

2013—2015 年间,花岗岩、红砂岩和红黏土红壤的径流泥沙总磷平均含量与猪粪施用量均呈线性相关($R=0.991, p<0.001$; $R=0.999, p<0.001$; $R=0.997, p<0.001$)。化肥减半不施猪粪处理(P0)径流泥沙总磷平均含量与对照无显著差异。配施高用量猪粪处理(P3~P5)径流泥沙总磷含量较对照处理升高约 1.1~4.9 倍(表 6)。不同母质红壤径流泥沙总磷含量总体表现为红黏土红壤>花岗岩红壤>红砂岩红壤。

2.3 不同用量猪粪配施对地表径流和泥沙磷素流失的影响

以 3 种母质红壤的对照处理(CK)和最高用量猪粪处理(P5)为例描述径流和泥沙总磷流失量变化动态(图 5,图 6)。试验期间 3 种红壤对照处理(CK)的径流水磷素流失量变化不大,均处于较低水平。配施猪粪处理的磷素流失量变化较大,花生发芽出苗期、苗期和开花下针初期的磷素流失量较高,该时期花岗岩、红砂岩和红黏土红壤的径流磷素流失量分别占径流水磷素流失总量的 72.4%,59.7%,58.9%,泥沙磷素流失量分别占泥沙磷素流失总量的 82.4%,75.6%,68.5%。花生结荚期、成熟期及休耕期总体上磷素流失量不高。

表 5 不同用量猪粪处理下径流总磷 平均含量(2013—2016 年) 单位:mg/L			
处理	花岗岩红壤	红砂岩红壤	红黏土红壤
CK	0.10±0.01aB	0.06±0.01aA	0.09±0.01aB
P0	0.08±0.01aA	0.06±0.02aA	0.08±0.01aA
P1	0.13±0.01aC	0.07±0.01aA	0.10±0.01aB
P2	0.20±0.02bC	0.09±0.01aA	0.13±0.02aB
P3	0.25±0.04bB	0.12±0.02aA	0.21±0.04aB
P4	0.58±0.04cB	0.31±0.03bA	0.38±0.08bA
P5	1.39±0.09dB	0.66±0.11cA	0.88±0.20cA



无显著差异,但随着猪粪用量增加,径流及泥沙总磷年均流失负荷明显增加(表 7),其中花岗岩红壤的磷

流失风险最大。与对照相比,花岗岩、红砂岩和红黏土红壤径流泥沙总磷流失量分别在 P4、P5 和 P5 处理时显著增加,而径流总磷流失量分别在 P3、P3 和 P5 处理时显著增加,花岗岩、红砂岩和红黏土红壤的径流总磷流失量与猪粪施用量呈线性正相关($R=0.990, p<0.001$; $R=0.989, p<0.001$; $R=0.972, p<0.01$)。3 种红壤磷流失总量均在 P4 处理时显著增加。总体上,配施低用量猪粪的径流和泥沙总磷流失量与对照基本持平,花岗岩红壤 P2 处理、红砂岩红壤 P2 处理和红黏土红壤 P3 处理均未增加磷素流失风险。

表 6 不同用量猪粪处理下径流泥沙总磷

平均含量(2013—2015 年) 单位: g/kg

	花岗岩红壤	红砂岩红壤	红黏土红壤
CK	0.30±0.03aB	0.20±0.01aA	0.60±0.01aC
P0	0.26±0.00aB	0.18±0.01aA	0.58±0.01aC
P1	0.32±0.03aB	0.21±0.02aA	0.63±0.05abC
P2	0.37±0.07aB	0.24±0.01bA	0.64±0.01abC
P3	0.40±0.03aB	0.31±0.05cA	0.67±0.06bC
P4	0.63±0.04bB	0.45±0.04dA	0.79±0.06cC
P5	1.18±0.18cB	0.69±0.05eA	0.98±0.01dB

3 讨论

3.1 不同用量猪粪配施对水土流失和磷素流失的影响

配施不同用量猪粪均有显著削减径流的作用,这主要是因为施用猪粪可以有效提高土壤养分含量,更好地促进花生植株的生长,增加了叶面覆盖,起到了截留降雨和削弱雨滴动能的作用,从而较好地降低了雨滴对地表的溅蚀效应。同时,配施猪粪可以增加土壤持水能力^[17],改善土壤物理性质,有利于减少水土流失。与对照相比,每年 6—8 月花生开花下针期、结荚期和成熟期,配施猪粪处理减流减沙效果最明显,朱巧红等^[18]田间试验也有相似的结果,而发芽出苗期、苗期、开花下针初期和休耕期减流减沙效果相对较小,可见叶片截留作用是猪粪配施处理径流量显著减少的主要原因。

施用猪粪处理的径流总磷含量和泥沙总磷含量随花生生育期呈现出不同的动态变化规律。刚施肥不久发生较强降雨,由于猪粪与土壤结合还不紧密,泥沙携带的猪粪流失较大,因此泥沙总磷含量非常高,同时水溶性磷迅速释放到径流中,这也使得花生生育初期径流水总磷含量很高,超过地表水环境质量标准 V 类限值 13 倍以上。如果施肥半个月之后发生降雨,猪粪已与土壤经过一段时间的沉实,结合相对较紧密,不易被冲刷,因此泥沙携带的养分流失不高,径流磷含量明显低于施肥后随即降雨的情况。随着降雨次数的增加,径流总磷含量逐渐下降,与前人在

不同利用类型坡地观测的径流磷含量变化特征基本一致^[19]。较长一段时间无降雨之后再次降雨,配施猪粪处理的径流总磷含量也出现峰值,可能是因为施用猪粪直接增加了土壤有效磷含量,同时也对活化土壤磷起到较大的作用^[20-21],而由于土壤总磷含量变化不大,泥沙总磷含量未见明显升高。

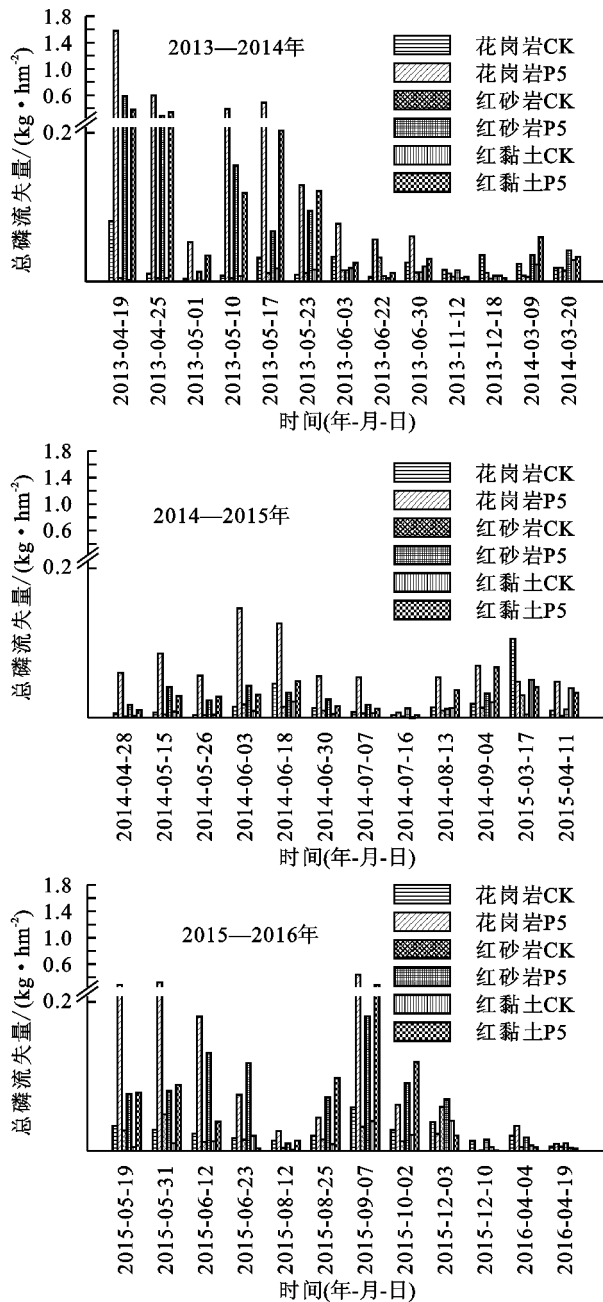


图 5 红壤坡地径流总磷流失量动态(2013—2016 年)

化肥减半配施低用量猪粪处理的磷素流失量没有明显增加,主要是因为低用量猪粪处理径流磷含量升高并不显著,而且坡面径流量和泥沙量有大幅度减少。配施高用量猪粪虽然大幅度地减少了径流和泥沙的流失量,但磷素在土壤中快速累积导致流失的泥沙含磷量很高,最终引起磷素流失负荷的显著增加。因此,减少化肥用量配施低用量猪粪,既能满足作物生长所需的养

分,又可以减少水土和磷素流失,但长期连续施用猪粪 还需加强土壤养分积累与面源污染的监测。

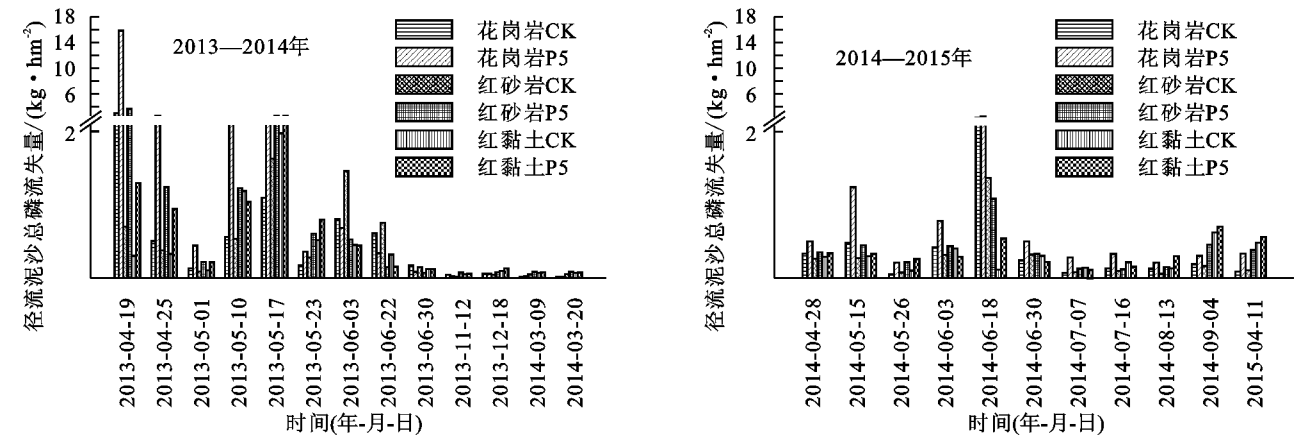


图 6 红壤坡地径流泥沙总磷流失量动态(2013—2015 年)

表 7 不同用量猪粪处理下红壤坡地径流和泥沙总磷年均流失量(2013—2015 年) 单位: kg/hm²

处理	径流总磷年均流失量			泥沙总磷年均流失量			磷流失总量		
	花岗岩红壤	红砂岩红壤	红黏土红壤	花岗岩红壤	红砂岩红壤	红黏土红壤	花岗岩红壤	红砂岩红壤	红黏土红壤
CK	0.27±0.05a	0.12±0.01a	0.17±0.05ab	5.75±0.50a	4.62±0.19bc	4.33±0.20ab	6.02±0.56aB	4.74±0.19bA	4.50±0.21aA
P0	0.23±0.06a	0.12±0.01a	0.14±0.01a	5.54±0.21a	4.17±0.27b	4.28±0.11a	5.78±0.15aB	4.30±0.27bA	4.42±0.11aA
P1	0.29±0.03a	0.14±0.03ab	0.15±0.04a	5.90±0.37a	4.00±0.27b	4.60±0.08ab	6.19±0.39aC	4.14±0.30bA	4.75±0.10aB
P2	0.40±0.06ab	0.16±0.02ab	0.15±0.03a	6.87±1.10a	3.33±0.10a	4.40±0.34ab	7.26±1.07aB	3.49±0.10aA	4.55±0.31aA
P3	0.50±0.16b	0.24±0.05b	0.19±0.03ab	7.21±0.56a	3.97±0.66b	4.48±0.48ab	7.70±0.71aB	4.21±0.66bA	4.67±0.51aA
P4	0.94±0.04c	0.52±0.10c	0.34±0.15b	9.51±0.48b	5.18±0.26c	4.96±0.14b	10.45±0.48bB	5.71±0.19cA	5.30±0.26bA
P5	2.13±0.13d	0.78±0.10d	0.85±0.20c	16.06±3.13c	7.30±0.41d	5.77±0.50c	18.20±3.24cB	8.08±0.48dA	6.63±0.37cA

3.2 不同母质红壤水土流失和磷素流失的差异

3 种母质红壤可蚀性差别大,花岗岩红壤石砾占比超过 30%,粗颗粒含量的比重高,土壤胶结能力差,抗侵蚀能力弱;红黏土红壤黏粒含量比重高,毛管孔隙多,对水的吸附力强,抗侵蚀能力较强;红砂岩红壤介于花岗岩和红黏土红壤之间^[22]。另外花岗岩红壤肥力相对较低,作物长势较弱,植被覆盖较小,也增加了产流的可能,因此花岗岩红壤径流量和泥沙量较大,而红黏土红壤较低,与前人的报道一致^[23]。

花岗岩红壤径流磷含量最高,主要由于猪粪在砂土中的矿化速率远高于黏土^[24-25],而且花岗岩红壤质地较粗对磷的吸附牢固程度较小,吸附的磷较易解吸^[26],因此花岗岩红壤磷素更易进入土壤溶液随径流流失。红黏土红壤径流泥沙磷含量最高,主要由于其本底有效磷含量较高,且磷素积累显著高于花岗岩和红砂岩红壤^[27-28]。

4 结论

减少化肥用量配施低用量的猪粪是减少水土流失及养分流失的有效措施。在红壤花生坡地减半化肥用量配施 1 750~28 000 kg/(hm²·a)的猪粪,即配施常规化肥减半磷量[P 含量 20 kg/(hm²·a)]至 8 倍磷量[P 含量 320 kg/(hm²·a)]的猪粪,均能有效降低坡地产流产沙,减少径流量 5.5%~56.8%,

减少泥沙量 3.2%~52.9%,但径流磷含量随着猪粪施用量线性增加。花岗岩、红砂岩和红黏土红壤猪粪用量达到 14 000,28 000,28 000 kg/(hm²·a)时,径流总磷平均含量显著升高,超过地表水环境质量标准 V 类限值。不同母质红壤坡地水土流失和磷素流失有明显差异,径流量和泥沙量均为花岗岩红壤>红砂岩红壤>红黏土红壤,径流总磷含量为花岗岩红壤>红黏土红壤>红砂岩红壤,而泥沙总磷含量则为红黏土红壤>花岗岩红壤>红砂岩红壤,花岗岩红壤的磷素流失风险最高。建议南方丘陵区根据不同母质红壤的特点和差异,综合考虑土壤肥力水平、作物利用方式以及地形地貌,因地制宜施用猪粪。花岗岩和红砂岩红壤坡地可减半化肥用量配施 3 500 kg/(hm²·a)的猪粪,红黏土红壤可配施 7 000 kg/(hm²·a)的猪粪,同时根据周或旬天气预报适当提前施肥,强降雨天气之前尽量避免中耕培土等农事操作,从而降低径流养分含量,最大限度地降低水环境风险。

致谢:感谢江西鹰潭农田生态系统国家野外科学观测研究站提供降雨量数据。

参考文献:

[1] 水利部,中国科学院,中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全(南方红壤区卷)[M]. 北京: 科学出版社,2010.

- [2] 梁音,张斌,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):22-27.
- [3] 王兴祥,张桃林.红壤旱坡地农田生态系统养分循环和平衡[J].生态学报,1999,19(3):335-341.
- [4] Bertol O J, Rizzi N E, Favaretto N, et al. Phosphorus loss by surface runoff in no-till system under mineral and organic fertilization[J]. Scientia Agricola, 2010, 67(1):71-77.
- [5] 周志高,李忠佩,何园球,等.红壤丘陵区生猪规模化养殖及其对土壤与水环境的影响:以江西省余江县为例[J].土壤学报,2013,50(4):703-711.
- [6] 宋蒙亚,李忠佩,刘明,等.不同有机物料组合对土壤养分和生化性状的影响[J].中国农业科学,2013,46(17):3594-3603.
- [7] Hou X Q, Wang X J, Li R, et al. Effects of different manure application rates on soil properties, nutrient use, and crop yield during dryland maize farming[J]. Soil Research, 2012, 50(6):507-514.
- [8] 宋金红,吴景贵.不同有机培肥对黑土团聚体含量及特征的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(3):103-108.
- [9] 徐秋桐,鲍陈燕,张莉,等.施用富铜锌猪粪对低丘茶园土壤及茶叶重金属积累的影响[J].水土保持学报, 2014, 28(5):204-208.
- [10] 潘霞,陈励科,卜元卿,等.畜禽有机肥对典型蔬果地土壤剖面重金属与抗生素分布的影响[J].生态与农村环境学报,2012,28(5):518-525.
- [11] 王利民,林新坚,黄东风,等.不同培肥模式下闽东茶园水土及其氮磷流失特征[J].水土保持通报,2015,35(4):69-72,78.
- [12] 李喜喜,王昌全,杨娟,等.猪粪施用对水稻田面水养分动态变化特征及流失风险的影响[J].水土保持学报, 2015, 29(5):130-136.
- [13] 张玉平,荣湘民,刘强,等.有机无机肥配施对旱地作物养分利用率及氮磷流失的影响[J].水土保持学报, 2013, 27(3):44-48.
- [14] 郭智,周炜,陈留根,等.施用猪粪有机肥对稻麦两熟农田稻季养分径流流失的影响[J].水土保持学报,2013, 27(6):21-25.
- [15] 杨洁,郭晓敏,宋月君,等.江西红壤坡地柑橘园生态水文特征及水土保持效益[J].应用生态学报,2012,23(2):468-474.
- [16] 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.
- [17] 聂军,郑圣先,杨曾平,等.长期施用化肥、猪粪和稻草对红壤性水稻土物理性质的影响[J].中国农业科学, 2010, 43(7):1404-1413.
- [18] 朱巧红,彭新华,潘艳斌,等.添加有机物料对花生不同生育时期产流产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):29-33.
- [19] 张瑞国,王克勤,陈奇伯,等.昆明市水源区不同利用类型坡地径流氮和磷的输出特征[J].环境科学研究, 2009, 22(5):607-611.
- [20] 王婷婷,王俊,赵牧秋,等.有机肥对设施菜地土壤磷素累积及有效性的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(1):95-100.
- [21] 杜会英,袁志华,常玉海,等.畜禽粪便中磷释放运移特征[J].农业环境科学学报,2010,29(12):2363-2367.
- [22] 史学正,于东升,邢廷炎.用田间实测法研究我国亚热带土壤的可蚀性 K 值[J].土壤学报,1997,34(4):399-405.
- [23] 徐祥明,高珍萍,邱秀亮,等.赣南不同母质及植被覆盖对红壤水稳性的影响[J].水土保持通报,2015,35(5):55-58.
- [24] Sørensen P. Short-term nitrogen transformations in soil amended with animal manure[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(9):1211-1216.
- [25] Hernández T, Moral R, Perez-Espinosa A, et al. Nitrogen mineralisation potential in calcareous soils amended with sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2002, 83(3):213-219.
- [26] 宋春丽.旱作条件下不同母质红壤磷吸附作用及其影响因素研究[J].中国农学通报,2016,32(2):129-134.
- [27] 张迪,周志高,杨奕如,等.中亚热带三种母质发育的红壤对猪粪安全消纳量的初步研究[J].土壤,2015,47(2):414-421.
- [28] Aulakh M S, Garg A K, Kabba B S. Phosphorus accumulation, leaching and residual effects on crop yields from long-term applications in the subtropics[J]. Soil Use and Management, 2007, 23(4):417-427.