

湘南红壤丘陵区不同生态种植模式下土壤磷素流失特征*

袁敏 文石林** 徐明岗 董春华 秦琳 张璐

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/湖南祁阳农田生态系统国家野外科学观测研究站,湖南祁阳 426182)

摘要 以湖南省祁阳县红壤坡地大型标准径流场为例,研究了湘南红壤丘陵区8种不同生态种植模式下土壤磷素的地表流失特征.结果表明:总磷流失量以撂荒处理(T_1)最严重,顺坡种植模式处理(T_2 、 T_3)其次,5种梯田模式处理($T_4 \sim T_8$)均能有效减少土壤磷的流失,磷流失量分别是 T_1 处理的9.9%、37%、0.7%、2.3%和1.9%.生态种植模式直接影响红壤坡地土壤磷素的地表流失形态,研究区流失的磷素以颗粒磷为主.暴雨(日降雨量 >50 mm)情况下,降雨量对不同生态种植模式下磷流失量影响差异不大,但磷流失量随降雨强度增大而增加.红壤坡地土壤磷素地表流失主要集中在6—9月,降雨量和降雨强度是影响湘南红壤丘陵区土壤磷素地表流失时间分布的直接因素.

关键词 红壤丘陵区 生态种植模式 地表径流 磷素流失

文章编号 1001-9332(2013)11-3162-07 中图分类号 S157.3 文献标识码 A

Characteristics of soil phosphorous loss under different ecological planting patterns in hilly red soil regions of southern Hunan Province, China. YUAN Min, WEN Shi-lin, XU Ming-gang, DONG Chun-hua, QIN Lin, ZHANG Lu (Qiyang National Observation Station of Agri-ecology System, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang 426182, Hunan, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.* 2013 24(11): 3162-3168.

Abstract: Taking a large standard runoff plot on a red soil slope in Qiyang County, southern Hunan Province as a case, this paper studied the surface soil phosphorus loss characteristics in the hilly red soil regions of southern Hunan under eight ecological planting patterns. The phosphorus loss from wasteland (T_1) was most serious, followed by that from natural sloped cropping patterns (T_2 and T_3), while the phosphorus loss amount from terrace cropping patterns ($T_4 - T_8$) was the least, only occupying 9.9%, 37%, 0.7%, 2.3%, and 1.9% of T_1 , respectively. The ecological planting patterns directly affected the forms of surface-lost soil phosphorus, with the particulate phosphorus (PP) as the main lost form. Under the condition of rainstorm (daily rainfall >50 mm), rainfall had lesser effects on the phosphorus loss among different planting patterns. However, the phosphorus loss increased with increasing rain intensity. The surface soil phosphorus loss mainly occurred from June to September. Both the rainfall and the rain intensity were the factors directly affected the time distribution of surface soil phosphorus loss in hilly red soil regions of southern Hunan.

Key words: hilly red soil region; ecological planting pattern; surface runoff; phosphorus loss.

水土流失导致严重的土壤养分流失,并引起人们广泛重视.坡地养分的迁移造成肥料投入的增加和湖泊的严重污染^[1],导致水体质量恶化^[2-3].湘南红壤丘陵区土壤肥力衰减的原因除了只用不养或用

多养少等生产活动外,水土流失引起的土壤养分流失也是重要因素^[4].

磷是作物生长必需的大量营养元素之一,也是土壤养分重要的组成部分.湘南红壤丘陵区土壤普遍缺磷,已成为本地区作物高产的限制因素.施用化学磷肥是补充土壤磷素的重要手段,但由于过量和不合理的施用以及水土流失的影响,磷的流失问题

* 国家科技支撑计划重点项目(2012BAD05B05)和公益性行业科研专项(201203030)资助.

** 通讯作者. E-mail: wenshilin@caas.cn

2013-02-21 收稿 2013-08-27 接受.

非常严重^[5-9]. 前人在对我国黄土、紫色土、红壤等常见的土壤类型养分流失进行研究时,发现养分流失量及形态存在较大差异,即使是相同的土壤类型,在不同的研究区也有所差异. 在湘南大开发战略区域大背景下,近几年该区连片开发的土地规模很大,新开发耕地种植模式多样,生态防护措施也存在很大差异,导致了土壤磷素或随径流或随泥沙流失的差异. 基于湘南红壤丘陵区坡地的实际土壤条件和耕作利用方式,本研究通过对比分析新开垦红壤坡地 8 种不同生态种植模式下土壤磷素流失情况,探讨了不同水土保持措施控制土壤磷素流失的效果,旨在为指导湘南红壤丘陵区坡地合理利用与区域生态环境保护提供科学依据. 选用可以有效控制水土流失的生态种植模式,从控制坡地磷素流失途径来减少磷素流失,对于保证作物对磷素养分的需求、保护其下游流域的水资源不受农业非点源污染也有着重要意义.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省南部,以低山丘陵为主,中亚热带季风气候特征明显,是良好的农区. 该区年均气温 17.9 ~ 20.1 °C,年降雨量 1196 ~ 1451 mm,年蒸发量 1470 ~ 1614 mm,年无霜期约 300 d,年日照时数 1610 ~ 1620 h,年太阳辐射量 4550 MJ · m⁻². 温、光、水、热资源丰富,但时空分布不均匀,一般 7—9 月高温少雨,季节性干旱严重. 试验布置在湖南省祁阳县官山坪村的红壤坡地大型标准径流场内(26°45′12″ N, 111°52′32″ E). 试验小区在山坡的中下部,坡面正朝北,海拔为 140 ~ 150 m,坡度 10°左右,土壤类型为第四纪红色粘土发育成的深厚红壤,其

地形、地貌、坡度和土壤类型在湘南红壤丘陵区具有很好的代表性. 试验地比较贫瘠,基础土壤肥力状况为: pH 4.92,有机质含量 7.59 g · kg⁻¹,全氮含量 0.76 g · kg⁻¹,全磷含量 0.30 g · kg⁻¹,全钾含量 22.94 g · kg⁻¹,碱解氮含量 38.76 mg · kg⁻¹,速效磷含量 0.94 mg · kg⁻¹,速效钾含量 85.90 mg · kg⁻¹.

1.2 试验设计

湘南红壤丘陵区的传统旱地经济作物是花生、黄花菜和苕麻,近年来在湘南红壤丘岗坡地上又开发种植了大量油料作物——油茶树,由于种植方式、地面覆盖时期差异较大,水土流失程度也明显不同. 为了解这些经济作物的保水保肥效果,按不同旱地经济作物模式和油茶林下不同地面覆盖模式设计了 8 个生态种植模式处理(表 1). 为减少试验结果误差和便于数据统计分析,所有处理均重复 3 次,并按土壤条件差异趋势设计区组,区组内随机排列. 本试验共有 24 个径流小区,小区大小为垂直投影 5 m × 20 m(宽 × 长),坡度统一平整为 10°,四周设混凝土围埂,下方设有矩形径流池及集水槽,容量分别为 1.26、2.74 和 2.74 m³. 所有作物均按当地习惯栽培和管理,并根据生长情况及时收割. 除撂荒处理外,其余 7 个处理的磷肥施用量相同,肥料种类为钙镁磷肥,施用量为 90 kg P₂O₅ · hm⁻². 所有梯田小区均分成 6 个梯层(梯层面积: 5 m × 3.33 m = 16.65 m²).

1.3 试验测定及方法

试验观测在 2011 年 1—12 月进行,降雨资料由距离试验区 400 m 左右的气象观测点提供.

径流量及侵蚀泥沙量: 根据径流池中水尺的读数(径流深)计算径流量. 每次降雨产流结束后,

表 1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

处理代号 Treatment code	种植模式 Planting pattern	主要措施 Main measures
T ₁	撂荒(对照)	2010 年顺坡平整后,无人干扰,植被自然恢复,裸露度高
T ₂	常规顺坡种植黄花菜	行株距为 0.4 m × 0.3 m,穴施肥料(一半 4 月 21 日施入,另一半 5 月 11 日施入),收产时间集中在 7 月
T ₃	常规顺坡种植苕麻	行株距为 0.5 m × 0.5 m,穴施肥料(一半 4 月 21 日施入,另一半 5 月 11 日施入),11 月 3 日收产
T ₄	梯田-花生 + 植物篱	花生行株距 0.3 m × 0.2 m,梯田外侧种黄花,株距 40 cm,隔 2 梯成带,穴施肥料(4 月 21 日施入),8 月 13 日收产
T ₅	梯田-油茶	油茶林为 2010 年 3 月营造,造林密度 1200 株 · hm ⁻² ,平均树高 50 cm,穴施肥料(3 月 12 日施入)
T ₆	梯田-油茶 + 稻草覆盖	在 T ₅ 的基础上盖稻草(11250 kg · hm ⁻²),直接均匀铺于全小区,4 月 14 日覆盖
T ₇	梯田-油茶 + 花生 + 植物篱	幼林油茶套种一季花生,其栽培措施与 T ₄ 相同
T ₈	梯田-油茶 + 豆科牧草	豆科牧草罗顿豆与白三叶 2:3 混播,撒施肥料(4 月 21 日施入),11 月 5 日收割罗顿豆

用清洁矿泉水瓶取水样 500 mL; 取完水样后慢慢排放掉上层清水, 搅匀池底泥沙取混合泥沙样品 1 kg 左右, 收集池底全部泥沙称其质量(留取一定质量泥沙烘干称量, 以换算侵蚀泥沙质量); 最后用清水将径流池清洗干净, 以备下一次采样和计量。

样品室内测定项目与方法: 降雨产流后的地表径流样品分为径流水样和侵蚀泥沙样两类。水溶态磷(dissolved phosphorus, DP): 径流液用 0.65 μm 滤膜过滤后, 采用硝酸-高氯酸消化, 钼酸铵分光光度法测定; 颗粒磷(particulate phosphorus, PP): 采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定侵蚀泥沙中全磷含量; 侵蚀泥沙速效磷: 采用氟化铵浸提-钼蓝比色法测定。

土壤磷素的流失量通过测定计算地表径流量、侵蚀泥沙量及二者中磷的含量而得。

流失量: 各形态(水溶态、颗粒态) 磷流失量采用次降雨流失量和流失总量来表示。次降雨流失量: $W_i = C_i V_i$ 或 $W_i = C_i M_i$; 流失总量: $W = \sum C_i V_i$ 或 $W = \sum C_i M_i$, 式中: W_i 为第 i 次径流的磷流失量; C_i 为第 i 次径流水样或侵蚀泥沙样的含磷浓度; V_i 为第 i 次径流水体积; M_i 为第 i 次侵蚀泥沙质量。

总磷 = 水溶态磷 + 颗粒磷; 有效磷 = 水溶态磷 + 侵蚀泥沙速效磷。

1.4 数据处理

所有数据的统计分析都在 Excel 2003 软件和 SAS 8.1 软件上进行, 所有数据测定结果均以 3 次重复的平均值表示。不同处理之间采用邓肯法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同生态种植模式下土壤磷素流失量及形态

土壤溶质随地表径流流失指当降雨强度大于土壤入渗能力时, 地表产生径流, 土壤表层的溶质在雨滴打击及径流冲刷作用下向地表径流传递, 并随地表径流而迁出土体^[10]。降雨情况下, 土壤磷素不仅以溶解态形式随径流流失, 也以颗粒态形式被泥沙大量携带而迁移出坡地。依据磷素主要流失途径, 分项统计溶蚀携带(水溶态磷)、侵蚀泥沙携带(颗粒磷) 的养分量, 两者之和为径流磷素流失总量。

2011 年, 研究区不同生态种植模式下土壤中各形态磷素流失量均达到极显著差异。由表 2 可以看出: 在 8 个处理中, T_1 、 T_2 和 T_3 处理是顺坡模式, 其他 5 个处理是梯田模式。顺坡模式的土壤磷素流失远大于梯田模式。各处理全年磷素流失总量从大到小

表 2 不同生态种植模式下土壤磷素地表流失量

Table 2 Soil phosphorus loss under different ecological planting patterns ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	磷流失总量 Total P loss	颗粒磷 流失量 Particulate P loss	水溶态磷 流失量 Dissolved P loss	速效磷 流失量 Available P loss
T_1	20.57a	20.13a	0.44a	0.52a
T_2	20.39a	20.08a	0.31ab	0.48a
T_3	12.91b	12.72b	0.19bc	0.28b
T_4	2.03d	1.84d	0.19bc	0.21b
T_5	7.62c	7.16c	0.46a	0.52a
T_6	0.14d	0.02d	0.12c	0.12b
T_7	0.47d	0.28d	0.19bc	0.19b
T_8	0.38d	0.20d	0.18bc	0.19b

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.01$) Different small letters within the same column indicated significant difference at 0.01 level.

的顺序为: T_1 、 $T_2 > T_3 > T_5 > T_4$ 、 T_6 、 T_7 、 T_8 、 T_2 处理与 T_1 处理间差异不显著, 其他模式处理与 T_1 间差异极显著 ($P < 0.01$)。总磷流失量以 T_1 最严重, 顺坡模式的两个处理 (T_2 、 T_3) 其次, 梯田模式处理均能有效减少总磷流失。在梯田油茶模式中, T_5 处理因无地面覆盖措施, 油茶处幼龄期, 地表覆盖度很低, 磷素流失较多, 而其余 3 个有覆盖措施的梯田模式处理 (T_6 、 T_7 和 T_8) 的土壤磷流失量非常少且差异很小, 有无覆盖措施处理间的土壤磷素流失量差异极显著。地表土壤总磷流失量顺序与土壤侵蚀量顺序^[11] 完全一样, 这初步说明保持土壤是减少红壤坡地土壤磷素流失的关键。

不同生态种植模式处理的颗粒磷和水溶态磷流失情况对比表明, 湘南红壤丘陵区土壤磷素地表流失形态与生态种植模式密切相关, 主要表现在不同生态种植模式处理的颗粒磷和水溶态磷占土壤磷素流失总量的比例不同。在流失的磷素中, $T_1 \sim T_8$ 处理颗粒磷占总磷的比例分别为 97.9%、98.5%、98.5%、90.6%、94.0%、14.3%、59.6%、52.6%, 表明研究区磷素的流失形态中, $T_1 \sim T_3$ 处理以颗粒磷流失占绝对优势, T_6 处理以水溶磷态流失为主, T_7 、 T_8 处理的颗粒磷与水溶态磷流失量相差不大。颗粒磷的流失量与总磷流失量的大小顺序相同, 颗粒磷与总磷流失量呈极显著正相关关系, Pearson 相关系数为 0.9448 ($P < 0.01$)。土壤磷流失量最小的 T_6 处理就是因为其稻草覆盖有效地减少了侵蚀泥沙量从而控制了颗粒磷流失; 水溶态磷流失对总磷流失量影响较小, 原因在于南方红壤固磷能力较强、磷溶解度不大, 导致径流水中可溶性磷浓度较低。

土壤磷素的流失中, 有效磷的流失量占比很小, 这是因为试验土壤中速效磷含量很低, 故流失的速

效磷也较少。T₁ ~ T₈ 处理水溶性磷占有有效磷流失量的比例分别为 84.6%、64.6%、67.9%、90.5%、88.5%、100%、100%、94.7%，其中 T₄、T₆、T₇ 和 T₈ 处理流失的水溶性磷占有有效磷流失总量 90% 以上，可以认为流失的水溶性磷即为各自土壤流失的有效磷。尽管撂荒处理(T₁) 没有施肥，土体中有效磷的含量较低，但其流失的有效磷量较多，这是因为地表径流中有效磷的流失量不仅取决于其浓度的大小，而且取决于水土流失量的大小，T₁ 的径流量和侵蚀泥沙量均最大，因而才出现上述结果。

2.2 典型次暴雨下不同生态种植模式下土壤磷素地表流失特点

2011 年试验区各生态种植模式处理发生地表径流次数相等，均为 17 次(间隔小于 24 h 的次降雨产生的径流计为 1 次)；然而，并不是每次产流的发生都伴随着泥沙侵蚀，在 8 个处理中，携带有泥沙(次降雨所含总泥沙量 > 1 kg) 的地表径流发生次数最多为 10 次，其中 梯田-油茶 + 稻草覆盖模式处理(T₆) 侵蚀产沙次数仅为 3 次，分别发生在 5 月 4 日、6 月 17 日和 6 月 25 日。为此，本文选择各生态种植模式小区均有发生产流产沙现象的 2 次典型次暴雨来分析磷素流失特点。

从表 3 可以看出，影响径流量、侵蚀泥沙量的因素很复杂，不仅仅只有降雨量，还包括降雨强度、植被覆盖、地面情况等。本试验中，不同生态种植模式处理产生的径流量、侵蚀泥沙量受降雨量影响较小，与降雨量的相关性较小。在 6 月 17 日和 6 月 25 日

的降雨中，各处理径流量、侵蚀泥沙量排序均不相同，说明相同降雨条件下生态种植模式对坡地径流量、侵蚀泥沙量影响明显。

两次暴雨中，降雨量对不同处理水溶态磷、颗粒磷流失量的影响不如降雨强度明显。与 6 月 17 日的降雨情况相比，6 月 25 日降雨量变小、降雨强度明显增大。尽管 6 月 25 日降雨量变小，但颗粒磷流失量增加，水溶态磷/颗粒态磷变小，说明降雨强度大小明显影响土壤磷素流失形态变化，即随降雨强度增大，径流迁移中的水溶态磷占颗粒磷的比例变小，这种影响以影响颗粒磷流失量为主。

6 月 25 日各处理的总磷流失量明显高于 6 月 17 日，前者的流失量是后者的 1.1 ~ 7.9 倍。两次降雨情况下土壤总磷流失量的差异主要由磷流失形态差异所致，即水溶态磷/颗粒态磷越小，总磷流失量越大。总磷流失量也受雨强的影响，随着雨强的增大，总磷流失量增加；不同生态种植模式处理总磷流失量受降雨强度的影响程度有明显差异，并呈现一定规律，当降雨强度变大时，T₁ ~ T₈ 处理的总磷流失量分别增加 1.38、1.78、2.20、0.01、0.07、0.01、0.02、0.02 kg · hm⁻²，顺坡模式小区(T₁ ~ T₃) 增加值均 > 1，梯田模式小区(T₄ ~ T₈) 均明显 < 1，且梯田模式中覆盖度低的 T₅ 小区增加值明显高于其他梯田模式小区。

2.3 土壤磷素地表流失的时间分布特征

2011 年，湘南红壤丘陵区不同生态种植模式处理水溶态磷素流失时期为 3—11 月；颗粒态的土壤

表 3 典型次暴雨下坡地土壤磷素地表流失特征

Table 3 Characteristic of phosphorus loss from sloped land under two typical storms

降雨日期 Rain date	降雨量 Rainfall (mm)	处理 Treatment	径流量 Runoff (m ³ · hm ⁻²)	泥沙量 Sediment (t · hm ⁻²)	水溶态磷 DP (kg · hm ⁻²)	颗粒态磷 PP (kg · hm ⁻²)	水溶态磷/ 颗粒态磷 DP/PP	总磷 TP (kg · hm ⁻²)
06-17	67.4	T ₁	187.08	7.33	0.06	2.26	0.03	2.32
		T ₂	63.70	0.61	0.02	0.24	0.07	0.26
		T ₃	82.95	2.15	0.02	0.65	0.03	0.67
		T ₄	28.00	0.95	0.02	0.12	0.18	0.14
		T ₅	141.59	0.53	0.05	0.28	0.16	0.32
		T ₆	21.70	0.01	0.01	0.00	4.33	0.02
		T ₇	34.65	0.02	0.02	0.01	1.67	0.02
		T ₈	78.05	0.05	0.03	0.02	1.38	0.05
06-25	51.0	T ₁	163.96	11.60	0.06	3.65	0.02	3.70
		T ₂	124.03	5.56	0.03	2.01	0.02	2.04
		T ₃	144.02	8.25	0.04	2.84	0.01	2.88
		T ₄	58.80	1.12	0.01	0.14	0.08	0.16
		T ₅	136.75	0.41	0.04	0.35	0.12	0.39
		T ₆	16.80	0.02	0.01	0.01	0.70	0.02
		T ₇	44.10	0.08	0.02	0.03	0.72	0.04
		T ₈	63.35	0.13	0.02	0.04	0.55	0.07

磷素流失时期为5—9月,主要集中在6—9月.因为水溶态的土壤磷素绝对量较颗粒态磷少很多,土壤磷素流失绝大部分由颗粒磷的流失造成,因而,全年土壤磷素地表流失也主要集中在颗粒态磷素流失较多的6—9月,又以6和8月居多(图1).不同生态种植模式下土壤磷素的流失在6—9月差异明显,期间 $T_1 \sim T_8$ 处理土壤径流磷素的流失量分别为20.57、20.39、12.91、2.04、7.62、0.18、0.47、0.38 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别占全年总流失量的99.7%、99.7%、99.7%、97.6%、99.3%、66.2%、89.7%、88.8%;其流失量的大小顺序($T_1, T_2 > T_3 > T_5 > T_4, T_6, T_7, T_8$)与总磷流失量以及侵蚀泥沙量顺序完全一样,这也再次说明侵蚀泥沙量明显影响总磷流失量以及流失发生的时间分布.

2.4 影响红壤坡地土壤磷素地表流失时间分布的因素

2.4.1 降雨

降雨是坡地土壤磷素地表流失发生的动力,因此,研究区降雨的时间分布决定着土壤磷素地表流失的时间分布特征.邱尔发等^[12]对不同土壤复垦措施下山地麻竹林养分流失的研究认为,南方由于较集中的季节性降雨,多雨月份养分流失总量可占全年养分流失量的90%以上.因此,如何在这一时期做好保水保肥工作,是实现有林坡地持续利用的关键.

试验期间降雨量在年内分布极不均匀,呈“双峰”型变化趋势,上半年降雨主要集中在5—6月,下半年降雨主要集中在8—10月,5—6月和8—10月(共5个月)降雨量占全年降雨量的69.7%.从图1可以看出,土壤磷素地表流失总量主要集中在6—9月,流失量发生的主要月份在多雨月份之内,但6—9月降雨量占3—11月降雨量的52.4%,磷素流

失量却占99.4%.磷素月流失量与月降雨量并无正相关关系;10月的降雨量仅次于6月,高于8月,其磷流失量却很低.结合多雨月份发生次降雨的降雨强度来看,6、8月磷素地表流失最多,与暴雨发生月份(日降雨量 $>50 \text{ mm}$ 的暴雨发生4次,6月和8月各2次)完全吻合,而10月虽然总降雨量大,但期间发生次降雨的次数多,均是历时长、降雨强度很小的小雨量次降雨.

降雨量和降雨强度均是影响湘南红壤丘陵区土壤磷素地表流失时间分布的直接因素,尤其是日降雨量 $>50 \text{ mm}$ 的暴雨对磷素地表流失影响甚大.

2.4.2 生态种植模式

坡地土壤养分迁移与流失的影响因素很多,是一个复杂的物理化学过程^[13].在相同的降雨条件下,不同生态种植模式处理造成了坡地径流量、侵蚀泥沙量以及其养分流失浓度的差异^[14-18].土壤磷素在降雨条件下向土体外迁移不仅取决于降雨条件,还与各生态种植模式小区所特有的下垫面特征有很大关系,从而造成整个周年磷素地表流失随降雨过程呈现一定分布特征.从图1可以看出,6、8月是不同生态种植模式处理土壤磷素流失量差异最大的月份,在这两个月,磷素流失量居前3位的均是顺坡模式处理(T_1, T_2, T_3),其次是 T_5 ,其余4种梯田模式处理(T_4, T_6, T_7, T_8)土壤磷素流失量远小于前者.出现上述结果的原因是:不同生态种植模式处理在遇到降雨量多且降雨强度大的降雨月份时,顺坡模式处理水土流失严重;梯田模式中的 T_5 处理地表覆盖度低,水土流失程度其次,因而 T_1, T_2, T_3, T_5 处理下的坡地土壤磷素流失主要分布在这两个月; T_4, T_6, T_7, T_8 处理下的坡地由于在整个雨季地表覆盖度较大,且为梯田模式,均有效地降低了暴雨条件下坡地产流产沙量剧增的现象,特别是有效地拦截了颗粒态磷,从而使这些处理的磷素流失时间分布曲线较平缓.

3 讨论

土壤磷素地表流失量结果表明:2011年,研究区不同生态种植模式处理土壤磷素地表流失总量从大到小的顺序为 $T_1, T_2 > T_3 > T_5 > T_4, T_6, T_7, T_8$,常规顺坡种植黄花菜模式小区(T_2)与撂荒地(T_1)间差异不显著,撂荒处理(T_1)与其他模式处理间差异极显著($P < 0.01$).在湘南红壤丘陵区,农户在新垦坡地种植黄花菜和苕麻等多年生经济作物时,为了图简便和增加有效种植面积,往往采用顺坡种植方式,在其建植早期,由于植被比较稀疏,水土和养分

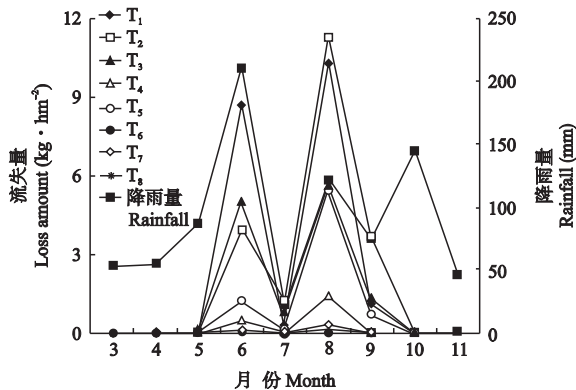


图1 不同生态种植模式下土壤磷素流失时间分布
Fig.1 Time distribution of phosphorus loss from sloped land under different ecological planting patterns.

流失十分严重,本试验 T_2 和 T_3 处理的土壤磷素流失就非常严重,而采用梯田模式种植花生处理(T_4)的坡地土壤磷素流失则少得多。因此,应对农户多加引导,改用梯田种植这些作物或种植生物篱,以减少水土和养分流失。油茶是湘南红壤丘陵区的一种重要油料作物,近年来各级政府非常重视发展油茶产业,新垦了大量梯田种植油茶树。但在油茶树生长幼龄期,由于植被覆盖度低,即使采用了梯田模式,其水土和养分流失仍然十分严重(T_5)。油茶树生长早期,在梯面种植花生或牧草,可增加地面覆盖度,在有效利用土地和增加收入的同时,可减少水土和养分流失;如劳力紧张无法种植作物,采用稻草覆盖的方式既可覆盖地面、减少水土和养分流失,又可保持土壤水分和增加土壤有机质。因此,选用合理的种植方式可很好地控制磷素流失,本研究和前人^[19-20]的研究都证实了这一点,本试验中梯田模式下 T_6 、 T_7 、 T_8 处理均能有效减少坡地土壤磷流失且处理间差异已不明显。撂荒地(T_1)因缺乏植被的覆盖,水土流失特别严重,即使没有施肥,其流失磷素总量也明显高于其他处理,因此应尽量控制坡地撂荒初期的水土流失。

磷素流失形态分析表明:在 8 种生态种植模式小区中,颗粒磷的流失量、总磷流失量和土壤侵蚀量有同样的大小顺序,3 者的流失趋势保持一致,说明侵蚀土壤仍是径流磷素的主要载体,这与袁东海等^[5]、李建华等^[20]的研究结果一致。不同生态种植模式小区颗粒磷和水溶态磷流失情况对比表明,研究区 $T_1 \sim T_5$ 处理下坡地磷素的流失形态以颗粒态磷为主, T_6 处理下的坡地由于侵蚀泥沙量很少,以水溶态磷为主, T_7 、 T_8 处理下坡地颗粒磷流失量和水溶态磷流失量相差不大。

典型次暴雨下不同生态种植模式下土壤磷素地表流失特点分析表明:降雨量对磷素地表流失的影响不如降雨强度明显,降雨强度通过影响颗粒磷的流失量明显影响磷素地表流失形态,一般随降雨强度增大,颗粒磷流失量增加,水溶态磷/颗粒态磷变小,这与前人研究结论^[21-27]吻合;次暴雨对不同生态种植模式小区总磷流失量的影响存在明显差异,对顺坡模式小区($T_1 \sim T_3$)影响最大,覆盖度低的 T_5 处理其次,对其他梯田模式小区影响最小。

土壤磷素地表流失的时间分布特征及其影响因素分析表明:土壤磷素地表流失主要集中在 6—9 月,又以 6、8 月占主导地位;降雨量和降雨强度均是影响湘南红壤丘陵区土壤磷素地表流失时间分布的直接因素,尤其是日降雨量 > 50 mm 的暴雨对磷素

地表流失影响甚大,这与 Nash 和 Murdoch^[28]、Gburrek 和 Sharpley^[29]的研究结果一致,认为土壤磷素的流失主要集中在几次大暴雨过程中,受不同生态种植模式的影响, T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_5 处理在遭遇 6 月和 8 月的强暴雨时水土流失严重,因而磷素地表流失就主要分布在这 2 个月; T_4 、 T_6 、 T_7 和 T_8 处理由于整个雨季地表覆盖度较大,且为梯田模式,均有效地降低了暴雨条件下颗粒态磷剧增的现象,因此磷素地表流失时间分布曲线相对平缓。

研究降雨对土壤磷素地表流失的影响时,由于试验条件的限制,本试验没有采集次降雨产流产沙的过程样,故不能研究水溶性磷和颗粒磷浓度随次降雨产流时间发展的变化曲线,也就难以定量分析土壤磷素随地表径流迁移的过程,降雨量、降雨强度对土壤磷素地表流失影响的定性研究结果也有待于在进一步深化研究中进行验证。

参考文献

- [1] Zhu Z-L (朱兆良), Sun B (孙波). Control strategies of agricultural non-point source pollution in China. *Environmental Protection* (环境保护), 2008(8): 4-6 (in Chinese)
- [2] Sharpley AN, Smith SJ, Naney JW. Environmental impact of agricultural nitrogen and phosphorus use. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1987, **35**: 812-817
- [3] Novotny V. Diffuse pollution from agriculture: A worldwide outlook. *Water Science and Technology*, 1993, **39**: 1-13
- [4] Yang X-Z (杨学震), Zhong B-L (钟炳林), Xie X-D (解小东), et al. The Soil Erosion and Its Controlling in Red Soil Hilly Areas. Beijing: China Agriculture Press, 2005 (in Chinese)
- [5] Yuan D-H (袁东海), Wang Z-Q (王兆骞), Chen X (陈欣), et al. Characteristics of phosphorus losses from slope field in red soil area under different cultivated ways. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(10): 1661-1664 (in Chinese)
- [6] Lin C-W (林超文), Pang L-Y (庞良玉), Luo C-Y (罗春燕), et al. Effect of balanced fertilization and rain intensity on nutrient losses from a purple soil in Sichuan. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(10): 5552-5560 (in Chinese)
- [7] Li X-W (李宪文), Shi X-Z (史学正), Coen R. Features of soil nutrient loss accompanied with runoff and sediment for the purple soil in Sichuan Province. *Resources Science* (资源科学), 2002, **24**(6): 22-28 (in Chinese)
- [8] Xin Y (辛艳), Wang X (王瑄), Qiu Y (邱野), et al. Discipline of nutrient losses from slope cropland in Liaoning Province under different cropping modes. *Journal of Shenyang Agricultural University* (沈

- 阳农业大学学报), 2012, **43**(3): 346–350 (in Chinese)
- [9] Zhang Z-Y (张展羽), Zhang W (张卫), Yang J (杨洁), *et al.* Characteristics of nutrient loss from surface runoff of terraced orchards under different scales. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28**(11): 105–109 (in Chinese)
- [10] Wang Q-J (王全九), Zhang J-H (张江辉), Ding X-L (丁新利), *et al.* Analysis of influencing factors of soil solute transfer with surface runoff. *Journal of Water Resources and Water Engineering* (水资源与水工程学报), 1999, **10**(1): 9–13 (in Chinese)
- [11] Yuan M (袁敏), Wen S-L (文石林), Qin L (秦琳), *et al.* Characteristics of soil and water loss under different ecological planting patterns in red soil hilly region of southern Hunan Province. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2012, **26**(6): 21–26 (in Chinese)
- [12] Qiu E-F (邱尔发), Chen Z-M (陈卓梅), Zheng Y-S (郑郁善), *et al.* Effects of stand condition improvement on surface soil nutrient losses of hilly land *Dendrocalamus latiflorus* plantations. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(6): 1017–1021 (in Chinese)
- [13] Wang Q-J (王全九), Wang L (王力), Li S-Q (李世清), *et al.* Research on the effective factors of nutrient transfer and loss in the slope land. *Journal of Northwest A&F University* (西北农林科技大学学报), 2007, **35**(12): 109–114 (in Chinese)
- [14] Meng Q-H (孟庆华), Yang L-Z (杨林章). Nutrient losses in different land use types in the Three Gorges Reservoir area (TGRA). *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2000, **20**(6): 1028–1033 (in Chinese)
- [15] Yuan D-H (袁东海), Wang Z-Q (王兆骞), Chen X (陈欣), *et al.* Characteristics of nitrogen loss from sloping field in red soil area under different cultivation practices. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(7): 863–866 (in Chinese)
- [16] Wang X-L (王小利), Guo S-L (郭胜利), Ma Y-H (马育红), *et al.* Effects of land use type on soil organic C and N in small watershed in loess hilly-gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(6): 1281–1285 (in Chinese)
- [17] Yao J (姚军), Wang L (王亮), He B-H (何丙辉). Study of nutrient loss in purple soil in artificially simulated rainfall conditions under different fertilization modes. *Journal of Southwest University* (Natural Science) (西南大学学报·自然科学版), 2010, **32**(11): 83–88 (in Chinese)
- [18] He B-H (何丙辉), Guo T (郭甜), Yao J (姚军), *et al.* Characteristics of N and P losses in sediment of purple soil on sloping farmland with different fertilizer levels. *Journal of Southwest University* (Natural Science) (西南大学学报·自然科学版), 2012, **34**(7): 1–8 (in Chinese)
- [19] Wu J-J (吴建军), Li Q-S (李全胜), Yan L-J (严力蛟). Effect of intercropping on soil erosion in young citrus plantation: A simulation study. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1997, **8**(2): 143–146 (in Chinese)
- [20] Li J-H (李建华), Yu X-X (于兴修), Liu Q-J (刘前进), *et al.* Soil and water losses and phosphorus output at the places between ridges in sloping peanut land under different planting modes in Yimeng mountainous area of Shandong Province, East China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(12): 3347–3354 (in Chinese)
- [21] Yang L (杨磊). Research of Nutrient Loss from Heimaogou Watershed in Danjiang Reservoir Area Based on GIS. Master Thesis. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007 (in Chinese)
- [22] Chen X (陈欣), Jiang S-Q (姜曙千), Zhang K-Z (张克中), *et al.* Law of phosphorus loss and its affecting factors in red soil slopeland. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 1999, **5**(3): 38–41 (in Chinese)
- [23] Ma K (马琨), Wang Z-Q (王兆骞), Chen X (陈欣), *et al.* Study on properties of nutrient loss from red soil in sloping land under different rainfall intensities. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2002, **16**(3): 16–19 (in Chinese)
- [24] Shigaki F, Sharpley A, Prochnow LI. Rainfall intensity and phosphorus source effects on phosphorus transport in surface runoff from soil trays. *Science of the Total Environment*, 2007, **373**: 334–343
- [25] Liu Y (刘洋). The Study on the Soil Erosion Prediction Model and Nutrient Loss on Different Ecological Controls of Red-soil Slope Land in Jiangxi Province. Master Thesis. Nanjing: Hohai University, 2007 (in Chinese)
- [26] Chen Z-L (陈志良), Cheng J (程炯), Liu P (刘平), *et al.* An experiment on influence of storm on nitrogen loss and phosphorus loss under different land use in river basin. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2008, **22**(5): 30–33 (in Chinese)
- [27] Li Y-Y (李裕元), Shao M-A (邵明安), Zheng J-Y (郑纪勇), *et al.* Experimental study on the impacts of rainfall intensity on phosphorus loss from loessial slope land. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2007, **23**(4): 39–46 (in Chinese)
- [28] Nash D, Murdoch C. Phosphorus in runoff from a fertile dairy pasture. *Australian Journal of Soil Research*, 1997, **35**: 419–429
- [29] Gburek WI, Sharpley AN. Hydrologic controls on phosphorous loss from upland agricultural watersheds. *Journal of Environmental Quality*, 1998, **27**: 267–277

作者简介 袁敏,女,1988年生,硕士研究生.主要从事红壤生态学研究. E-mail: minmin88416@126.com

责任编辑 杨弘