

红壤丘陵岗地区坡地地表径流氮磷流失特征研究^①

吕玉娟, 彭新华*, 高磊, 张中彬

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 农业非点源污染是水质恶化的主要贡献者, 研究坡地农田生态系统 N、P 流失特征及其影响因素对提高土壤生产力和水环境质量具有重要意义。本研究基于 2011 年 3 月至 2013 年 12 月花生地(158 场)和橘园地(152 场)降雨-产流事件中 N、P 流失的监测数据, 探讨南方红壤坡地农田生态系统 N、P 流失特征及其与降水特征、径流量的关系。结果表明: 花生地 N、P 流失量明显大于橘园地, N 流失浓度则是花生地小于橘园地。N、P 流失量的季节变化和年际变化均与地表径流量的变化规律一致, 养分流失量与地表径流量呈显著正相关关系($P < 0.01$), 流失高峰出现在每年的雨季 4—6 月。两种土地利用方式, P 素流失显著低于 N 素流失, NO_3^- -N 是可溶性养分流失的主要形态。降雨强度(I_{60})和径流量是影响养分流失的两个主要因素, 均与养分流失量呈显著的幂函数关系($P < 0.01$)。红壤坡地果园比坡地花生地的水土和养分保持效果好, 但在降雨产流高峰期仍需加强肥料施用管理和相关阻控措施的实施。

关键词: 红壤坡地; 雨强; 地表径流; 养分流失

中图分类号: S157.1

红壤坡地是我国南方主要的土地资源, 也是水土流失易发的一类土地类型。由于坡地资源的不合理开发利用, 易造成严重的水土流失及伴随着 N、P 等养分的流失, 导致坡地土壤生产力下降, 区域水体富营养化等环境问题, 严重地影响当地的农业生产^[1-2]。根据污染物排泄特征不同, 农田生态系统水环境污染主要分为点源污染和非点源污染^[3]。相对于点源污染, 非点源污染因污染物来源的多样性, 发生过程更具间歇性及复杂性^[4]。农田的非点源污染主要发生在降雨-产流过程中, 水体中有超过一半的富营养化污染物来源于该过程所携带的养分^[5]。因此, 对坡地降雨产流过程中 N、P 养分的流失特征和影响因素的探讨分析, 提出相应减缓农田面源污染措施已成为国内各研究学者研究的重点。

坡地土壤养分流失的过程是表层土壤养分与降雨、径流相互作用的过程^[6]。刘洋等^[7]、张展羽等^[8]研究发现, 天然降雨情况下, 红壤坡地不同形态养分流失量存在差异, N 素流失多于 P 素流失; 在产流过程的不同阶段, 养分流失浓度也不同, 产流前期养分浓度变化大, 后期趋于稳定。养分流失以泥沙携带为主, 随降雨减小而所占比例减小。马琨等^[9]研究发现,

当雨强较大时, 养分流失以泥沙携带为主, 雨强较小时, 以径流携带为主。吴希媛等^[10]发现, 超渗产流和蓄满产流过程, N 素流失形态存在一定差异。王兴祥等^[11]在红壤缓坡面上的研究表明, 有效养分损失以径流损失为主。

土壤养分随地表径流迁移是一个复杂的物理化学过程, 受众多因素的影响^[12]。Liu 等^[13]研究发现, 影响径流的因素(如降雨强度、前期含水量和植被覆盖)对 N、P 养分的流失也有很显著的影响。N、P 流失与降雨强度和前期含水量呈正相关性, 与植被覆盖呈负相关, 持续时间长和高强度降雨都会导致更高的 N、P 的养分流失。Liu 等^[14]也发现, 橘园坡地 N、P 养分流失量与径流量呈现极显著的线性关系。Liu 等^[15]以西安地区后沟农田小流域为研究对象, 得到 N 流失量(N)与径流量(R)、泥沙量(S)拟合效果最好的模型 $N = aR^bS^c$ 用于计算氮流失。在探讨养分流失规律的同时, 黄河仙等^[16]通过对比红壤坡地不同利用方式的养分流失, 指出自然植被对水土和养分的保持效果最佳, 要尽量避免单一植被和减少人工扰动。Xia 等^[17]研究发现, 农耕坡地等高植物篱笆和沟垄耕作可以有效降低地表径流的养分流失。Zhang 等^[18]研究

基金项目: 红壤地区农田水土保持关键技术研究与示范项目(2011BAD31B04)和南方丘陵集约化种植面源污染监测技术方法研究项目(201309035-3)资助。

* 通讯作者(xhpeng@issas.ac.cn)

作者简介: 吕玉娟(1987—), 女, 山东滨州人, 博士研究生, 主要从事土壤水文过程及水土流失研究。E-mail: lv_yujuan@163.com

发现,农耕区花生地从播种期到结荚期采用塑料薄膜覆盖措施,可以增加产流量,降低总氮和总磷的流失量;在增加作物产量的同时,降低土壤侵蚀。

针对南方红壤坡地,天然降雨-产流事件下的养分流失特征规律及其影响因素的研究较少,导致对区域土壤生产力下降和水体环境质量的恶化等问题较难做出准确评价。本文依托中科院鹰潭红壤农业生态实验站,基于典型红壤坡地花生地和橘园地两种土地利用方式径流小区将近 3 年(2011 年 3 月至 2013 年 12 月)的野外实测降雨产流资料及其针对降雨事件的径流养分测定,运用数学统计分析方法,探讨天然降雨条件下,红壤坡地养分流失规律特征及其径流、雨强对养分流失量的影响,以期对南方红壤丘陵区坡地养分流失控制及合理农业生产管理措施的实施提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验小区布设于江西省鹰潭市的中国科学院红壤农业生态实验站(116°55'E, 28°15'N)西北方向 4 km 外的孙家小流域。该研究区地处赣东北山区向鄱阳湖平原区的过渡带,地势平坦,以低丘岗地为主,海拔在 100 m 以下,坡度为 6°~10°,该地形在南方红壤丘陵区具有代表性。土壤类型为第四纪红黏土为母质发育的红壤,土壤质地为黏土和黏壤土,粉粒、黏粒质量分数分别为 29%~50% 和 29%~43%,土壤 pH(4.6 左右)为酸性。试验区属中亚热带温暖湿润季风气候区,年均降雨量 1 795 mm,年均气温 17.7℃。该农田流域主要土地利用方式有花生与萝卜(西瓜、油菜)轮作坡耕地,柑橘、葡萄果园地,水稻田等。

1.2 试验设计

本试验径流小区修建在坡度约为 8° 的同一坡面上,共布设 5 m × 20 m 的标准小区 4 个,小区周边设置混凝土板,其埋深 0.2 m,高出地表 0.3 m,均用水泥浇筑而成,小区坡脚出口安装自动翻斗式径流计和径流收集桶,记录径流量并收集水样(图 1)。其中,两个为橘园地径流小区,另两个为花生地径流小区。橘树属于多年生灌木,树龄在 20 年以上,每年采用根穴施肥方式,施用复合肥(N-P₂O₅-K₂O=15-15-15)一次,施肥量约 300 kg/hm²。另外,橘园根部在越冬时进行秸秆覆盖。花生于每年的 4 月下旬种植,顺坡耕作,行距 30~40 cm。施肥措施主要是在花生播种期,施用基肥,其中磷肥(P₂O₅ 12%)750 kg/hm²,钾肥(K₂O)225 kg/hm²,复合肥 150~225 kg/hm²,尿素(总氮 46%)300 kg/hm²,结荚期追施尿素 75~150 kg/hm²。两种土地利用方式表层土壤理化性质见表 1。

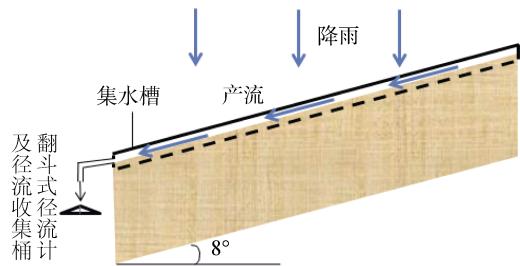


图 1 试验小区剖面图

Fig. 1 Diagram of field plots

表 1 径流小区表层土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of surface soils in field plots

土地利用方式	pH	体积质量 (g/cm ³)	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)
花生地	4.45	1.54	11.14	0.63	0.47
橘园	4.60	1.49	15.14	0.57	0.34

1.3 样品采集与测定

径流样:针对 2011 年 3 月至 2013 年 12 月期间降雨产流事件,采集径流样品。翻斗式径流计用于记录整场降雨的总径流量,翻斗计下的水桶收集径流水样。降雨产流结束后,将水桶中水样搅拌均匀后,用 250 ml 聚乙烯塑料瓶迅速采集径流混合水样,于 4℃ 冰箱中冷藏待测。用于 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、全氮(TN)及全磷(TP)的测定。

NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 浓度测定:测定前,水样需先经过 0.45 μm 微孔滤膜进行过滤,过滤液用 AutoAnalyzer-3 连续流动分析仪(德国 BRAN + LUEBBE)NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 分析模块进行测定。仪器技术参数:UV 消光器,透过透硅膜,测定波长为 550 nm(NO₃⁻-N)和 660 nm(NH₄⁺-N),进样速率为每小时 40 个样品。

TN、TP 浓度测定:TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,TP 采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定。

1.4 降雨量及径流监测

径流小区旁微气象场布设有翻斗式自记雨量计,用以记录次降雨过程和降雨量,监测时段若有异常,以红壤站气象场监测的降雨数据为准,以 6 h 无降雨划分降雨事件。径流量是由小区出口处连接的翻斗式径流计监测,翻斗事件的脉冲信号由计数器(onset computer corporation)记录,实时监测径流事件的全过程。

1.5 数据处理与计算

降雨-产流事件结束后,读取自记雨量计和翻斗式径流计的降雨和径流过程数据,统计本次降雨-产流事件的降雨量和总产流量。径流水样中测定的 N、P 养分浓度和径流 N、P 养分流失量均为 2 个重复小

区平均值。次降雨产流事件中 N、P 流失量为：

$$Q_i = C_i \times q_i \tag{1}$$

式中， Q_i 为第 i 次降雨事件养分流失量(mg/m^2)； C_i 为第 i 次降雨事件地表径流中 N(NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TN) 或 P(TP)养分质量浓度(mg/L)； q_i 为第 i 次降雨事件地表径流单位面积径流量(L/m^2)。年内地表径流 N、P 养分累积迁移负荷均为年内相应历次降雨地表径流 N、P 养分流失量累加，计算公式为：

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i, i=1, 2, 3, \dots, n \tag{2}$$

式中， Q 为累积养分迁移负荷(mg/m^2)； Q_i 为第 i 次降雨事件养分流失量(mg/m^2)； n 为年降雨产流次数。

数据分析和图形绘制借助于 SPSS 16.0 和 Origin 8.1、Excel 软件完成。

2 结果与分析

2.1 红壤坡地地表径流特征

2011 年 3 月至 2013 年 12 月期间共观测到降雨事件 171 场，年降雨量分别为 1 404、3 218 和 1 844 mm，主要集中在每年的 4—6 月。次降雨量在 1.0 ~ 284.1 mm，最大雨强在 0.4 ~ 46.1 mm/h，其中花生地产流 158 次，径流量在 0.01 ~ 142.3 mm，2011—2013 年次降雨事件年平均径流分别为 6.5、7.1 和 10.5 mm；橘园地产流 152 次，径流量在 0.01 ~

49.3 mm，2011—2013 年次降雨事件年平均径流分别为 2.4、1.9 和 1.7 mm(图 2)。2011—2013 年花生地累积径流量分别为 312.2、552.8 和 471.8 mm，橘园地累积径流量分别为 113.1、145.3 和 78.5 mm。花生地地表径流系数(0.17 ~ 0.26)显著高于橘园地(0.04 ~ 0.08)。花生属于一年生的草本类作物，地表径流量年际变化不大，橘树为多年生的灌木类，随着橘树的生长，冠层截留及根系发育导致地表径流系数显著低于花生地，且逐年降低。对次降雨事件径流量、降雨量和最大 60 min 雨强统计分析发现，花生地和橘园地表径流量均与降雨量和最大 60 min 雨强具有极显著的线性相关性($P < 0.01$)(花生地： $y = 0.299x_1 + 0.581x_2 - 8.474$ ， $R^2 = 0.71$ ， $n = 158$ ， $P < 0.01$ ；橘园： $y = 0.087x_1 + 0.095x_2 - 2.04$ ， $R^2 = 0.57$ ， $n = 152$ ， $P < 0.01$ ； x_1 ， x_2 分别表示降雨量、最大 60 min 雨强， y 表示地表径流量)。

2.2 地表径流中氮素迁移特征

2011 年 3 月至 2013 年 12 月整个观测期内，花生地地表径流中 NO_3^- -N 质量浓度变化范围为 0.002 ~ 9.63 mg/L，平均值 1.08 mg/L； NH_4^+ -N 质量浓度介于 0.018 ~ 2.50 mg/L，平均值 0.28 mg/L；橘园地表径流中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 质量浓度变化范围分别为 0.021 ~ 10.71 mg/L 和 0.003 ~ 4.21 mg/L，平均质量浓度分别为 1.27 mg/L 和 0.41 mg/L(图 3)。由地表水环

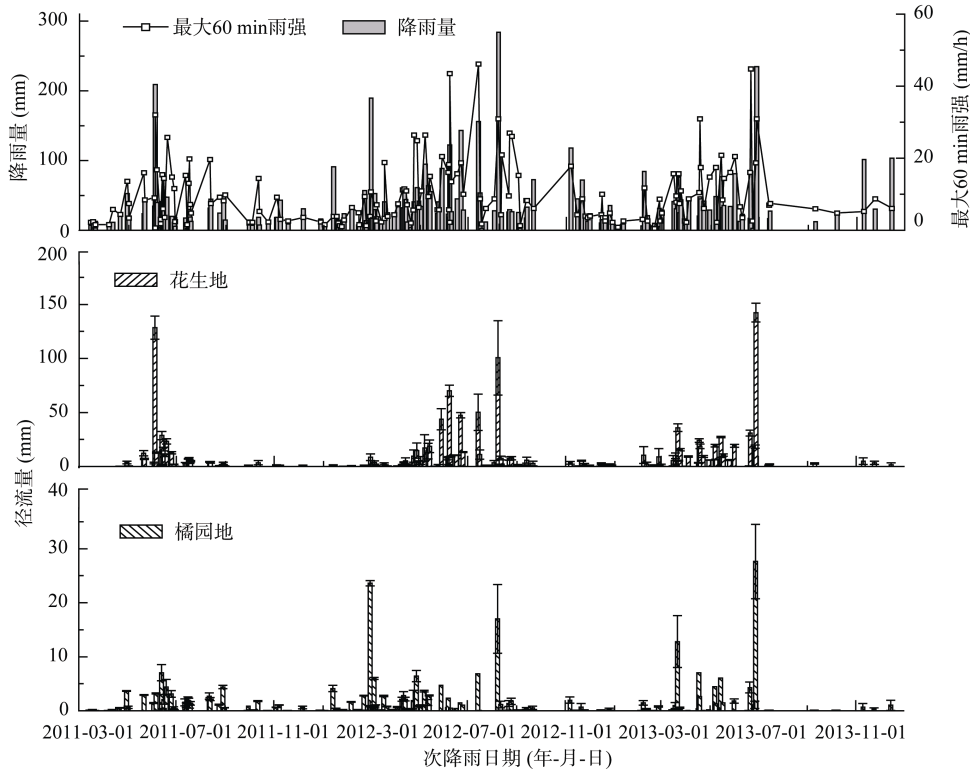


图 2 降雨量、地表径流量的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of rainfall and overland flow for peanut and citrus on slope land

境标准判断,该地表径流水质为 Ⅲ类。花生地和橘园地径流中 NO_3^- -N 浓度明显大于 NH_4^+ -N 浓度(表 2), 主要由于旱作土壤中, NO_3^- -N 是旱地植物营养主要的 N 源之一^[19], 浓度比 NH_4^+ -N 高。另一方面, NO_3^- -N 带负电, 不易被土壤胶体所吸附, 易于从土壤尤其是阴离子交换能力差的土壤淋溶流失^[20], 成为农田地表径流无机氮流失的主要成分^[21]。由于养分流失受降雨特征、植被覆盖及土壤性质等诸多方面环境因素的影响^[13], NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 迁移浓度呈现几近相反的季节性变化, 每年的降雨产流集中期(4—6月) NO_3^- -N 浓度低于其他时期, 而 NH_4^+ -N 在此时期浓度偏高, 这与有关林地研究^[22]中, 大部分季节内 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 水平变化呈显著正相关性的结论不一致。花生地和橘园地径流中 TN 浓度变化范围分别为 0.22~10.43 mg/L 和 0.25~15.20 mg/L, 平均质量浓度分别为 2.24 mg/L 和 2.41 mg/L(图 3), 超出 Ⅲ类地表水质标准。两种利用方式下, TN 的浓度相差不大, 浓度变化趋势与 NO_3^- -N 浓度一致, 表明 NO_3^- -N

是有效 N 素流失的主要形态。N 素流失浓度均表现出橘园地高于花生地, 而流失量表现为橘园地低于花生地。除受两种土地利用方式总施肥量差异影响外, 一方面由于橘园地径流量远小于花生地; 另一方面与当地农民对橘园地的管理措施有关, 比如橘树周围的稻草秸秆覆盖, 根穴施肥等均提高了土壤养分的水溶性, 导致流失浓度偏高^[23]。

全年 N 素迁移时间变化规律主要与当地的降雨特征有关, 4—6 月为当地的雨季, 该时段降雨量多, 降雨强度大, 是径流集中出现的时期, 该时段花生地与橘园地产流量分别占年径流量的 56%~84%, 32%~75%(图 2), 因而土壤 N 素的流失也主要出现在这个时期, 与径流量季节变化基本一致^[23]。该时段花生地径流中 NO_3^- -N, NH_4^+ -N, TN 流失量分别占年负荷量的 37%~66%, 69%~84% 和 57%~76%; 橘园地分别占 12%~66%, 41%~73% 和 22%~69%(图 3)。次降雨产流事件中 N 素最大流失量出现在 2012 年 8 月, 主要由于受台风雨季的影响, 产流量最大。

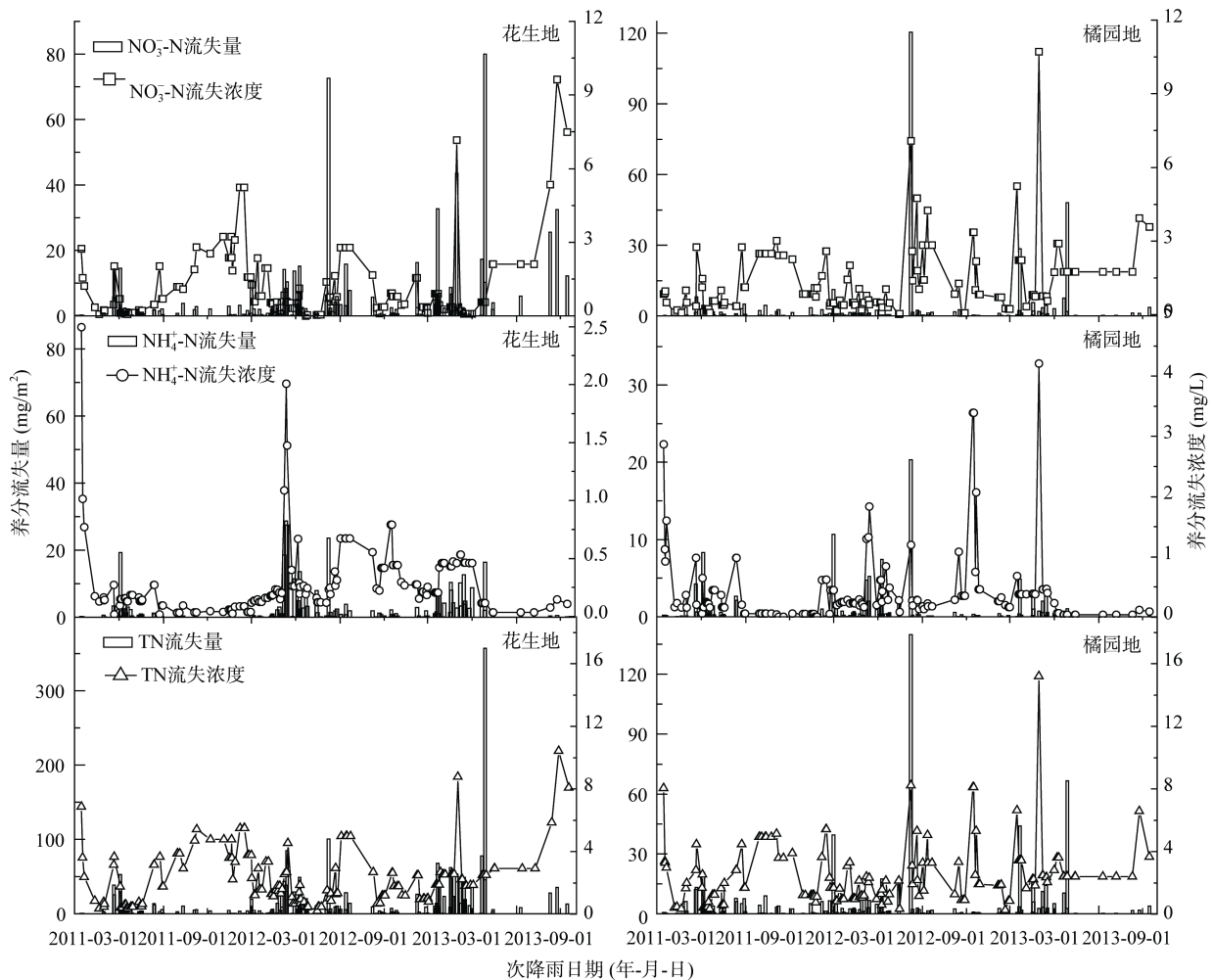


图 3 地表径流中氮素质量浓度及其流失量季节变化

Fig. 3 Seasonal patterns of nutrient concentration and transport flux through overland flow

N 素年负荷量的年际变化(表 2)显示,花生地 N 素年负荷量大于橘园地。一方面是由于农事耕作方式不同,橘园地的根穴施肥方式比花生地的顺坡耕作施肥具有更好的保水保肥效果^[16]。另一方面橘园植被覆盖率较大,冠层对降雨的截留、土壤的高渗透特性及对径流传递的阻碍作用,降低了产流量,同时减少了 N 素养分的流失^[24]。花生地 NO₃-N 和 TN 负荷逐年增加,2012 年为丰水年,径流量大,是导致年负荷量增加的主要原因。2013 年是由于花生地前期的耕作施肥措施不及时,生长后期(6 月)的翻耕施肥处于年降雨的峰值期,即使产流量低于 2012 年,但迁移浓度明显大于 2012 年(图 3),导致 2013 年的年负

荷量明显增大。

2.3 地表径流中磷素迁移特征

观测期内,花生地和橘园地的地表径流中 TP 质量浓度变化范围分别为 0.007 ~ 1.02 mg/L 和 0.008 ~ 1.08 mg/L,平均质量浓度分别为 0.29 mg/L 和 0.18 mg/L (图 4),水质介于 Ⅲ类和 Ⅳ类水之间。两种土地利用方式,径流中的 TP 质量浓度明显低于 TN 浓度,主要原因是红壤是富含铁铝的一类酸性土,P 容易被其吸附固定,迁移能力低;另外,发育于第四纪红黏土母质的红壤富 N 缺 P,导致径流中 TP 流失量较低。由此表明,该研究区 N 素流失是导致区域水体富营养化的主要原因。

表 2 2011—2013 年氮素随地表径流迁移的年际变化
Table 2 Characteristics of nutrient transport through runoff during 2011 to 2013

N 形态	指标	2011		2012		2013		平均		变异系数(%)	
		花生地	橘园	花生地	橘园	花生地	橘园	花生地	橘园	花生地	橘园
NO ₃ -N	\bar{C}_i (mg/L)	0.72	1.03	1.16	1.14	1.27	1.83	1.05	1.33	22.6	26.6
	\bar{Q}_i (mg/m ²)	1.90	1.13	3.40	2.61	8.10	3.28	6.70	2.34	39.4	38.4
	Q (mg/m ²)	72.2	42.5	261.4	188.1	346.2	121.3	226.6	191.9	50.5	31.0
NH ₄ ⁺ -N	\bar{C}_i (mg/L)	0.23	0.36	0.31	0.48	0.27	0.36	0.27	0.40	12.1	14.1
	\bar{Q}_i (mg/m ²)	1.20	0.61	2.60	1.00	2.90	0.51	2.20	0.71	33.7	29.8
	Q (mg/m ²)	47.6	28.6	194	68.2	125.2	19.0	122.3	87.0	48.9	24.5
TN	\bar{C}_i (mg/L)	1.93	2.31	2.15	2.17	2.65	2.98	2.25	2.49	13.4	14.2
	\bar{Q}_i (mg/m ²)	6.60	2.80	8.80	4.61	27.20	5.54	14.20	4.32	65.0	26.3
	Q (mg/m ²)	256.3	112.8	668.7	332.7	1169.9	205.0	698.3	497.8	53.5	18.1

注：2011 年数据为 3—12 月间； \bar{C}_i 为年均次降养分浓度， \bar{Q}_i 为年均次降雨养分流失量，Q 为年负荷量，下表同。

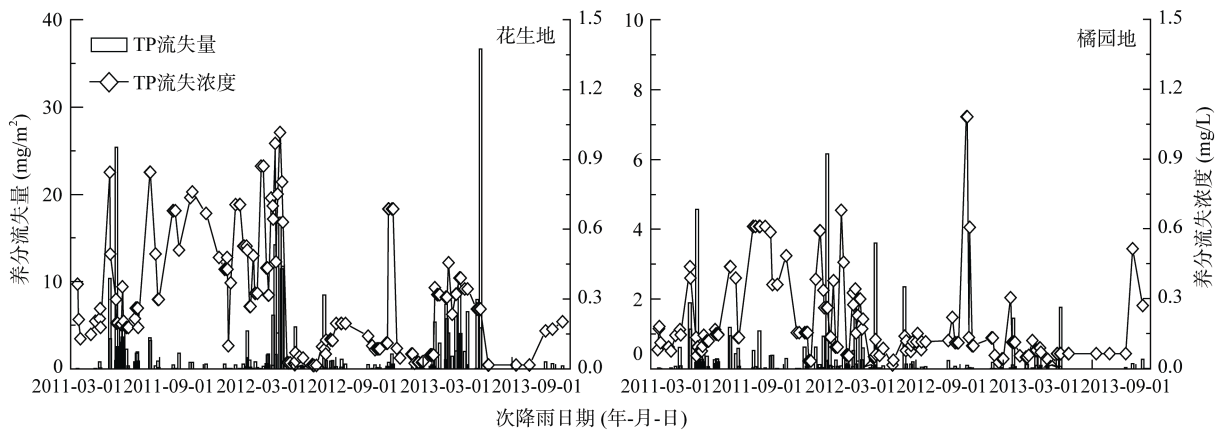


图 4 地表径流中磷素质量浓度及其流失量季节变化

Fig. 4 Seasonal patterns of phosphorus concentration and transport flux through overland flow

年际变化表现为 2011 和 2012 年相差不大,2013 年浓度降低。流失量的季节变化与 N 素季节变化相似,集中出现在每年径流产生的高峰期 4—6 月,该时段花生地和橘园 TP 流失量占年负荷量的比例分别为 74%~90%、41%~61%(图 4)。花生地 TP 流失量的年均变化为(2.1 ± 0.7)mg/m²,约为橘园地流失量的

7 倍,花生地年均负荷量为 104 mg/m²,约为橘园地的 6 倍(表 3)。

2.4 养分流失量影响因素

2.4.1 降雨强度 降雨特征直接影响到坡地的土壤侵蚀产流产沙特征,因而也会对养分流失产生重要影响。雨量和雨型对养分流失量有明显影响^[25],但由

于降雨量对养分迁移的影响不如雨强明显,因此降雨特征与养分迁移关系研究多集中于降雨强度与养分

流失关系^[12]。本研究以连续最大 60 min 雨强(I_{60})作为降雨强度参数,研究其与养分流失量的关系(表 4)。

表 3 2011—2013 年期间磷素随地表径流迁移的年际变化
Table 3 Characteristics of phosphorus transport through runoff during 2011 to 2013

指标	2011		2012		2013		平均		变异系数(%)	
	花生地	橘园	花生地	橘园	花生地	橘园	花生地	橘园	花生地	橘园
\bar{C}_i (mg/L)	0.37	0.24	0.33	0.20	0.19	0.09	0.29	0.18	26.6	35.2
\bar{Q}_i (mg/m ²)	2.10	0.39	1.40	0.35	2.80	0.17	2.10	0.31	27.2	30.9
Q (mg/m ²)	83.3	16.2	109	26.0	119	6.30	104	16.2	14.5	49.6

表 4 养分流失量与最大 60 min 雨强(I_{60})回归分析
Table 4 Regression analysis of transport flux and the max rainfall intensity of 60 min

土地利用	养分	回归模型	R^2	F 值	Sig.	n
花生地	NO ₃ -N	$y = 0.040I_{60}^{1.56}$	0.44	121.77	0.00	158
	NH ₄ ⁺ -N	$y = 0.0048I_{60}^{2.12}$	0.54	182.61	0.00	158
	TN	$y = 0.085I_{60}^{1.76}$	0.55	186.57	0.00	157
	TP	$y = 0.0067I_{60}^{1.94}$	0.52	166.50	0.00	158
橘园	NO ₃ -N	$y = 0.029I_{60}^{1.27}$	0.37	88.64	0.00	151
	NH ₄ ⁺ -N	$y = 0.0045I_{60}^{1.59}$	0.40	100.53	0.00	151
	TN	$y = 0.058I_{60}^{1.37}$	0.46	124.95	0.00	151
	TP	$y = 0.0048I_{60}^{1.30}$	0.32	64.36	0.00	152

N 和 P 素流失量与最大 60 min 雨强的相关分析(表 4)表明,养分流失量与最大 60 min 雨强具有明显的相关关系($P < 0.01$)。土壤养分流失量随雨强的增加而增加,幂函数拟合模型相关系数(R^2)在 0.32 ~ 0.55,拟合效果较好。花生地相关系数比橘园地要高,由于花生地植被覆盖低于橘园地,对雨滴动能的削弱作用低于橘园地,由此导致对同一养分指标,幂函数指数值表现为花生地大于橘园地,相同雨强条件下,花生地养分的流失量大于橘园地。

雨强大小决定产流方式,影响养分流失形态。当雨强较小时,径流主要以蓄满产流为主,流速慢,可溶性养分更多通过径流途径流失,当雨强较大时,径流主要以超渗产流为主,流速较快,非可溶性养分以物理冲刷形式被带走,以泥沙结合态流失为主^[9-10, 26-27]。该红壤坡地研究区产流方式主要以蓄满产流为主^[28],径流中养分流失量与雨强的幂函数关系只适用于在一定雨强范围内,这还需在明确产流机制的前提下,进一步探讨分析养分随径流和泥沙两种流失途径的流失规律。

2.4.2 径流量 土壤侵蚀受降雨和径流特征的影响,养分流失量直接受控于径流量的大小^[14]。两种土地利用方式下,次降雨事件中 N 和 P 养分流失量与径流量的相关关系如图 5 所示,线性和幂函数两种函数关系拟合分析表明,次降雨事件中 NO₃-N、

NH₄⁺-N、TN 和 TP 流失量与产流量有显著相关性($P < 0.01$)。幂函数模型的拟合关系式绝对系数(R^2)均大于 0.70,且大于相应的线性拟合式绝对系数(0.18 ~ 0.72),拟合效果最好。有研究^[14]也发现,TN 和 TP 流失量与径流量线性拟合效果最好。两种土地利用养分流失量与径流量幂函数拟合关系式比较发现,在径流量增加相同的情况下,橘园地 NO₃-N 和 NH₄⁺-N 流失量的增加大于花生地,而 TN 和 TP 流失量增加则表现为花生地大于橘园地。可能是由于橘园植被覆盖度高,其在有效地减少土壤 TN、TP 流失的同时,增加了 NO₃-N 和 NH₄⁺-N 的流失^[24],这与监测到的橘园地径流中 NO₃-N 和 NH₄⁺-N 浓度大于花生地的现象一致。

3 结论

近 3 年径流小区养分流失的连续观测,花生地和橘园地表径流中 N 素流失以 NO₃-N 为主,径流中 NO₃-N 浓度显著高于 NH₄⁺-N 浓度。N 素流失量的季节变化与径流量变化一致,集中出现在每年径流产生的高峰期 4—6 月。P 素流失量的季节变化与 N 素季节变化相似,但是 TP 迁移浓度明显低于 TN。氮素和磷素的年负荷量均表现为花生地大于橘园地。通过回归分析,降雨强度(I_{60})和径流量是影响氮磷养分流失的主要因素,均与养分流失量呈显著的幂函数关

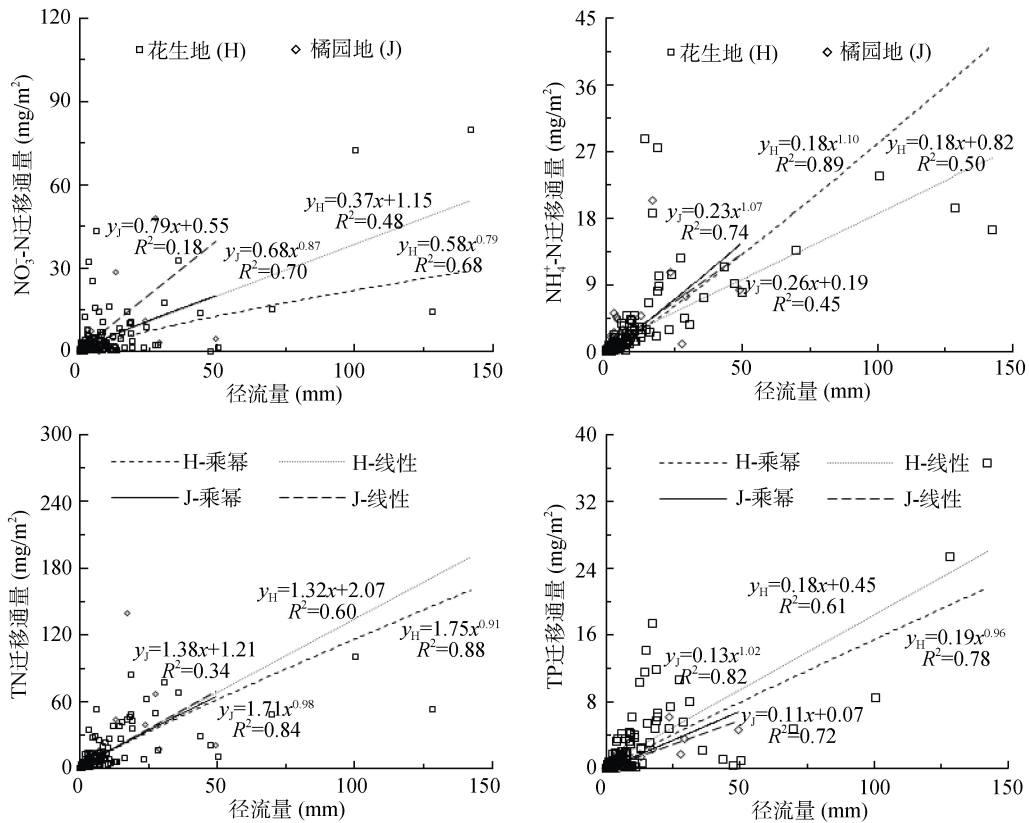


图 5 养分流失量与径流量的相关关系

Fig. 5 Relationship between transport flux of nitrogen and phosphorus and runoff in two land use treatments

系。因此，红壤区坡地发展果园有利于水土养分的保持，加强每年降雨产流高峰期(4—6月)的肥料施用管理及其相关防控措施的实施，可有效控制该区域的养分流失。

参考文献：

[1] 张展羽, 吴云聪, 杨洁, 邢栋, 王凌云. 红壤坡耕地不同耕作方式径流及养分流失研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 241-246

[2] 曹学章, 张更生. 红壤丘陵脆弱生态环境的形成与整治对策[J]. 农业生态环境, 1995, 11(4): 45-48

[3] Choi GC, Lee JH, Yu JC, Ju DJ, Park JJ. Laboratory assessment of biofilm process and its microbial characteristics for treating nonpoint source pollution[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2011, 28(5): 1 207-1 313

[4] Dou PQ, Wang XY, Wang LH. Research progress on the mechanism of nitrogen and phosphorus in non-point source pollution[J]. J. Cap. Norm. Univ., 2006, 27(2): 93-98

[5] Zhang H, Zeng FT, Fang HY, Zhang HJ, Xiao JE, Guo QW, Zeng D, Ou YZ. Impact of consecutive rainfall on nonpoint source pollution in the Danshui River catchment. Acta Scientiae Circumstiae, 2011, 31(5): 927-934

[6] 邵明安, 张兴昌. 坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型[J]. 世界科技研究与发展, 2001, 23(2): 7-12

[7] 刘洋, 张展羽, 张国华, 左长清, 赵月芬. 天然降雨条件下不同水土保持措施红壤坡地养分流失特征[J]. 中国水

土保持, 2007(12): 14-16

[8] 张展羽, 左长清, 刘玉含, 张靖宇. 水土保持综合措施对红壤坡地养分流失作用过程研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 41-45

[9] 马琨, 王兆骞, 陈欣, 尤力. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 16-19

[10] 吴希媛, 张丽萍, 张妙仙, 倪含斌, 王辉. 不同雨强下坡地氮流失特征[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4 576-4 582

[11] 王兴祥, 张桃林, 张斌. 红壤旱坡地农田生态系统养分流循环和平衡[J]. 生态学报, 1999, 19(3): 335-341

[12] 王全九, 王力, 李世清. 坡地土壤养分迁移与流失影响因素研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(12): 109-114, 119

[13] Liu RM, Wang JW, Shi JH, Chen YX, Sun CC, Zhang PP, Shen ZY. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468-469: 1 069-1 077

[14] Liu Y, Tao Y, Wan KY, Zhang GS, Liu DB, Xiong GY, Chen F. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 110: 34-40

[15] Liu Q, Li ZB, Li P. Effect of runoff dynamic on sediment and nitrogen losses in an agricultural watershed of the Southern Shaanxi region, China[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2014, 42(1): 56-63

- [16] 黄河仙, 谢小立, 王凯荣, 殷芙蓉. 不同覆被下红壤坡地地表径流及其养分流失特征[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1 645-1 649
- [17] Xia LZ, Liu GH, Ma L, Yang LZ. The effects of contour hedges and reduced tillage with ridge furrow cultivation on nitrogen and phosphorus losses from sloping arable land[J]. Journal Soils Sediments, 2014, 14: 462-470
- [18] Zhang HY, Liu QJ, Yu XX, Wang LZ. Influences of mulching durations on soil erosion and nutrient losses in a peanut (*Arachis hypogaea*) cultivated land[J]. Nature Hazards, 2014, 72: 1 175-1 187
- [19] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 115
- [20] 莫江明, 彭少麟, 方运霆, 郁梦德, 孔国辉, 张佑昌. 鼎湖山马尾松针阔叶混交林土壤有效氮动态的初步研究[J]. 生态学报, 2001, 21(3): 492-497
- [21] 焦平金, 许迪, 王少丽, 王友贞, 汤广民. 自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 534-540
- [22] 莫江明, 郁梦德, 孔国辉. 鼎湖山马尾松人工林土壤动态氮和铵态氮动态研究[J]. 植物生态学, 1997, 21(4): 335-341
- [23] 袁东海, 王兆骞, 陈欣, 郭新波, 张如良. 红壤小流域不同利用方式氮磷流失特征研究[J]. 生态学报, 2003, 23(1): 188-198
- [24] 张兴昌, 刘国彬, 付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J]. 环境科学, 2000(6): 16-19
- [25] 张展羽, 张卫, 杨洁, 吴云聪, 汪邦稳, 张杰. 不同尺度下梯田果园地表径流养分流失特征分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 105-109
- [26] 白红英, 唐克丽, 陈文亮, 查轩, 史瑞云. 坡地土壤侵蚀与养分流失过程的研究[J]. 水土保持通报, 1991, 11(3): 14-19
- [27] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 71-74
- [28] 罗春燕, 涂仕华, 庞良玉, 黄晶晶, 林超文. 降雨强度对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 24-27
- [29] Wei L, Zhang B, Wang M. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94: 54-62

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses Through Surface Runoff on Sloping Land, Red Soil Hilly Region

LV Yu-juan, PENG Xin-hua*, GAO Lei, ZHANG Zhong-bin

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China)

Abstract: Agricultural nonpoint source (NPS) pollution has become a main contributor to water quality problems. Researches on characteristics of nitrogen (N) and phosphorus (P) losses from slope farmland and their factors are basic to understand how to increase land productivity and to improve water quality. This study analyzed the characteristics of N and P losses, and their relation with rainfall intensity and runoff on red soil sloping land under peanut and citrus land uses. The data of surface runoff and nutrient losses were collected from four erosion plots (two from peanut field and the other two from citrus orchard) during the period from March, 2011 to Dec, 2013. The results showed that the peanut field produced significantly higher amount of N and P losses than citrus orchard did, but N concentrations were in contrast. The seasonal and annual variations of N and P losses were consistent with the pattern of surface runoff. The amount of N loss was positively correlated with the surface runoff ($P < 0.01$). NO_3^- -N was the main form of dissolved N loss. P loss was less than N loss for the two land uses. The N and P losses peaked in April to June when the rainfall accounted for a large portion of annual precipitation. The rainfall intensity and runoff amount both showed significant power function relationship with nutrient loss. Orchard citrus land uses would be more useful than peanut slope farmland to soil-water conservation on red soil sloping land. Fertilizer management and related control measures should be measured in the peak of annual rainfall-runoff in this region.

Key words: Red-soil slope-lands; Rainfall intensity; Surface runoff; Nutrient loss