

不同土地利用方式下红壤磷素径流流失特征

刘娟^{1,3}, 张乃明^{2,3}, 徐红娇^{2,3}, 张淑香⁴

(1.云南农业大学植物保护学院,昆明 650201;2.云南农业大学资源与环境学院,昆明 650201;

3.云南省土壤培肥与污染修复工程实验室,昆明 650201;4.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

摘要: 土壤磷素流失已成为地表水富营养化的重要威胁,红壤在我国分布范围广、分布面积大,研究红壤磷素累积与流失特征可为红壤区农业面源污染控制、防止区域地表水污染提供科学依据。选取红壤区牧草地、休闲地、玉米地、菜地、大棚 5 种常见土地利用方式,采用人工模拟降雨方法,研究了红壤区不同土地利用方式下磷素累积状况、形态组成和随地表径流的迁移特征及其环境阈值。结果表明:(1)供试土壤 Olsen-P 含量的范围为 6.81~178.17 mg/kg,土壤溶解态活性磷(CaCl₂-P)含量的范围为 0.29~8.26 mg/kg,藻类可利用总磷(NaOH)的变化范围为 30.34~369.81 mg/kg,不同利用方式红壤中均存在一定程度的磷素累积;(2)不同利用方式红壤的磷吸附指数 PSI 范围为 31.95~47.05,均值大小表现为牧草地>玉米地>菜地>休闲地>大棚;(3)红壤地表径流中 TP 的浓度范围为 0.245~2.073 mg/L, TDP 浓度范围为 0.023~0.308 mg/L, PP 浓度范围为 0.223~1.826 mg/L,不同场次降雨地表径流中 TP 和 PP 平均浓度和流失量大小与土壤表层 Olsen-P 含量分布规律一致, TDP 平均浓度表现为大棚>菜地>旱地玉米>牧草地>休闲地,而 TDP 流失量却表现为大棚>菜地>牧草地>休闲地>旱地玉米;径流输出以 PP 为主,占 TP 的比例为 82.46%~90.15%;(4)土壤 Olsen-P 与 NaOH-P 和 CaCl₂-P 存在极显著正相关,随着 Olsen-P 含量的增加,NaOH-P 和 CaCl₂-P 提高,且 Olsen-P 与 NaOH-P 之间存在一个明显的“突变点”,确定 36.17 mg/kg 为红壤磷素流失的环境阈值,同时还指出,径流 TP 浓度或流失量与土壤 NaOH-P 含量呈显著正相关。

关键词: 土地利用方式; 红壤; 环境阈值; 磷吸附指数

中图分类号: S158.5; X522

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)05-0103-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.015

Characteristics of Phosphorus Runoff Loss in Red Soil Under Different Land Use Patterns

LIU Juan^{1,3}, ZHANG Naiming^{2,3}, XU Hongjiao^{2,3}, ZHANG Shuxiang⁴

(1.College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201;

2.College of Resource and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201;

3.Yunnan Soil Fertility and Pollution Restoration Laboratory, Kunming 650201; 4.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The loss of soil phosphorus has become an important threat to the eutrophication of surface water. Red soil is widely distributed in China, and its distribution area is large. The study on phosphorus accumulation and loss in red soil can provide scientific basis for controlling agricultural non-point source pollution and preventing regional surface water pollution. In this study, 5 common land use patterns including pasture, leisure land, dry land corn, vegetable land, and greenhouse were selected, and using artificial rainfall simulation method, the forms of phosphorus accumulation, the characteristics of phosphorus transfer with surface runoff and the environmental threshold under different land use types in red soil region were studied. The result showed that: (1) Soil Olsen-P contents of red soils ranged from 6.81 to 178.17 mg/kg, CaCl₂-P contents ranged from 0.29 to 8.26 mg/kg, and NaOH contents ranged from 30.34 to 369.81 mg/kg, P accumulated in red soil among the different land use patterns; (2) The PSI ranged from 31.95 to 47.05 in red soil under different land use patterns, and the mean values were as follows: Grassland > Corn field > Vegetable field > Leisure area > Greenhouse; (3) The concentration of TP in surface runoff of red soil was 0.245 ~

收稿日期:2020-03-11

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0201208-2)

第一作者:刘娟(1990—),女,博士研究生,主要从事农用化学物质与环境研究。E-mail:15587214232@163.com

通信作者:张乃明(1963—),男,博士,教授,主要从事土壤培肥与污染修复研究。E-mail:zhangnaiming@sina.com

2.073 mg/L, TDP was 0.023 ~ 0.308 mg/L, and PP was 0.223 ~ 1.826 mg/L under different land use patterns. The average concentrations and losses of TP and PP in surface runoff of different rainfall events were consistent with the Olsen-P content in the soil surface layer, the average concentrations and losses of TDP in the order of greenhouse > Vegetable field > Corn field > Grassland > Leisure area and Greenhouse > Vegetable field > Grassland > Leisure area > Corn field, respectively. PP was the dominant form of TP in runoff under different land use patterns, which account for 82.46% ~ 90.15% of TP; (4) There was a very significant positive correlation between soil Olsen-P and NaOH-P and CaCl₂-P. As the content of Olsen-P increased, the NaOH-P and CaCl₂-P increased, and there was an obvious "Change-point", 36.17 mg/kg was determined as the red soil phosphorus environmental threshold. It was also pointed out that there was a significant positive correlation between the runoff TP concentration or loss and soil NaOH-P content.

Keywords: land use pattern; red soil; environmental threshold; phosphate sorption index

磷是作物生长必需的营养元素之一,同时也是造成水体富营养化的主要限制因子^[1]。在各类土壤中以旱地红壤缺磷最为严重^[2],为了提高农作物产量,需要大量施用磷肥,由于红壤本身铁、铝、锰等无机胶体对磷的固定作用,施入土壤中的磷肥,不同程度地被固定,生成磷酸铁铝化合物并通过水解、氧化等复杂的化学转化过程,成为作物难以吸收利用的磷,导致红壤全磷含量不低的情况下有效磷的缺乏^[3]。随着磷肥的不断投入,红壤中磷素累积超过一定的限度就会增加土壤磷素的流失潜力,导致农田径流中磷素浓度的升高,加速水体富营养化过程^[4]。已有研究^[5]表明,农田地表径流中磷的浓度与土壤磷素水平显著相关,在过去的几十年,长期不合理施肥引起土壤磷素累积而造成的非点源污染是一个突出的问题^[6],在许多水环境保护中,点源污染集中,控制难度小,而农业面源污染来源广,控制难度大,随着点源治理水平不断提高,磷素面源污染研究的重要性更加凸显。

红壤主要分布于长江以南的低山丘陵区,红壤带内耕地面积约占全国耕地总面积的36%,是我国重要的耕地土壤^[1]。红壤区大多河网密布,湖泊水库众多,年均降雨量大、降雨季集中且单点暴雨发生的频率较高,导致红壤地区的水土流失现象十分严重,土壤磷素经地表径流输入地表水环境的风险也大。红壤在长期的成土过程中,由于脱硅富铝化作用,致使红壤大部分都是低产土壤,速效磷含量极低,成为农业生产上主要的限制因素之一^[7],在农业生产中需要大量地施用化学磷肥来维持作物产量,但是在某些区域由于长期过量和不合理的施肥再叠加水土流失的影响^[8],在降雨侵蚀过程中不仅导致磷素等养分流失和土壤生产力的下降,而且磷素随地表径流流出农田汇入各种水体,引起地表水污染,成为水体富营养化的重要限制因子^[9]。目前,在红壤区域土壤磷素累积与释放的研究中尚未明确不同利用方式下红壤中磷素随径流流失的特征。本文针对红壤利用现状,选取

牧草地、休闲地、旱地玉米、菜地和大棚5种常见土地利用方式,研究不同利用方式下磷素随地表径流的迁移特征及其环境阈值,为红壤区磷素的管理以及区域非点源污染控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市宜良县(25°06'07"—25°06'30'N,103°20'20"—103°22'19'E),该区属于北亚热带季风气候,冬春干旱少雨,夏秋多雨湿润,年均气温16.3℃,年均降水量898.9mm,其中,5—10月为雨季,占全年降水量的80%~85%。地势北高南低,山地与盆地相间,其中山地占88%,盆地占8%,全县平均海拔在1500~1800m。境内河网密布,有大小河流36条,属珠江流域西江水系,县境内径流面积>100km²。宜良县土壤以红壤为主,占土壤总面积的85.1%。土地利用方式主要有林地、农田和荒草地等。

1.2 土壤样品采集

根据红壤区的土地利用现状,本研究取最具代表的5种土地利用方式:牧草地、休闲地、玉米地、菜地和大棚作为试验对象,5种土地利用方式大致分为高(菜地和大棚)、中(休闲地和玉米地)、低(牧草地)3种含磷水平的土壤,牧草地土壤采自宜良县明月大村(25°06'45"N,103°20'33"E),海拔1750m,坡度5°~15°,连续5年没施任何肥料;休闲地土壤采自宜良县九乡风景区(25°06'30"N,103°22'19"E),主要种植小麦,小麦种植期间施用复合肥300kg/hm²,休耕期间不施用任何肥料,所在区域海拔1612m,坡度3°~5°;玉米地土壤采自宜良县九乡大山街(25°06'07"N,103°20'34"E),连作玉米,复合肥300kg/hm²,所在区域海拔1846m,坡度5°~8°;菜地土壤采自(25°06'10"N,103°20'20"E),前作为洋葱,复合肥300kg/hm²,磷肥450kg/hm²,所在区域海拔为1716m,坡度低于5°;大棚土壤采自宜良县庚家营乡(25°00'50"N,103°14'14"E),海拔1920m,坡度0~5°。5种土

地利用方式在研究区内具有典型性和代表性。于 2017 年 4 月按照随机多点混合采样法,采集 0—20 cm 的农田耕层土壤,经过风干后过 2 mm 孔径筛,去

除土样中的根茬、动物残体和石块等杂物混匀备用。于 2017 年 5 月测定土壤的基本性质,供试土壤的基本情况见表 1 和表 2。

表 1 供试土壤化学性状

土地利用方式	pH	有机质 OM/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷 AP/ (mg · kg ⁻¹)	全磷 TP/ (g · kg ⁻¹)	无定形氧化铁 Fe/ (mg · kg ⁻¹)	无定形氧化铝 Al/ (mg · kg ⁻¹)
牧草地	6.12	17.10	6.81	0.62	302.10	10.30
休闲地	5.57	14.33	29.07	0.63	284.23	10.34
玉米地	4.79	24.24	27.24	0.64	407.57	9.87
菜地	4.92	24.07	63.88	0.99	507.67	11.28
大棚	7.18	66.30	178.17	1.67	263.54	8.95

表 2 供试土壤物理性状

土地利用 方式	颗粒组成/%			土壤 质地
	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	>0.02~2.0 mm	
牧草地	40	22	38	壤质黏土
休闲地	31	7	61	砂质黏土
玉米地	33	29	38	壤质黏土
菜地	33	21	46	壤质黏土
大棚	31	31	38	壤质黏土

1.3 试验设计

试验采用人工模拟降雨法,人工降雨装置采用的是南京林业大学人工模拟降雨实验室(南林电子)生产的 NLJY—10 型人工模拟降雨控制系统,降雨强度的变化范围为 6~120 mm/h,降雨过程由计算机自动控制。喷头类型为散喷型,降雨高度 16 m,有效降雨面积 40 m²,该人工模拟降雨控制系统通过雨滴的终点速度以及大、中、小雨滴所占比例数(雨滴分布)来控制精度,雨滴直径大小的采用色斑法测定,雨滴终点速度采用高速摄影法校验,在进行降雨试验前对不同降雨强度进行率定,降雨期间在地面设置 8 个雨量筒,根据雨量筒观测的降雨量取其平均值,进行降雨均匀度的测定和雨强标定,率定后降雨均匀系数达 95% 以上,雨滴降落终速可达到自然雨滴的 99%,降雨特性接近天然降雨^[10]。试验采用长×宽×高为 70 cm×28 cm×22 cm 的容器作为盛土容器(土槽),装入等量 0—20 cm 耕层土,为了确保填装土壤的均匀,试验采用分层填装的方法进行填装,即每隔 5 cm 填装 1 层,在填装下层之前,抓毛上层已填进土壤的表面,防止土层之间出现分层现象,同时,通过分层装土和压实的方法控制土壤容重,确保填装好的土壤容重保持在 1.3 g/m³。每个土槽为 1 个处理,用广口瓶收集径流水溶液。试验共设置了 1 个降雨强度和 1 个坡度。雨强的设置结合了红壤区降雨的发生频率,设计为 60 mm/h;平地发生地表径流的可能性很小,地表径流多发生在坡地,红壤区耕地大部分坡度在 5°~15°,因此降雨坡度设计为 8°;每周降雨 1 次,单

场降雨时间设置为 32 min,每隔 4 min 收集 1 次径流样品,记录径流体积,径流结束后取各时段采集的径流样进行测定,每种土地利用方式均设置 3 个重复。

1.4 测定指标与方法

径流中总磷(TP)浓度采用过硫酸钾—钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)^[11]测定;可溶性总磷(TDP)浓度采用 0.45 μm 孔径滤膜过滤,过硫酸钾—钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)^[11]测定;溶液中钼酸盐反应磷(MRP)采用 0.45 μm 滤膜过滤,钼锑抗直接显色分析样品磷含量;颗粒磷(PP)为 TP 与 TDP 的差值;可溶性有机磷(DOP)为 TDP 与 MRP 的差值;

土壤 pH 采用玻璃电极法测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾—外加热法测定;土壤全磷含量采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定;土壤有效磷含量(Olsen—P)采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 溶液浸提,钼锑抗比色法测定;土壤中藻类可利用总磷(NaOH—P)采用 0.1 mol/L NaOH 溶液浸提,钼锑抗比色法^[12]测定;土壤中溶解态活性磷(CaCl₂—P)采用 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液浸提,钼锑抗比色法^[13]测定。土壤磷吸持指数 PSI;在水土比为 10:1 的条件下,按每克土加入磷酸盐 1.5 mg P,平衡后测得的土壤吸磷量 X(mg/g)与平衡溶液中磷浓度 C(μmol/L)的对数值之比为 PSI,即 PSI=100 X/lg C^[12]。机械组成采用吸管法测定;无定形氧化铁采用草酸铵溶液提取—邻菲罗啉显色法测定;无定形氧化铝采用草酸铵溶液提取—铝试剂比色法^[14]测定。

1.5 数据统计分析

试验数据采用 Excel 2016 软件进行整理和作图,采用 SPSS 18.0 软件进行方差分析、多重比较等统计分析,所有结果数据均采用 3 次平行降雨试验所获数据的平均值。

场降雨径流污染物流失量的计算公式为:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n c_i v_i}{s_0}$$

式中: L 为流失量(mg/m^2); c_i 为取样段内污染物浓度(mg/L); v_i 为取样时间段内径流体积(L); n 为降雨取样次数; S_0 为径流槽面积(m^2)。

土壤 Olsen-P 含量与 NaOH-P 或 CaCl_2 -P 之间的关系采用分段线性模型(Split-line Model)进行拟合。采用数学方法,以不偏离突变点为基础,分别计算关系方程,使高 Olsen-P 含量与 NaOH-P 或 CaCl_2 -P 之间的关系方程斜率最大,相关系数最高,而使低 Olsen-P 含量与 NaOH-P 或 CaCl_2 -P 之间的关系方程斜率最小,再根据这 2 个方程计算土壤磷素环境阈值^[15]。

2 结果与分析

2.1 不同利用方式红壤各形态磷含量及吸持指数

土壤中的磷素累积与径流中磷素浓度有着密切关系,土壤中磷素水平提高的同时,也相应地增加了土壤磷素流失的潜能,讨论土壤中磷素累积状况对于研究土壤磷素流失有着重要意义。由表 3 可知,供试土壤 Olsen-P 含量的范围为 6.81~178.17 mg/kg ,其平均值大小为大棚>菜地>休闲地>玉米地>牧草地。将 5 种土地利用方式的 Olsen-P 与全国第二次土壤普查的养分分级标准^[16]进行比较,大棚和菜地处于 1 级标准,休闲地和旱地玉米处于 2 级标准,牧草地处于 4 级标准。

表 3 不同利用方式红壤土壤各形态磷含量及吸持指数

土地利用方式	藻类可利用磷 (NaOH-P)/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	溶解态活性磷 (CaCl_2 -P)/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 (Olsen-P)/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	PSI
牧草地	56.80±7.60d	0.29±0.03c	6.81±0.93d	47.05±4.11a
休闲地	30.34±3.00e	1.77±0.24b	29.07±4.29c	36.64±1.03c
玉米地	82.01±3.72c	1.52±0.12b	27.24±2.83c	41.77±1.46b
菜地	138.41±3.57b	1.83±0.22b	63.88±4.06b	37.95±2.92bc
大棚	369.81±26.07a	8.26±0.12a	178.17±14.66a	31.95±2.05d

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同利用方式红壤土壤各形态磷含量差异显著($P<0.05$)。

供试土壤溶解态活性磷(CaCl_2 -P)含量的范围为 0.29~8.26 mg/kg ,其中,大棚土壤中的 CaCl_2 -P 含量最高,其平均值为 8.26 mg/kg ,显著高于其他土地利用方式。牧草地土壤中的 CaCl_2 -P 含量最低,其平均值为 0.29 mg/kg ,显著低于其他土地利用方式。而休闲地、玉米地和菜地土壤中的 CaCl_2 -P 含量差异不显著。不同土地利用方式藻类可利用总磷(NaOH)的变化范围为 30.34~369.81 mg/kg ,土壤表层 NaOH-P 的均值大小为大棚>菜地>玉米地>牧草地>休闲地。从方差分析来看,休闲地和玉米地之间 NaOH-P 差异不显著,其他土地利用方式均达到了显著性水平。

土壤中磷的化学行为主要受吸持、解析过程的控

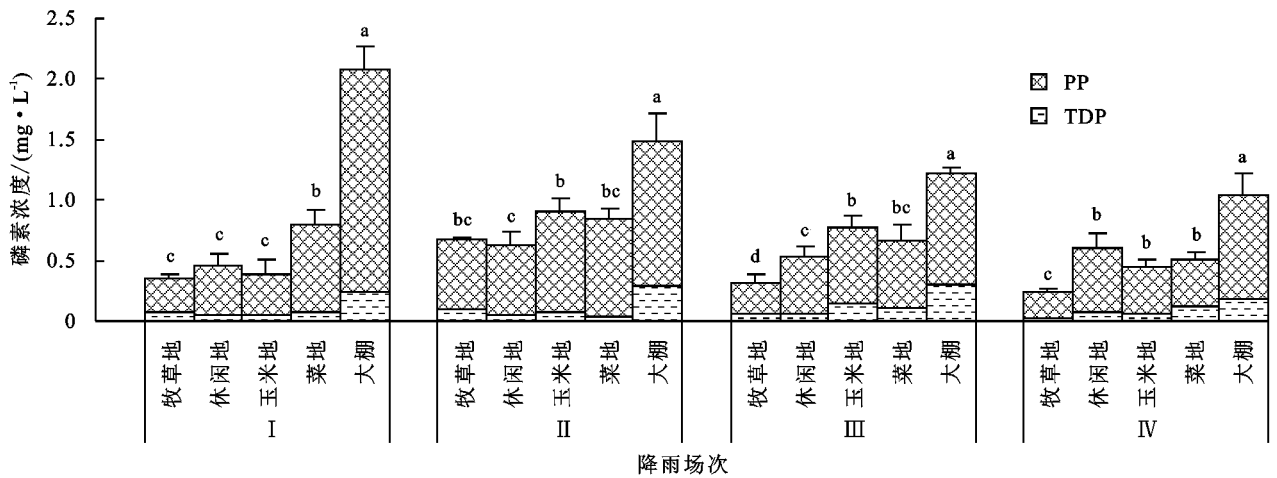
制,PSI 可以表征土壤的固磷能力,土壤磷吸持指数越大,说明土壤中的磷越容易被吸附,而土壤磷吸持指数越小,说明土壤中的磷越容易发生迁移。对 5 种土地利用方式土壤磷吸持指数进行的分析计算得出,不同利用方式下红壤 PSI 范围为 31.95~47.05,从均值来说牧草地>玉米地>菜地>休闲地>大棚,在这些土地利用方式中,牧草地的土壤磷吸持指数最大,与其他土地利用方式相比,均达到了显著性水平,而大棚磷吸持指数最小,与其他土地利用方式相比,也都达到了显著性水平。

2.2 不同利用方式红壤地表径流中磷浓度的差异

地表径流中磷的总浓度及磷的形态均关系到流域水质的好坏及磷素的利用、流失情况。由图 1 可知,不同利用方式下红壤地表径流中 TP 的浓度范围为 0.245~2.073 mg/L ,TDP 浓度范围为 0.023~0.308 mg/L ,PP 浓度范围为 0.223~1.826 mg/L ,在这 4 场降雨中,不同利用方式径流中 TP 最低浓度均高于我国 V 类地表水(湖库)的标准(0.20 mg/L)(GB 3838-2002)^[17],说明由降雨引起的牧草地、休闲地、玉米地、菜地和大棚径流进入到水环境后对水质影响大。不同场次降雨地表径流中 TP 和 PP 平均浓度大小表现为大棚>菜地>玉米地>休闲地>牧草地,而 TDP 平均浓度大小为大棚>菜地>玉米地>牧草地>休闲地。从各形态磷占总磷的比例来看,牧草地、休闲地、玉米地、菜地和大棚径流液中 TDP 浓度分别占 TP 浓度的 16.40%,10.09%,12.57%,12.00%,17.53%,而径流液中 PP 浓度分别占 TP 浓度的 83.40%,89.91%,87.43%,88.00%,82.47%,说明颗粒态磷是不同利用方式红壤径流中磷素流失的主要形态。

2.3 不同利用方式红壤地表径流中磷流失量

由图 2 可知,不同利用方式红壤 TP 流失量范围为 7.30~51.80 mg/m^2 ,TDP 流失量范围为 0.35~8.47 mg/m^2 ,PP 流失量范围为 5.66~45.63 mg/m^2 ,不同利用方式下 TP 和 PP 流失量大小为大棚>菜地>休闲地>玉米地>牧草地,TDP 流失量大小为大棚>菜地>牧草地>休闲地>玉米地。径流中 TP 流失量与土壤表层 Olsen-P 含量大小顺序一致,说明土壤表层磷素流失量大小可能受到了土壤表层速效磷含量的影响,径流液磷素流失量与土壤速效磷含量具有一致性。从各形态磷占总磷的比例来看,不同利用方式下 TDP 占 TP 的比例为:牧草地 16.41%,休闲地 9.85%,玉米地 9.86%,菜地 11.27%,大棚 17.54%;PP 占 TP 的比例为:牧草地 83.59%,休闲地 90.15%,玉米地 90.14%,菜地 88.73%,大棚 82.46%,由此可见径流液中土壤表层磷素以颗粒磷为主。



注:图柱上方不同小写字母表示同一场次不同利用方式红壤径流液磷素浓度差异显著($P < 0.05$)。

图 1 不同利用方式红壤径流液磷素浓度

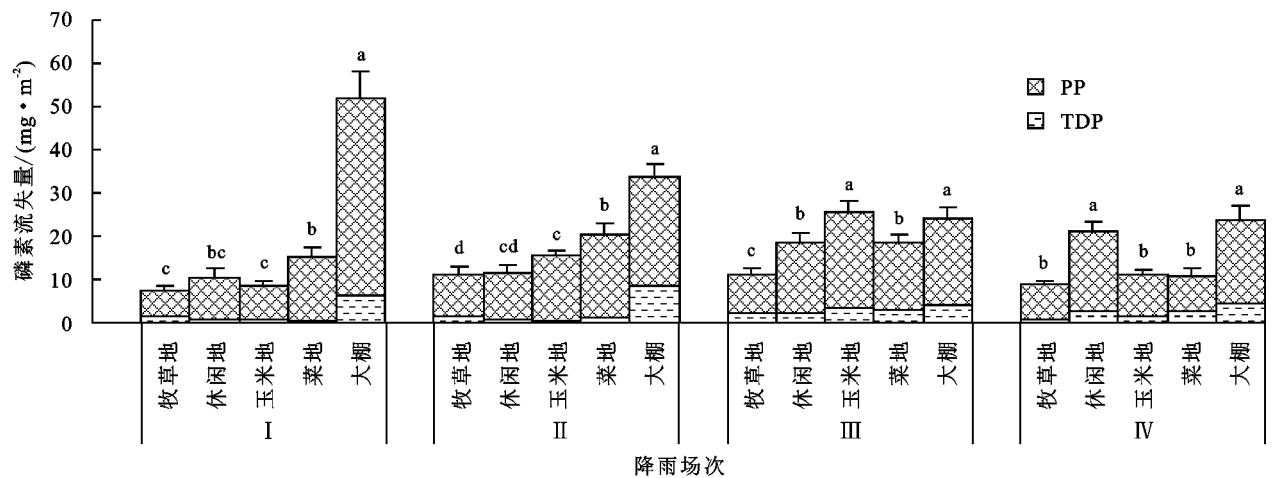


图 2 不同利用方式红壤径流液磷素流失量

2.4 土壤 Olsen-P 含量与 NaOH-P 和 CaCl₂-P 相关性 及环境阈值拟合

Olsen-P 是农业生产上常用来评价土壤磷对植物最有效的形态,藻类可利用总磷(NaOH-P)是与水体富营养化的发生关系最密切的那部分磷,溶解态活性磷(CaCl₂-P)是最易从土壤固相解吸到溶液中而进入到地表径流中的那部分磷,借助不同磷水平的红壤分析 Olsen-P 含量与 NaOH-P 和 CaCl₂-P 的关系,可以评价磷素流失的风险。由图 3 可知,土壤 Olsen-P 与 NaOH-P 和 CaCl₂-P 均呈现显著正相关。

土壤 Olsen-P 与 NaOH-P 的相关方程为:

$$y = 0.4887x + 50.689 \quad (R^2 = 0.5538, n = 7)$$

$$y = 2.5078x + 3.5129 \quad (R^2 = 0.9980, n = 7)$$

土壤 Olsen-P 与 CaCl₂-P 的相关方程为:

$$y = 0.0452x - 0.0755 \quad (R^2 = 0.9511, n = 18)$$

式中: x 为 Olsen-P 含量(mg/kg); y 为土壤中 NaOH-P 或 CaCl₂-P 含量(mg/kg)。

由此可知,不同磷水平红壤 Olsen-P 含量与 NaOH-P 之间为非线性关系,有 1 个明显的“突变

点”,可以用 2 条斜率明显不同的直线进行拟合,2 条直线的交叉点(突变点)即为土壤磷素环境阈值,本研究得出,不同利用方式下红壤磷素环境阈值为 36.17 mg/kg,当 Olsen-P < 36.17 mg/kg,NaOH-P 含量变化不明显,当 Olsen-P > 36.17 mg/kg,NaOH-P 含量急剧增加。而土壤 Olsen-P 含量与 CaCl₂-P 之间却没出现明显的拐点,随着 Olsen-P 含量的增加,土壤中 CaCl₂-P 也相应地增加。

进一步将不同磷水平红壤的 NaOH-P 和与其对应的径流 TP 浓度和流失量进行比较发现,红壤径流中 TP 浓度和流失量随着土壤 NaOH-P 含量的增加而增大,回归分析得出径流中 TP 浓度和流失量与土壤中 NaOH-P 关系(图 4)。

土壤 NaOH-P 与径流 TP 浓度的相关方程为:

$$y = 0.0029x + 0.3282 \quad (R^2 = 0.9049, n = 18)$$

土壤 NaOH-P 与径流 TP 流失量的相关方程为:

$$y = 0.071x + 8.1046 \quad (R^2 = 0.9283, n = 18)$$

式中: x 为 NaOH-P 含量(mg/kg), y 为土壤中 TP 浓度(mg/L)或流失量(mg/m²)。

由回归方程可知,径流 TP 浓度或流失量与土壤中

NaOH-P 含量呈显著正相关,表明 NaOH-P 含量高

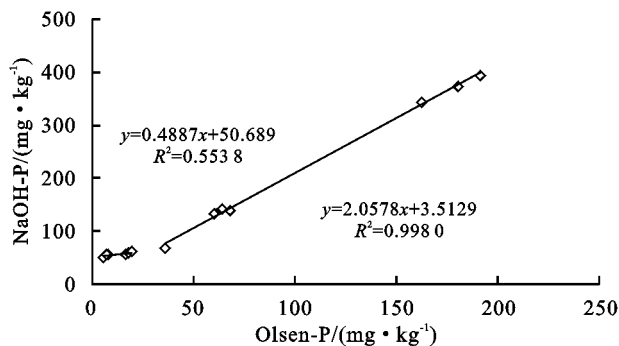
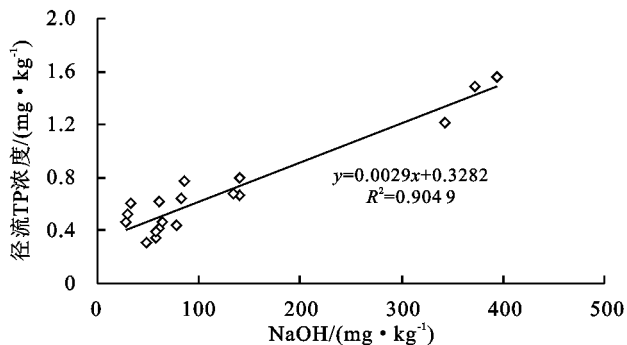


图 3 土壤 Olsen-P 含量与 NaOH-P 和 CaCl_2 -P 相关性分析



的土壤,与其对应的径流 TP 浓度和流失量也高。

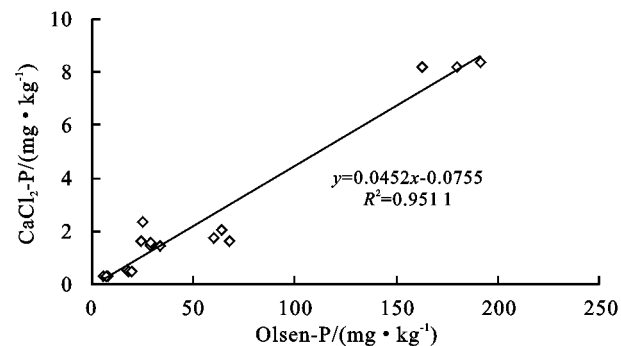


图 4 土壤 NaOH-P 含量与径流 TP 浓度和流失量相关性分析

3 讨论

3.1 不同利用方式下红壤磷素累积状况及固磷能力

磷素的迁移能力主要受土壤有效磷水平和土壤固磷水平的影响。土壤中有有效磷含量可以用 Olsen-P 表示,在本研究中,供试土壤 Olsen-P 含量的范围为 6.81~178.17 mg/kg,不同利用方式红壤中 Olsen-P 含量大小规律为大棚>菜地>休闲地>玉米地>牧草地,说明不同利用方式对土壤磷素的累积有一定的影响,在这 5 种土地利用方式中,大棚和菜地的磷累积效应最为明显,这可能与大棚长期地大量地施用磷肥有关,而休闲地、玉米地的施肥量和施肥强度没有大棚和菜地的大,所以土壤中 Olsen-P 累积量略低于前两者土地利用方式。草地磷累积量最少,主要是因为受施肥、除草等人为因素的干扰少,土壤含磷量低。在本研究中,土壤中固磷水平用土壤磷吸持指数(PSI)表示,不同利用方式红壤对土壤的固磷能力存在差异,土壤磷吸持指数(PSI)具体表现为牧草地>玉米地>菜地>休闲地>大棚,这就决定了在相同的降雨条件下,大棚土壤中的磷素向液相释放迁移的风险高于其他几种土地利用方式,而草地的迁移风险最小。

3.2 不同利用方式下红壤磷迁移特征与流失风险

在多雨的季节,土地利用方式会明显影响土壤磷素流失。不同利用方式红壤 TP 流失量范围为 7.30~51.80 mg/m²,TDP 流失量范围为 0.35~8.47 mg/m²,PP 流失量范围为 5.66~45.63 mg/m²,不同利用

方式下 TP 和 PP 流失量大小为大棚>菜地>休闲地>玉米地>牧草地,TDP 流失量大小为大棚>菜地>牧草地>休闲地>玉米地。在相同的降雨强度和坡度的条件下,不同土地利用方式土壤中磷素流失量存在较大的差异。分析其原因,可能受到的因素影响:(1)磷主要吸附于土壤表面,土壤中的磷随地表径流迁移,因此,土壤表层累积的磷素含量是决定径流液中磷素浓度的重要因素;(2)不同利用方式红壤在相同的降雨条件下可能径流量存在差异;(3)由于土壤本身的理化性质^[18]。

在 5 种土地利用方式中,大棚和菜地径流液中 TP 和 PP 流失量较大,主要是因为在这些土地利用方式中,大棚和蔬菜地径流液中磷浓度明显受到土壤中磷含量的影响,高的土壤含磷量是导致径流中磷流失量大的主要原因^[10]。休闲地和玉米地由于常年种植且为秋翻地,受人为因素干扰,磷素流失量在几种土地利用方式中居中^[9]。草地土壤中磷素含量最低,同时,草地表面植被覆盖度高,人为干扰小,流失量表现为最少^[19]。TDP 流失量大小表现为大棚>菜地>牧草地>休闲地>玉米地,与不同利用方式 TP 和 PP 流失量大小规律不同,在本研究中,牧草地的 TDP 流失量要大于休闲地和玉米地,主要是因为草地 TDP 浓度虽然低,但是其径流量远大于休闲地和玉米地,径流冲刷产沙量小,因此 TDP 流失量大于休闲地和玉米地。

径流中磷素迁移主要包括溶解态磷(TDP)和颗

粒态磷(PP),径流液中不同利用方式红壤 PP 浓度占 TP 浓度的 82.47%~89.91%,PP 流失量占 TP 流失量的 82.46%~90.15%,径流液中土壤表层磷素以颗粒磷为主。这与左继超等^[20]在自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流流失以颗粒态为主以及曹雪艳等^[21]通过人工模拟降雨条件下,在滇池流域的设施大棚和露地 2 种土地利用类型基础上得出土壤磷素流失多以泥砂结合态的 PP 为主要流失形态的结论一致。径流流失以颗粒态磷为主,主要是因为红壤酸性极强,极易固定外源磷素,因此多以泥沙结合态的颗粒磷为主要流失形态。

3.3 基于土壤 Olsen-P 含量与 NaOH-P 和 CaCl₂-P 关系的红壤磷素环境阈值

在本研究中,土壤 Olsen-P 含量与 NaOH-P 和 CaCl₂-P 均有显著的相关性,土壤 Olsen-P 含量与 CaCl₂-P 之间却没出现明显的拐点,随着 Olsen-P 含量的增加,CaCl₂-P 也相应增加,说明土壤磷的输出和迁移可能成为溶解态活性磷的主要来源,特别是富磷的大棚、菜地、玉米地和休闲地(Olsen-P > 20 mg/kg)土壤中,而土壤 Olsen-P 含量与 CaCl₂-P 之间没有出现明显拐点的原因可能是因为点位太少。不同利用方式红壤 Olsen-P 含量与 NaOH-P 之间出现明显的“拐点”,其阈值为 36.17 mg/kg,当 Olsen-P 含量低于此值,藻类可利用总磷(NaOH-P)随 Olsen-P 上升缓慢,而超过此值,土壤中的磷如果在自然生态条件下,遇到降雨径流或排水可能造成水体富营养化。

目前国外针对作物需肥特征及水体环境保护目标,分别提出作物农学阈值和环境阈值。土壤磷素环境阈值的高低反映了磷流失风险的强弱^[19]。不同地区、不同土壤条件下得到的土壤磷素环境阈值差异很大,盲目使用其他区域的土壤磷素环境阈值是不可取的^[22],在本研究中,确定红壤磷流失的 Olsen-P 阈值为 36.17 mg/kg,大棚及菜地土壤在连续、高强度的施磷条件下,土壤磷含量累积水平已经超过了磷流失的 Olsen-P 阈值,土壤磷流失的风险极大,必须引起相关部门对蔬菜基地土壤磷环境问题的高度重视。关于红壤的农学阈值,我国学者也做过一些研究,席雪琴^[23]认为,有效磷 20 mg/kg 可作为红壤的农学阈值,叶会财等^[24]得出,红壤水稻 Olsen-P 的产量农学阈值为 16.36 mg/kg。Olsen-P 含量是影响作物产量的重要因素,土壤中 Olsen-P 含量太低,可能不能满足作物生长需求,导致作物减产,但如果 Olsen-P 含量太高,增产效果可能不太明显,还会导致水环境污染,确定土壤磷素的农学阈值和环境阈值可以帮助确定土壤有效磷含量的适宜水平,对作

物增产和环境保护都具有重要的意义。

4 结论

(1)不同利用方式红壤中 Olsen-P 和 CaCl₂-P 含量大小规律为大棚>菜地>休闲地>玉米地>牧草地,而 NaOH-P 含量表现为大棚>菜地>玉米地>牧草地>休闲地;不同利用方式红壤 PSI 范围为 31.95~47.05,均值大小表现为牧草地>玉米地>菜地>休闲地>大棚,说明大棚利用红壤磷素累积量多,牧草地利用方式磷素流失风险小。

(2)不同利用方式下红壤地表径流中 TP 的浓度范围为 0.245~2.073 mg/L,TDP 浓度范围为 0.023~0.308 mg/L,PP 浓度范围为 0.223~1.826 mg/L,不同场次降雨地表径流中 TP 和 PP 平均浓度大小表现为大棚>菜地>玉米地>休闲地>牧草地,而 TDP 平均浓度大小为大棚>菜地>玉米地>牧草地>休闲地。

(3)不同利用方式红壤 TP 流失量范围为 7.30~51.80 mg/m²,TDP 流失量范围为 0.35~8.47 mg/m²,PP 流失量范围为 5.66~45.63 mg/m²,不同利用方式下 TP 和 PP 流失量大小为大棚>菜地>休闲地>玉米地>牧草地,TDP 流失量大小为大棚>菜地>牧草地>休闲地>玉米地。

(4)土壤 Olsen-P 与 NaOH-P 和 CaCl₂-P 呈极显著线性关系,随着 Olsen-P 含量的增加,NaOH-P 和 CaCl₂-P 提高,且 Olsen-P 与 NaOH-P 之间存在一个明显的“突变点”,作为红壤磷素的环境阈值为 36.17 mg/kg,同时还得出,径流 TP 浓度或流失量与土壤中 NaOH-P 含量呈显著正相关。

参考文献:

- [1] 刘娟,包立,张乃明,等.我国 4 种土壤磷素淋溶流失特征[J].水土保持学报,2018,32(5):67-73.
- [2] 靖彦,陈效民,刘祖香,等.生物黑炭与无机肥料配施对旱作红壤有效磷含量的影响[J].应用生态学报,2013,24(4):989-994.
- [3] 夏文建,冀建华,刘佳,等.长期不同施肥红壤磷素特征和流失风险研究[J].中国生态农业学报,2018,26(12):1876-1886.
- [4] 王艳玲,何园球,吴洪生,等.长期施肥下红壤磷素积累的环境风险分析[J].土壤学报,2010,47(5):880-887.
- [5] 龚娟,马友华,胡宏祥,等.农田土壤磷的环境指标研究进展[J].中国农学通报,2016,32(2):112-117.
- [6] 魏红安,李裕元,杨蕊,等.红壤磷素有效性衰减过程及磷素农学与环境学指标比较研究[J].中国农业科学,2012,45(6):92-102.
- [7] 韩晓飞,高明,谢德体.减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应[J].环境科学,2016,37(7):2770-2778.
- [8] 袁敏,文石林,徐明岗,等.湘南红壤丘陵区不同生态种

- 植模式下土壤磷素流失特征[J].应用生态学报,2013,24(11):146-152.
- [9] 鄯瑞卿,孙彦君,王继红,等.不同利用方式及施肥对黑土地表磷素养分流失的影响[J].土壤通报,2006,37(4):701-705.
- [10] 刘娟,张淑香,宁东卫,等.3种耕作土壤随地表径流流失的特征及影响因素[J].生态与农村环境学报,2019,35(10):1346-1352.
- [11] 国家环境保护局.GB 11893-89 水质总磷的测定钼酸铵分光光度法[S].北京:国家环境保护局,1989.
- [12] 徐红娇,包立,张乃明,等.滇池流域不同利用方式红壤渗滤液的磷素形态变化[J].水土保持学报,2015,29(3):267-271.
- [13] 夏运生,李阳红,史静,等.滇池宝象河流域土壤磷的累积及吸附特征研究[J].土壤学报,2010,47(2):325-333.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:12-180.
- [15] Li Y Y, Gao R, Yang R, et al. Using a simple soil column method to evaluate soil phosphorus leaching risk[J].Clean-Soil, Air, Water,2013,41(11):1100-1107.
- [16] 全国土壤普查办公室.全国第二次土壤普查暂行技术规范[M].北京:中国农业出版社,1979.
- [17] 国家环境保护总局.GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].北京:国家环境保护总局科技标准司,2002:1-9.
- [18] 彭宏佳,吴起鑫,任斐鹏,等.喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应[J].农业环境科学学报,2018,37(4):756-765.
- [19] 聂敏,肖和艾,廖敦秀,等.亚热带可变电荷土壤磷素淋失临界点及其与土壤特性的关系[J].环境科学学报,2013,33(2):579-586.
- [20] 左继超,郑海金,奚同行,等.自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J].环境科学,2017,38(10):4178-4186.
- [21] 曹雪艳,李永梅,张怀志,等.滇池流域原位模拟降雨条件下不同土壤质地磷素流失差异研究[J].水土保持学报,2010,24(3):13-17.
- [22] 秦红灵,全智,刘新亮,等.长沙市郊不同种植年限菜地土壤磷状况及淋失风险分析[J].中国农业科学,2010,43(9):1843-1851.
- [23] 席雪琴.土壤磷素环境阈值与农学阈值研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [24] 叶会财,李大明,柳开楼,等.不同有机培肥方式对红壤性水稻土磷素的影响[J].土壤通报,2019,50(2):374-380.
- (下转第 102 页)
- [14] Chen P, Lian Y Q. Modeling of soil loss and its impact factors in the Guijiang Karst River Basin in Southern China[J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(4):352-365.
- [15] 任红玉,周旭,张迪,等.快速城市化过程中喀斯特山区城镇生态风险变化:以贵阳市花溪区为例[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2018,36(5):16-23.
- [16] 蒙吉军,王雅,王晓东,等.基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J].长江流域资源与环境,2016,25(7):1052-1061.
- [17] 姚岚,吴次芳,陆张维.喀斯特地区城镇化质量与土地利用系统健康协同演化关系研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):768-778.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 21010-2017 土地利用现状分类[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [19] Wischmeier W, Smith D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning agricultural handbook[M]. USA: Department of Agriculture,1978.
- [20] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.
- [21] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case-history[J].Philosophical Transaction of the Royal Society B,1990,329(1255):421-428.
- [22] Zhang H M, Yang Q K, Li R, et al. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor[J]. Computers and Geosciences,2013,52:177-188.
- [23] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [24] 苏娜,王志杰,杨瑞,等.基于 RUSLE 的陕南地区土壤侵蚀时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(5):1-11.
- [25] 中华人民共和国水利部. SL 461-2009 岩溶地区水土流失综合治理技术标准[S].北京:中国水利水电出版社,2010:3-4.
- [26] 操玥,王世杰,白晓永,等.喀斯特槽谷区土壤侵蚀时空演变及未来情景模拟[J].生态学报,2019,39(16):6061-6071.
- [27] 王涛.基于 RUSLE 模型的土壤侵蚀影响因素定量评估:以陕北洛河流域为例[J].环境科学与技术,2018,41(8):170-177.
- [28] Mohammad A G, Adam M. A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses[J].Catena,2010,81:97-103.
- [29] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. Water erosion response to rainfall and land use in different drought-level years in a loess hilly area of China[J].Catena,2010,81:24-31.
- [30] Kosmas C, Danalatos N, Cammeraat L H, et al. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions[J].Catena,1997,29:45-59.