

土地利用方式对红枫湖入湖流域土壤团聚体磷含量及其形态的影响

杨 华¹, 龙 健^{1*}, 李兆君², 廖红凯¹, 刘灵飞¹, 李 娟³

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境重点实验室, 贵阳 550001; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘 要:以贵州省安顺市红枫湖入湖口 4 种典型土地利用方式(玉米地、菜园、林地及撂荒地)为研究对象,分别探讨了土地利用方式对 0~15 cm 和 15~30 cm 两个层次土壤团聚体总磷含量及其形态的影响。结果表明,不同土地利用方式下,原状土壤及各粒级团聚体总磷含量均表现为玉米地>菜园>撂荒地>林地。土壤各粒级团聚体磷形态含量以 Residual P、NaOH-P、NaHCO₃-P 为主,其中 Residual P 在各土地利用方式中的含量均最高,变幅分别为玉米地 28.3%~45.4%、林地 61.1%~72.7%、菜园 45.9%~53.0%、撂荒地 52.1%~72.4%;玉米地和菜园土壤均表现为有机磷含量约为无机态含量的 2 倍;随团聚体粒径的减小,土壤对总磷含量的贡献率呈减少趋势,土壤团聚体对总磷含量贡献主要集中在 5~2 mm 和 2~0.5 mm 两个粒级中,贡献率均达 77%以上,其中耕作土壤(玉米地、菜园)中 5~2 mm 和 2~0.5 mm 两个粒级团聚体中的磷是湖泊面源污染中磷素的主要贡献载体,也是造成湖泊富营养化的关键因素。

关键词:红枫湖入湖流域;土地利用方式;团聚体;磷含量;磷形态

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)11-2214-07 doi:10.11654/jaes.2013.11.016

Effects of Land Use Types on Phosphorus Forms and Their Contents in Soil Aggregates in Watershed of Hongfeng Lake

YANG Hua¹, LONG Jian^{1*}, LI Zhao-jun², LIAO Hong-kai¹, LIU Ling-fei¹, LI Juan³

(1. Guizhou Key Laboratory of Mountain Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, China Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 3. Department of Geography and Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001)

Abstract: Excessive phosphorus (P) in soils may increase the potential to pollute water through runoff and/or leaching. Different land use types may change phosphorus mobility. A study was performed to examine the chemical forms and their contents of P in bulk soil and soil aggregates at 0~15 cm and 15~30 cm under four land use types: cornfields, vegetable fields, forest land and abandoned land in the watershed of Hongfeng Lake in Anshun, Guizhou Province. Total P contents in bulk soils and soil aggregates were in order of cornfields>vegetable fields>abandoned land>forest land under different land use types. Residual P, NaOH-P, and NaHCO₃-P were the major forms in soil aggregates at each depth. The residual P was the highest among all P forms in soils under four land use types, and ranged 28.3%~45.4%, 61.1%~72.7%, 45.9%~53.0% and 52.1%~72.4% in cornfield, forest land, vegetable field and abandoned land, respectively. The organic P contents were as about 2 times as inorganic P contents in cornfield and vegetable field. Soil P was mainly present in soil aggregates of 5~2 mm and 2~0.5 mm, accounting for more than 77% of soil total P. Phosphorus in aggregates of 5~2 mm and 2~0.5 mm in cultivated soils including cornfield and vegetable field were the main contributors to lake P and could be the key factor of the lake eutrophication.

Keywords: Hongfeng Lake watershed; land use; aggregate; phosphorus content; phosphorus form

收稿日期: 2013-04-02

基金项目: 贵州师范大学博士科研启动费; 贵州省学位与研究生教育教学改革研究项目; 贵州省社发攻关项目(黔科合 SY 字[2013]3162 号); 贵州省科技厅-贵州师范大学联合基金项目(黔科合 J 字 LKS[2012]25 号)

作者简介: 杨 华(1986—), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 研究方向为土壤环境与生态。

* 通信作者: 龙 健 E-mail: longjian22@163.com

磷作为植物生长的重要营养元素,施用磷肥能提高作物产量,但是过多施用磷肥对环境带来了负面影响^[1]。过剩的磷素由于不能被植物吸收而累积在土壤中,从而增加了流域水体中磷的含量^[2]。过多的磷进入河流和湖泊则会引起藻类及其他浮游生物迅速繁殖,水体溶解氧量下降,鱼类及其他生物大量死亡,导致水质不断恶化,饮用水质量受到严重的威胁^[3-4]。

红枫湖位于贵州高原中部,是典型的喀斯特人工深水水库,其主要入湖河流有桃花源河、羊昌河、麻线河和后六河,唯一的出湖河流为猫跳河,包括北湖和南湖两部分^[5],集供水、发电、灌溉、养殖、防洪、旅游及调节自然生态等综合功能于一体^[6]。红枫湖作为重要的饮用水源,近几年水质情况不断恶化,湖水的透明度逐渐下降,蓝藻绿藻暴涨导致鱼类大量死亡,使人们的生活受到威胁^[7]。磷素作为水体富营养化等恶性环境问题的重要驱动因子,近年来不少学者对红枫湖流域水体及湖底沉积物中磷含量及其形态做了大量的研究^[5-6,8-10],而有关红枫湖及其相关流域周边土壤中磷素的研究仍鲜见报道。张乃明等^[11]研究表明,滇池流域有 69% 的土壤已对滇池水体构成了不同程度的环境风险,其中 51% 土壤磷释放的环境风险较高,流失严重,已成为滇池水体富营养化的主要污染来源之一,其中不同土地利用方式下土壤 P 形态存在显著的差异^[12]。孙金华^[13]通过研究滇池流域土地利用对入湖河流水质的影响表明,耕地土壤中磷含量与水体中磷含量呈正相关关系。此外,不同粒径团聚体对磷的保护作用差异,可能对土壤磷含量的迁移转化存在重要的影响。章明奎等^[14]对美国佛罗里达州不同利用方式下团聚体磷含量分布的研究表明,土壤磷素主要分布在 >0.5 mm 和 <0.053 mm 2 个粒径团聚体中。但是,目前鲜见有关入湖流域土壤中不同粒径团聚体磷含量及其形态的研究报道。为此,本研究以贵州省安顺市红枫湖入湖流域几种典型土地利用方式土壤为研究对象,以土壤团聚体结构为切入点,探讨不同土地利用方式对土壤磷形态及其含量分布的影响,以期为流域土壤磷素管理及生态环境保护提供基础数据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 采样区概况

本研究样地位于贵州省安顺市平坝县高峰镇红枫湖入湖流域(26°24.27'~26°25.31'N, 106°19.32'~106°25.30'E),海拔 1230~1250 m,该区地处贵州高原

中部,属亚热带大陆性季风湿润型气候,冬春半干旱,夏秋湿润多雨,四季分明。年平均气温 14.3℃,相对湿度 82%,偏丰年、平均年降水量分别为 1396 mm 和 1235 mm。土地利用主要以旱作地为主,土壤类型为黄壤。

1.2 研究方法

2012 年 7 月中旬选取玉米地、林地、菜园和撂荒地 4 种土地利用类型为研究对象。每种土地利用方式共设置了 3 个 15 m×15 m 样方,并按表层(0~15 cm)和亚表层(15~30 cm)分别进行土壤样品采集,每个样方中以随机采样的方式采集 5~7 个样点,采样时去除地表凋落物后按土层分类混合成一个土壤样品。土样带回实验室后,挑除可见的残根及凋落物,室内风干,一部分(保持原样)进行团聚体分级,为了避免颗粒分组对土壤磷组分的影响,本文将过 <5 mm 筛的适量土壤样品采用干筛法^[14]对团聚体进行分组,其方法为:把孔径分别为 2、0.5、0.25 mm 的 3 个系列土筛由上至下套合,放置在一无孔的底盆上将风干土样筛分为 4 个粒组,即 5~2 mm、2~0.5 mm、0.5~0.25 mm、<0.25 mm。经筛分的各类团聚体分别计重。研磨过 100 目尼龙筛,用于土壤不同磷形态的测定。

土壤磷形态提取采用 Hedley^[15]分级方法。该方法把土壤中磷分为水溶性磷(H_2O-P)、 $NaHCO_3$ 可提取的无机磷($NaHCO_3-IP$)、 $NaHCO_3$ 可提取的有机磷($NaHCO_3-OP$)、 $NaOH$ 可提取的无机磷($NaOH-IP$)、 $NaOH$ 可提取的有机磷($NaOH-OP$)、 HCl 提取态磷($HCl-P$)和残余态磷(Residual P)7 种磷形态。其提取步骤为:称取 0.5 g 风干土样置于 100 mL 离心管中,顺次用 30 mL 去离子水、 $0.5 mol \cdot L^{-1} NaHCO_3$ (pH8.2)、 $0.1 mol \cdot L^{-1} NaOH$ 和 $1 mol \cdot L^{-1} HCl$ 分别提取振荡 16 h,每次提取后离心,过滤分离悬液。去离子水和 HCl 提取物中的磷用比色法直接测定, $NaHCO_3$ 和 $NaOH$ 提取物中的磷包括有机磷和无机磷 2 种形态,溶液中无机磷含量用直接比色,经过高氯酸-硫酸消化后用比色法测定溶液中的总磷,两者之差为有机磷含量。残余态磷是对应土壤全磷与以上各种可提取磷总和的差值。水溶性磷和 $NaHCO_3$ 可提取的磷有较高的生物有效性, $NaOH$ 可提取的磷和 $HCl-P$ 在一定条件下也可逐渐释放,残余态磷较为稳定^[14]。

1.3 数据处理与统计分析

各级团聚体的质量分数=该级团聚体质量/土壤样品总质量×100%;各级团聚体不同磷形态质量分数=团聚体磷形态含量/团聚体磷含量×100%;团聚体

对土壤磷含量贡献率=(该级团聚体中磷含量×该级团聚体的质量)/原状土壤中磷含量×100%^[16]。

实验数据应用 SPSS16.0 软件进行处理,用 LSD 法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤团聚体组成

不同土地利用方式对土壤团聚体的分布产生了明显的影响(表 1)。不同利用方式主要以>0.5 mm 粒级团聚体为主,且含量均达到 85%以上。就 5~2 mm 粒级而言,表层(0~15 cm)和亚表层(15~30 cm)团聚体含量均为耕作土壤(玉米地、菜园)大于非耕作土壤(撂荒地、林地),且团聚体比例差异显著($P<0.05$);就 2~0.5 mm 粒级团聚体而言,非耕作土壤(撂荒地、林地)团聚体含量大于耕作土壤(玉米地、菜园),且团聚体比例差异显著($P<0.05$);就 0.5~0.25 mm 粒级团聚体而言,表层和亚表层土壤中均是林地所含比例最高,与其他三种利用方式所含比例差异显著($P<0.05$);而<0.25 mm 粒级团聚体中每种利用方式团聚体比例均很低,不足 5%。各利用方式下表层和亚表层土壤团聚体差异并不显著。

2.2 不同土地利用方式下土壤团聚体磷含量分布

在两个不同层次土壤中,不同土地利用方式下原状土及各粒级团聚体土壤总磷含量均表现为:玉米地>菜园>撂荒地>林地(图 1)。在表层土壤中,耕作土壤(玉米地、菜园)及非耕作土壤(撂荒地、林地)中原状土及各粒级团聚体磷含量没有显著差异,而耕作土壤(玉米地、菜园)与非耕作土壤(撂荒地、林地)原状土磷含量差异均显著,其中玉米地土壤磷含量较林地增加 46.6%。除 5~2 mm、<0.25 mm 粒级团聚体外,其余

粒级团聚体中玉米地与菜园土壤总磷含量差异显著。不同粒级磷含量与原状土磷含量相比,在玉米地中,2~0.5 mm、0.5~0.25 mm 粒级团聚体磷含量明显高于原状土磷含量,分别提高 15.4%和 15.6%。玉米地中 2~0.5 mm 和 0.5~0.25 mm 以及菜园和撂荒地中 0.5~0.25 mm 粒级团聚体较其他粒级磷含量要高,而其余团聚体磷含量主要表现为随着团聚体粒级减小而磷含量增加。

与表层土壤相比,亚表层土壤中不同粒级团聚体磷含量略低于表层,但不同利用方式中团聚体总磷含量变化规律与表层土壤变化类似,均表现为在玉米地中 2~0.5 mm 和 0.5~0.25 mm 两个粒级团聚体磷含量高于原状土磷含量,分别较原状土总磷含量增加 11.5%和 29.3%。0.5~0.25 mm 粒级团聚体总磷含量较表层土壤增高幅度更大。其余各土地利用方式不同粒级团聚体中,除林地和撂荒地 5~2 mm 粒级团聚体磷含量高于原状土之外,其余均随着粒级减小而含量增加。

2.3 不同土地利用方式下土壤各粒级团聚体磷形态分布特征

不同土地利用方式下各粒级团聚体磷形态分布特征如表 2 所示,耕作土壤(玉米地、菜园)中磷形态分布均表现为 Residual P 含量最高。玉米地,亚表层土壤 2~0.5 mm 粒级团聚体中 Residual P 高达 45.7%, H_2O-P 含量最低,在表层土壤 2~0.5 mm 粒级团聚体中含量低至 2.9%,其余几种形态中 NaOH-IP 含量高达 21%, $NaHCO_3-IP$ 含量高达 14.4%,且 $NaHCO_3-IP$ 含量较其他几种磷形态含量要高。菜园中,在亚表层土壤<0.25 mm 粒级团聚体中 Residual P 高达 56.7%, H_2O-P 含量低至 1.7%,在菜园中 NaOH-IP 含量同样较高,在亚表层土壤 5~2 mm 粒级团聚体中达到

表 1 供试土壤有机碳含量及团聚体组成($n=3$)

Table 1 Organic carbon contents and aggregate distribution in the tested soils ($n=3$)

土壤层次/cm	土地利用方式	有机碳/ $g \cdot kg^{-1}$	4 个粒级团聚体组成/%			
			5~2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
0~15	玉米地	37(2.5)a	62.3(1.1)a	31.5(1.1)b	2.8(0.5)c	2.2(0.7)a
	林地	23(6.6)a	41.3(2.2)c	44.2(3.3)a	10.5(0.7)a	3.4(0.1)a
	菜园	27(4.9)a	57.6(2.2)ab	30.6(4.1)b	4.8(0.4)c	4.8(0.2)a
	撂荒地	7.9(1.6)b	48.4(5.0)bc	42.5(4.0)a	6.1(0.9)b	1.8(0.2)a
15~30	玉米地	34(5.0)a	64.4(1.6)a	29.1(1.2)b	2.5(0.4)b	2.6(0.4)ab
	林地	15(5.7)b	37.2(3.4)b	44.3(3.6)a	11.9(1.7)a	3.7(1.0)a
	菜园	26(1.3)ab	66.0(3.9)a	29.3(2.8)b	2.3(1.2)b	1.5(0.6)b
	撂荒地	11(4.4)b	56.4(3.7)a	37.0(2.6)ab	4.0(0.9)b	1.3(0.2)b

注:平均值(标准差);同一列中平均值后有相同字母表示二者差异不显著($P>0.05$)。下同。

Note: Mean (Standard deviation); Means with the same letter in a column are not significantly different at $P=0.05$ probability level. The same below.

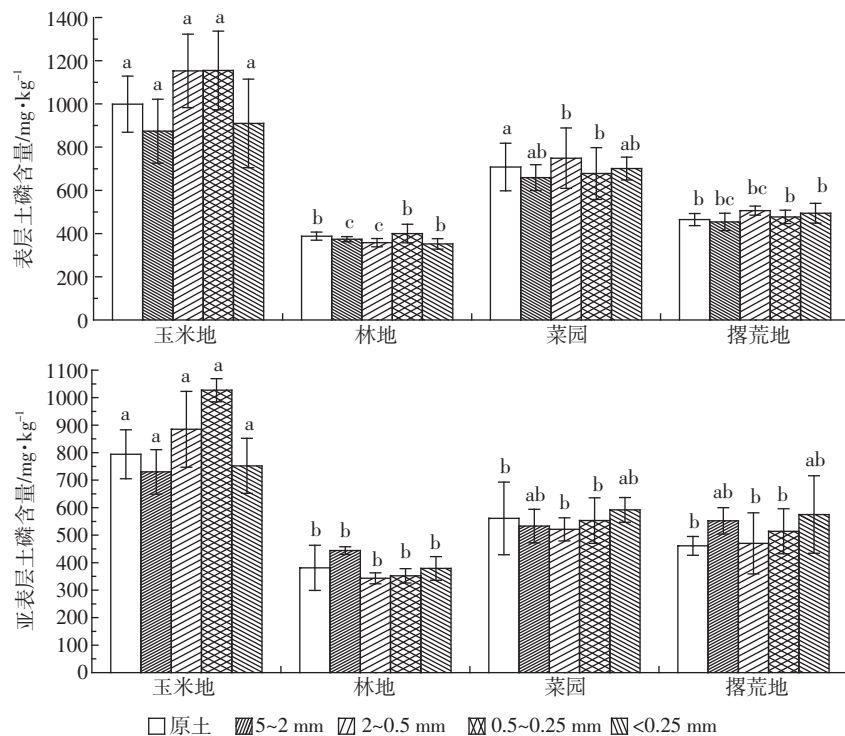


图 1 不同利用方式下表层及(0~15 cm)和亚表层(15~30 cm)原状土及团聚体总磷含量

Figure 1 Phosphorus contents in bulk soil and different aggregates at surface(0~15 cm) and subsurface (15~30 cm) under different use types

28.1%, 而 NaOH-OP 相对于其他形态含量较高。非耕作土壤(撂荒地、林地)中磷形态同样主要以 Residual P 为主, 林地中 Residual P 含量在 61.1%~72.7% 之间, NaOH-P 含量占 25% 左右, 其 NaOH-IP 约为 NaOH-OP 的 2 倍, 其余几种磷形态含量均很低, 占总磷含量的 10% 左右; 撂荒地中, 除了 NaOH-P 含量(9.2%~28.8%)相对较高外, 其余几种磷形态含量均很低。总之, 耕作土壤(玉米地、菜园)中可提取态磷明显高于非耕作土壤(撂荒地、林地)。非耕作土壤中主要是以 Residual P 形式存在。

2.4 不同土地利用方式团聚体对土壤磷含量的贡献率

由表 3 可以看出, 不同利用方式土壤粒级团聚体对土壤总磷含量贡献率主要表现为 5~2 mm>2~0.5 mm>0.5~0.25 mm>0.25 mm 以下, 但不同利用方式土壤团聚体对土壤总磷含量贡献率主要集中在 5~2 mm、2~0.5 mm 两个粒级中, 其贡献率均可达到 77% 以上。除了表层土壤林地团聚体总磷含量贡献率是 5~2 mm 粒级小于 0.5~0.25 mm 粒级外, 其余 3 种土地利用方式团聚体对总磷含量的贡献均为 5~2 mm 粒级高于 0.5~0.25 mm 粒级。在表层和亚表层土壤中除了粒级为 5~2 mm 团聚体之外, 其余各粒级土壤团聚体对总磷贡献率存在显著差异, 且林地较其他 3 种利用方式

差异明显。

3 讨论

研究表明, 红枫湖入湖流域供试土壤中, 土地利用方式对土壤中总磷含量分配产生较大的影响, 其中土壤总磷含量大小排序为玉米地>菜园>撂荒地>林地。由排序不难看出, 耕作土壤(玉米地、菜园)总磷含量较非耕作土壤(撂荒地、林地)相对要高。这与对作物长期施用磷肥有关, 因为频繁施用磷肥促进了土壤中磷素的积累^[14]。有研究表明, 磷进入土壤后, 仅有 10%~30% 能被当季植物吸收利用^[17-18], 大量的磷素则在土壤中累积, 导致玉米地和菜园土壤总磷含量偏高。撂荒地中磷含量低于玉米地和菜园而略高于林地, 表明弃耕后土壤 P 的恢复有向天然林地状况发展的趋势, 但速度十分缓慢。这主要是因为磷在正常情况下不会以气体方式损失, 且磷素在土壤中的迁移性相对较弱, 只有撂荒地里的杂草植物吸收转化。在表层土壤中不同利用方式影响土壤总磷含量的同时, 也改变了土壤团聚体分配状况。其中不同利用方式下均以 >0.5 mm 粒级团聚体为主, 且含量均达到 85% 以上, 与廖洪凯等^[16]研究结果一致。玉米地和菜园中 5~2 mm 粒级团聚体含量明显高于撂荒地和林地, 而 2~

表 2 不同粒级团聚体磷形态分布比例(%) ($n=3$)Table 2 Percentages of phosphorus forms in different aggregates of soils (%) ($n=3$)

土壤层次/cm	团聚体/mm	利用方式	H ₂ O-P	NaHCO ₃ -IP	NaHCO ₃ -OP	NaOH-IP	NaOH-OP	HCl-P	Residual P
0~15	5~2	玉米地	4.7(1.1)a	12.5(1.8)a	8.5(2.4)a	21.0(1.2)ab	9.7(2.5)a	13.3(3.8)a	29.8(2.8)b
		林地	2.0(0.7)ab	2.7(1.2)bc	3.4(2.1)b	15.3(1.4)bc	8.4((1.0)a	2.1(1.5)b	66.1(2.0)a
		菜园	3.0(1.1)ab	6.7(2.0)b	3.1(0.7)b	24.9(2.6)a	11.5(3.4)a	3.1(1.4)b	48.8(6.2)a
		撂荒地	1.5(0.6)ab	1.8(0.3)c	4.0(0.9)ab	13.1(1.7)c	8.2(2.6)a	0.6(0.1)b	52.1(8.7)a
	2~0.5	玉米地	2.9(0.7)a	10.7(2.1)a	6.3(0.9)a	16.8(1.2)b	7.0(2.6)a	11.9(5.5)a	44.5(7.7)c
		林地	2.0(0.4)ab	2.5(0.9)b	4.3(0.9)a	17.6(3.5)ab	7.3(0.8)a	0.6(0.2)b	65.6(2.9)ab
		菜园	2.1(0.9)ab	6.5(1.9)ab	3.3(0.8)a	25.3(2.1)a	8.4(3.6)a	2.4(0.7)b	52.1(2.7)bc
		撂荒地	0.7(0.2)b	1.9(0.7)b	4.8(1.5)a	11.2(2.4)b	8.4(2.0)a	0.6(0.3)b	72.4(3.8)a
	0.5~0.25	玉米地	4.7(0.9)a	10.2(2.1)a	7.4(1.8)a	17.7(1.6)ab	6.4(2.2)a	14.4(5.4)a	39.0(1.1)b
		林地	3.3(0.5)ab	2.2(0.2)b	3.6(1.3)a	15.3(3.8)b	12.4(1.7)a	1.3(0.8)b	61.7(1.7)a
		菜园	1.9(0.3)bc	7.0(1.9)a	4.2(1.0)a	27.5(3.8)a	11.1(1.9)a	2.3(1.0)b	45.9(3.3)b
		撂荒地	1.2(0.6)c	1.7(0.5)b	6.8(1.5)a	12.9(2.2)b	8.3(1.9)a	2.3(1.6)b	66.8(4.5)a
	<0.25	玉米地	3.8(0.8)a	14.4(2.2)a	6.1(4.1)a	20.4(3.1)a	7.0(2.0)a	19.9(5.8)a	28.3(2.7)b
		林地	2.4(0.8)ab	2.9(0.9)c	3.4(0.7)a	19.7(4.4)a	9.6(2.1)a	0.8(0.2)b	61.1(4.7)a
		菜园	1.7(0.2)b	6.2(2.0)b	2.7(1.1)a	22.6(3.9)a	11.2(6.1)a	2.5(1.3)b	53.0(8.2)a
		撂荒地	1.1(0.5)b	2.2(0.8)c	5.5(2.5)a	12.6(3.7)a	11.6(2.6)a	1.4(0.5)b	65.3(5.7)a
15~30	5~2	玉米地	4.7(1.3)a	10.1(2.0)a	11.7(2.4)a	21.8(0.7)ab	7.2(0.8)a	12.1(5.2)a	32.4(4.3)c
		林地	2.3(1.0)a	1.7(0.5)b	3.9(1.7)b	12.1(7.1)b	7.0(1.4)a	0.3(0.0)b	72.7(2.4)a
		菜园	4.0(1.6)a	6.6(2.7)ab	3.1(0.2)b	28.1(7.1)a	9.5(2.0)a	1.6(1.1)b	47.2(10.0)bc
		撂荒地	2.3(1.5)a	1.9(0.7)b	6.0(2.6)ab	17.5(4.1)ab	7.7(2.3)a	1.7(0.9)b	62.9(4.6)ab
	2~0.5	玉米地	3(0.9)a	8.0(1.0)a	10.8(2.7)a	18.8(2.2)b	6.6(1.6)a	8.1(3.2)a	44.7(4.0)c
		林地	1.6(0.3)a	1.6(0.0)c	4.0(0.4)b	16.0(2.8)b	8.8(2.2)a	0.4(0.1)b	67.5(4.2)a
		菜园	2.5(0.6)a	6.3(2.0)ab	4.1(0.3)b	28.0(1.8)a	7.3(3.4)a	1.3(0.5)b	51.1(2.3)bc
		撂荒地	2.4(0.6)a	2.0(0.7)c	3.6(1.5)b	19.5(3.9)ab	9.4(2.9)a	2.0(1.2)b	61.3(6.0)ab
	0.5~0.25	玉米地	5.2(1.4)a	5.0(1.6)ab	11.0(1.6)a	16.0(1.1)a	6.9(1.6)a	10.4(4.4)a	45.4(4.5)b
		林地	1.4(0.5)b	1.5(0.4)b	5.5(1.2)b	15.7(3.7)a	8.7(0.5)a	0.4(0.0)b	66.8(6.8)a
		菜园	2.7(1.0)ab	5.7(1.3)a	3.8(1.0)b	23.9(2.5)a	10.2(4.4)a	1.2(0.6)b	52.3(3.6)ab
		撂荒地	1.3(0.3)b	1.9(0.6)b	4.3(0.6)b	17.0(4.1)a	8.8(1.7)a	1.6(0.4)b	62.8(6.8)a
	<0.25	玉米地	3.1(0.7)a	5.6(2.3)a	14.4(3.3)a	20.0(2.1)a	7.4(3.2)a	13.0(6.0)a	36.4(3.3)b
		林地	2.6(1.3)a	2.1(0.3)a	4.8(1.2)b	18.7(4.7)a	8.1(1.0)a	1.3(0.5)b	62.4(4.6)a
		菜园	2.0(0.7)a	5.0(2.5)a	3.8(0.8)b	21.1(1.3)a	9.2(3.3)a	2.0(0.9)b	56.7(1.2)a
		撂荒地	0.9(0.2)a	3.3(1.3)a	3.8(0.8)b	23.1(5.6)a	11.0(11.3)a	0.6(0.6)b	62.0(8.2)a

0.5 mm 及<0.5 mm 粒级团粒又明显低于撂荒地和林地。这可能主要是因为耕作土壤受人为施肥及耕作等因素影响导致土壤板结,使得土壤中大团聚体含量高于非耕作土壤。而对于不同粒级团聚体总磷含量主要集中在小团聚体中,与郑顺安等^[19]、章明奎等^[14]研究结果一致。

在磷的不同形态中,水溶性磷和 NaHCO₃ 提取态磷有较高的生物有效性,NaOH 可提取磷和 HCl-P 在一定条件下也可逐渐释放,残余态磷较为稳定^[14]。Chardon 等^[20]研究表明不同磷形态含量的多少取决于土壤本身的性质和人为耕作活动。游离铁、活性碳酸钙、黏粒量、有机碳和 pH 等均影响磷素活性^[21],其中 NaOH-IP 含量与土壤中铁和铝的含量有关而 NaOH-

OP 与腐植酸的含量有关,HCl-IP 与钙和镁的含量有关^[22]。本研究不同土地利用方式下各粒级团聚体磷含量各形态磷以 Residual P 最高,而章明奎等^[14]在利用方式对砂质土壤有机碳、氮和磷的形态及其在不同大小团聚体中分布影响的研究中,Residual P 含量较本研究的结果要低,穆晓慧等^[23]在黄土高原石灰性土壤不同形态磷组分分布特征的研究表明 HCl-P 含量最高。这可能与该区域土壤本身自然化学背景值有关,该研究区域成土母质为石灰岩,土壤中磷与碳酸钙结合形成沉淀,稳定性较高。在耕作土壤(玉米地、菜园)中,所含 NaOH-P、NaHCO₃-P 比例较其他两种利用类型明显要高,约占总磷含量的 40%,且 NaOH-IP 含量大于 NaOH-OP 含量、NaHCO₃-IP 含量大于 NaHCO₃-

表 3 不同粒级团聚体对土壤磷含量的贡献率(%)($n=3$)Table 3 Contribution of aggregate phosphorus to soil total phosphorus (%) ($n=3$)

土壤层次/mm	土地利用方式	5~2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
0~15	玉米地	52.7(11.3) _a	34.3(5.5) _a	2.9(0.6) _b	2.1(1.2) _a
	林地	37.84(1.0) _a	40.7(6.8) _a	10.7(1.6) _a	3.0(0.2) _a
	菜园	51.9(2.2) _a	30.7(4.4) _a	4.6(1.2) _b	6.0(2.9) _a
	撂荒地	47.6(7.0) _a	47.8(8.7) _a	6.4(1.3) _b	2.0(0.5) _a
15~30	玉米地	61.7(11.8) _a	33.7(7.9) _{ab}	3.3(0.47) _{bc}	2.5(0.4) _{ab}
	林地	48.4(6.0) _a	44.7(3.4) _a	12.4(2.3) _a	4.29(1.5) _a
	菜园	60.6(11.5) _a	25.4(1.1) _b	2.3(1.1) _c	1.5(0.6) _b
	撂荒地	56.9(12.9) _a	33.8(5.8) _{ab}	4.3(0.8) _b	1.5(0.4) _b

OP 含量,其无机态含量约为有机态含量的 2 倍,与 Guggenberger^[24]和秦胜金等^[12]研究结果一致。这表明耕作土壤施肥对磷形态的显著影响使无机磷含量增加而有机磷含量相对偏低。

不同土地利用方式下,团聚体对土壤总磷含量的贡献均是随着团聚体粒级的减小而减少。由此可见,这主要与团聚体分布有关,团聚体含量分布越多,该团聚体对土壤磷贡献率就越大。但不同利用方式土壤团聚体对土壤总磷含量贡献率主要集中在 5~2 mm、2~0.5 mm 两个粒级中,其贡献率均可达到 77%以上,由此可知土壤中磷主要赋存在这两个粒级团聚体中。其中磷素的流失主要是地表径流和淋溶渗透进入水体当中,袁东海等^[25-26]研究表明,磷的流失形态以泥沙结合态为主,大约占总磷流失的 70%以上,其径流流失的磷素主要为生物有效磷。由图 1 和表 2 可知,耕作土壤(玉米地、菜园)不仅磷(TP)含量远远高于非耕作土壤(撂荒地、林地),且可提取态磷所占比例较撂荒地和林地同样要高,NaOH 提取态和 HCl-P 在一定条件下会逐渐释放为生物有效态磷,使得大量的有效态磷以径流进入水体,耕作土壤(玉米地、菜园)主要以 5~2 mm 和 2~0.5 mm 两个粒级团聚体为主,大量的磷赋存于这两个粒级团聚体中,其中的磷素会以结合态随着地表径流进入水体。因此,耕作土壤(玉米地、菜园)中 5~2 mm 和 2~0.5 mm 两个粒级团聚体中磷是湖泊面源污染中磷素的主要贡献载体,也是造成湖泊富营养化的关键因素。

4 结论

(1)本研究土地利用方式下土壤团聚体主要分布于>0.5 mm 粒级中,原状土壤及各粒级团聚体磷(TP)含量均表现为玉米地>菜园>撂荒地>林地,耕作土壤(玉米地、菜园)总磷含量显著高于非耕作土壤(撂荒

地、林地)。

(2)不同土地利用方式下各粒级团聚体磷形态主要以 Residual P 为主。耕作土壤(玉米地、菜园)NaOH-P、NaHCO₃-P 比例较其他两种利用类型明显要高,约占总磷含量的 40%,且 NaOH-IP 含量大于 NaOH-OP 含量、NaHCO₃-IP 含量大于 NaHCO₃-OP 含量,其无机态含量约为有机态含量的 2 倍。

(3)土壤团聚体对土壤总磷含量贡献率主要集中在 5~2 mm 和 2~0.5 mm 两个粒级中,其贡献率均可达到 77%以上。

参考文献:

- [1] Yang L J, Zhang L Y, Li F S. Soil phosphorus distribution as affected by irrigation methods in plastic film house[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6): 712-718.
- [2] Hosseini A R, Biabanaki F S. Impact of fertilizer application on phosphorus release kinetics in some calcareous soils[J]. *Environmental Geology*, 2009, 56(6): 1065-1069.
- [3] Gao Y, Zhu B, Zhou P, et al. Effect of surface cover on phosphorus loss from a hillslope cropland of purple soil under simulated rainfall: A case study in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroeco-Systems*, 2009, 85(3): 263-273.
- [4] Gao Y, Zhu B, Wang T, et al. Bioavailable phosphorus transported out from a hillslope cropland of purple soil under the condition of natural and simulated rainfall events[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 171(1-4): 539-550.
- [5] 朱元荣, 张润宇, 吴丰昌, 等. 贵州红枫湖沉积物生物可利用磷分布特征及其与粒系[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(4): 513-520.
ZHU Yuan-rong, ZHANG Run-yu, WU Feng-chang, et al. Distribution of bioavailable phosphorus and their relationship with particle size in sediments of Lake Hongfeng, Guizhou Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(4): 513-520.
- [6] 吴峰伟, 汪福顺, 吴明红, 等. 滇池、红枫湖沉积物中总磷、分态磷及生物硅形态与分布特征[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 88-94.
WU Feng-wei, WANG Fu-shun, WU Ming-hong, et al. Distributions of total phosphorus, phosphorus fractions, and biogenic silica in Dianchi Lake and Hongfeng Lake sediments[J]. *Chinese Journal Ecology*, 2009,

- 28(1):88-94.
- [7] 王长娥, 张明时. 红枫湖、百花湖流域范围内居民含磷洗涤剂使用情况的调查与分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2008, 26(2):48-51.
- WANG Chang-e, ZHANG Ming-shi. The investigation and analysis on the situation of phosphorus-bearing detergent in the valleys of Lake Hongfeng and Lake Baihua[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2008, 26(2):48-51.
- [8] 王雨春, 马梅, 万国江, 等. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态及沉积历史[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1):21-27.
- WANG Yu-chun, MA Mei, WAN Guo-jiang, et al. The Phosphorus forms and depositional history in sediments of Lake Hongfeng, Guizhou Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(1):21-27.
- [9] 王敬富, 陈敬安, 曾艳, 等. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态的空间变化特征[J]. 湖泊科学, 2012, 24(5):789-796.
- WANG Jing-fu, CHEN Jing-an, ZENG Yan, et al. Spatial distribution characteristics of phosphorus forms in sediment of Lake Hongfeng, Guizhou Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(5):789-796.
- [10] 冯业强, 夏品华, 张明时, 等. 贵州高原红枫湖水富营养化特征分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2011, 29(3):29-35.
- FENG Ye-qiang, XIA Pin-hua, ZHANG Ming-shi, et al. Analysis on eutrophication features of Hongfeng Reservoir on Guizhou plateau[J]. *Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences)*, 2011, 29(3):29-35.
- [11] 张乃明, 李学成, 李阳红. 滇池流域土壤磷累积特征和释放风险研究[J]. 土壤, 2007, 39(4):665-667.
- ZHANG Nai-ming, LI Xue-cheng, LI Yang-hong. Accumulation and releasing risk of phosphorus in soils in Dianchi watershed[J]. *Soils*, 2007, 39(4):665-667.
- [12] 秦胜金, 刘景双, 王国平, 等. 三江平原不同土地利用方式下土壤磷形态的变化[J]. 环境科学, 2007, 28(12):2778-2782.
- QIN Sheng-jin, LIU Jing-shuang, WANG Guo-ping, et al. Phosphorus fractings under different land uses in Sanjiang Plain[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(12):2778-2782.
- [13] 孙金华, 曹晓峰, 黄艺. 滇池流域土地利用对入湖河流水质的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(12):2052-2057.
- SUN Jin-hua, CAO Xiao-feng, HUANG Yi. Effect of land use on in-flow rivers water quality in lake Dianchi watershed[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(12):2052-2057.
- [14] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 利用方式对砂质土壤有机碳、氮和磷的形态及其在不同大小团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8):1703-1711.
- ZHANG Ming-kui, ZHENG Shun-an, WANG Li-ping. Chemical forms and distributions of organic carbon, nitrogen and phosphorus in sandy soil aggregate fractions as affected by land uses[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(8):1703-1711.
- [15] Hedley M J, Steward J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46:970-976.
- [16] 廖洪凯, 龙健, 李娟. 不同小生境对喀斯特山区花椒林表土团聚体有机碳和活性有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1):156-160.
- LIAO Hong-kai, LONG Jian, LI Juan. Effect of different micro-habitats types on organic carbon and labile organic carbon distribution in surface soil aggregates in Chinese prickly ash orchard of Karst mountain area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1):156-160.
- [17] 刘建玲, 张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化 II. 土壤 Olsen-P 及各种形态无机磷的动态变化[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3):360-364.
- LIU Jian-ling, ZHANG Fu-shuo. Dynamics of soil P pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation: II. Dynamics of soil Olsen-P and inorganic P[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3):360-364.
- [18] 成瑞喜, 贾平. 中酸性土壤无机磷形态及生物有效性[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(1):6-10.
- CHENG Rui-xi, JIA Ping. Transformation and bioavailability of phosphorus in neutral and acidic soils[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 1998, 7(1):6-10.
- [19] 郑顺安, 陈春, 郑向群. 再生水灌溉对土壤团聚体中有机碳、氮和磷的形态及分布的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11):2053-2059.
- ZHENG Shun-an, CHEN Chun, ZHENG Xiang-qun. Effect of reclaimed water irrigation on the distribution of organic carbon, nitrogen and phosphorus in different size of aggregates in sandy purple soil[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(11):2053-2059.
- [20] Chardon W J, Schoumans O F. Soil texture effects on the transport of phosphorus from agricultural land in river deltas of Northern Belgium, The Netherlands and North-West Germany[J]. *Soil Use and Management*, 2007, 23:16-24.
- [21] Ryan J, Hasan B M, Tabbara H S. Availability and transformation of applied phosphorus in calcareous Lebanese soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49:1215-1220.
- [22] McCray J M, Wright A L, Luo Y G, et al. Soil phosphorus forms related to extractable phosphorus in the everglades agricultural area[J]. *Soil Science*, 2012, 177:31-38.
- [23] 穆晓慧, 李世清, 党蕊娟. 黄土高原石灰性土壤不同形态磷组分分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6):1341-1347.
- MU Xiao-hui, LI Shi-qing, DANG Rui-juan. Distribution of phosphorus fractionations in calcareous soils of the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6):1341-1347.
- [24] Guggenberger G, Christensen B T, Rubæk G, et al. Land-use and fertilization effects on P forms in two European soils: Resin extraction and ^{31}P -NMR analysis[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47:605-614.
- [25] 袁东海, 王兆骞, 陈欣, 等. 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.
- YUAN Dong-hai, WANG Zhao-qian, CHEN Xin, et al. Losses of nitrogen and phosphorus under different land use patterns in small red soil watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1):188-198.
- [26] 袁东海, 王兆骞, 陈欣, 等. 不同农作方式下红壤坡耕地土壤磷素流失特征[J]. 应用生态学报, 2003, 13(14):1661-1664.
- YUAN Dong-hai, WANG Zhao-qian, CHEN Xin, et al. Characteristics of phosphorus losses from slope field in red soil area under different cultivated ways[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 13(14):1661-1664.