

滇池流域源头区不同土地利用方式 土壤无机磷组分的分布特征

彭珮媛¹, 吴晓妮^{2,1}, 李子光³, 赵洛琪¹, 付登高¹, 段昌群¹

(1.云南大学 生态学与环境学院 云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 昆明 650091; 2.昆明学院 农学与生命科学学院, 昆明 650214; 3.昆明市海口林场, 昆明 650114)

摘要: 为了解富营养湖泊流域源头区内不同土地利用方式下的无机磷组成及分布特征, 在滇池流域南部的柴河流域内选取 6 种不同土地利用方式(云南松林地、荒草坡、富磷农田、大棚农田、大棚沟渠及露天农田)土壤, 对土壤无机磷组分的分布特征进行了分析。结果表明: 研究区域土壤无机磷含量为 0.96~3.23 g/kg, 占总磷含量的 45.31%~76.41%; 其中山地区内的云南松林、荒草坡和富磷农田土壤以磷酸铁盐磷(Fe-P)和磷酸钙盐磷(Ca-P)为主, 二者占无机磷含量的 64.24%~68.24%, 而坝平地中的大棚农田、大棚沟渠及露天农田土壤则以 Ca-P 和闭蓄态磷(O-P)为主, 二者含量占无机磷含量的 83.49%~89.70%; 相关分析表明, 土壤有效磷与 Ca-P 和 O-P 呈显著正相关, 而有机磷与磷酸铝磷(Al-P)、Fe-P、O-P 和 Ca-P 呈显著正相关。可见, 流域内的山地区(荒草坡及云南松林)具有较好的供磷潜力, 有利于提升其生态修复效率以期达到有效的面源污染防控, 而山地区富磷农田由于较高的磷组分含量及其土地覆被特征成为流域内面源污染防控的重点区域。

关键词: 土地利用方式; 无机磷组分; 供磷能力; 磷素流失

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)06-0058-07

Characteristics of Distribution of Inorganic Phosphorus Fractions in Soils of Different Land Use Patterns in the Source Area of Dianchi Watershed

PENG Peiyuan¹, WU Xiaoni^{2,1}, LI Ziguang³, ZHAO Luoqi¹, FU Denggao¹, DUAN Changqun¹

(1.Yunnan Provincial Key Laboratory of Plateau and Mountain Ecology and Degraded Environment Restoration, School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2.School of Agriculture and Life Sciences, Kunming University, Kunming, Yunnan 650214, China; 3.Haikou Forest Farm, Kunming 650114, China)

Abstract: To understand the composition and distribution characteristics of inorganic phosphorus under different land use patterns in the source area of the eutrophic lake basin, the characteristics of distribution of soil inorganic phosphorus fractions were analyzed by selecting 6 different land use patterns (*Pinus yunnanensis* forest, barren grassland, phosphorus-rich farmland, greenhouse farmland, greenhouse ditch, and open farmland) in Chaihe Watershed in the south of Dianchi Lake. The results showed that the inorganic phosphorus content was 0.96~3.23 g/kg, accounting for 45.31%~76.41% of total phosphorus content; Fe-P and Ca-P were the main inorganic phosphorus fractions in the *P. yunnanensis* forest, barren grassland, and phosphorus-rich farmland, which accounted for 64.24%~68.24% of the inorganic phosphorus content, respectively; Ca-P and O-P were the main inorganic phosphorus fractions under the greenhouse farmland, greenhouse ditches and open farmland in flat ground, which accounted for 83.49%~89.70% of the inorganic phosphorus content. Correlation analysis showed that soil available phosphorus was significantly positively correlated with Ca-P and O-P, while the organic phosphorus and Al-P, Fe-P, O-P and Ca-P showed the significantly positive correlations. It could be seen that the mountain areas (*P. yunnanensis* forest, barren grass-

收稿日期: 2020-07-26

修回日期: 2020-12-08

资助项目: 云南省地方本科高校基础研究联合专项(2017FH001-044); 国家自然科学基金(31860133); 云南省重点研发计划(2019BC001)

第一作者: 彭珮媛(1997—), 女, 四川巴中人, 硕士研究生, 研究方向为恢复生态学。E-mail: pengpeiyuan09@163.com

通信作者: 吴晓妮(1987—), 女, 陕西商洛人, 讲师, 主要从事环境生态学研究。E-mail: wuxiaoxiaoni@163.com

land) in the watershed had better phosphorus supply potential, which was conducive to improving their ecological restoration efficiency in order to achieve effective control of nonpoint source pollution, and phosphorus-rich farmland was a key area for the prevention and control of non-point source pollution in the watershed due to its high phosphorus content and land cover characteristics.

Keywords: land use; inorganic phosphorus fraction; phosphorus supply capacity; phosphorus loss

磷是植物必不可少的限制元素之一,分为无机磷和有机磷两大类^[1],其中无机磷是土壤磷素极其重要的组成部分,是植物和微生物所需磷的主要来源^[2]。根据 Chang 等^[3]提出的分级方法,可将无机磷分为磷酸铝磷(Al-P)、磷酸铁盐磷(Fe-P)、闭蓄态磷(O-P)和磷酸钙盐磷(Ca-P)。不同无机磷组分的稳定性差异较大,受环境因子影响的差异也较大^[4-5]。研究表明,土壤的碱性条件、水分条件、施肥模式以及环境的冻融作用和土地利用方式都会影响无机磷组分^[6-10],特别是土地利用方式不同会导致土壤物理、化学以及养分有效性变化,进而导致磷素含量及组分有较大的差异^[11]。例如,农田土壤中无机磷各组分含量相对较高,矿区中 Fe-P 含量较高,而林地中的 O-P 含量较低^[12-13],同时,土地利用方式还会通过改变地上群落结构及土壤微生物生物量与活性,间接影响土壤的性质以及无机磷组成^[14]。

磷不仅是植物生长的限制因素,也是水体富营养化的关键因素。土壤中的磷会随着土壤侵蚀、地表径流和渗漏淋溶等方式进入地表及地下水体环境中并不断积累^[15],成为导致水体富营养化的主要原因之一。近年来,滇池的富营养化日益严重,已被国家列为重点治理的“三湖三河”之一^[16],滇池流域内磷素的有效防控也成为滇池富营养化治理的主要内容。目前,由土壤磷流失造成的水体磷素积累,引起水体富营养化的研究关注的多是总磷或水溶性磷^[17-18],很少从无机磷角度进行研究,而无机磷是生物所需磷的主要来源^[2],迁移入湖后,能对水生生物的生长造成显著影响。

作为滇池流域内的主要农业子流域,柴河流域内面源污染问题突出,且存在大量的林地、撂荒地、农田及沟渠等多种土地利用方式^[19],并且流域内存在大量的富磷区域,磷素背景值高,大量磷素随径流以沟渠、河道作为污染物输移的通道进入水体,进而加剧水体富营养化的风险^[20]。因此,了解柴河流域内不同土地利用方式下的无机磷组成特征对农业生产及滇池富营养化防治意义重大。鉴于此,本研究以柴河流域为研究区域,对区域内不同土地利用方式土壤无机磷组分进行比较分析,结合土壤理化性质探讨不同土地利用方式下土壤无机磷组分的变化特征,

为柴河流域乃至滇池面源污染治理提供理论依据和数据支撑。

1 研究区概况

柴河流域(24°36'—24°37' N, 102°41'—102°42' E)位于云南省中部、昆明市西南部的晋宁区,位属滇池流域南部,海拔 1 936~2 236 m,地貌以丘陵为主,为亚热带高原季风气候。年平均降水量 925.4 mm,具有干、湿季分明的气候特点,雨季主要集中在 5—10 月,降水量占全年降水的 85.9%;干季为 11 月—次年 4 月,降水量仅占全年降水的 14.1%。该区域土壤类型以砂岩、砾岩发育的山地红壤为主,局部有黄棕壤分布。流域内地形主要分为山地、坡耕地、坝平地及柴河河道,山地与坡耕地土壤平均总磷含量为 8.70 g/kg(富磷地区),坝平地土壤总磷平均含量为 2.97 g/kg^[19]。富磷山地以林地为主,其中云南松林和荒山灌草丛是主要覆被类型;富磷坡耕地主要以露天农田为主(富磷农田);坝平地主要以大棚农田和露天农田为主,农田为旱地,主要种植玉米、蔬菜、花卉等,其间分布沟渠系统收集径流,最终汇入柴河流入滇池。农田施肥主要以农家肥为主,兼施氮肥与磷肥^[21]。雨季的降水形成较明显的地表径流,加上较强的人为农业活动,易形成比较严重的面源污染。

2 材料与方法

2.1 土壤样品采集及试验方法

基于前期调查,结合研究目的及流域现实地形地貌特点(表 1),本研究选择了 6 种典型土地利用方式,从山脊到柴河河道分别分布着云南松林、荒草坡、富磷农田、大棚农田、大棚区农田沟渠以及露天农田,于 2018 年 7 月在这 6 种土地利用方式的典型区域内进行采样。由于不同土地利用方式分布面积不同,故在云南松林和荒草坡随机设置 3 个样方(15 m×15 m),样方间隔距离至少在 100 m 以上,每个样方内随机采集 5 个 0—20 cm 的表层土壤样品形成 1 个混合土样;在富磷农田、大棚农田和露天农田则随机选择 3 个样区(50 m×50 m),样区间隔距离在 300 m 以上,在每个样区内随机采集 15 个 0—20 cm 的表层土壤样品形成 1 个混合土样;大棚区农田沟渠土壤选择 3 个集中大棚

农田区,对每个大棚农田区内的生态沟渠进行随机采样并形成 1 个混合样品。共采集 0—20 cm 的表层土壤样品 18 个,所有样品带回实验室去除作物根系、石砾、有机残体等杂物后,过筛保存并进行指标分析。

表 1 柴河流域不同土地利用方式立地属性特征

样地	地形	坡度/(°)	覆盖度/%	优势物种或作物	人为干扰情况
云南松林	富磷山地	15~30	70~95	云南松、碎米花杜鹃	轻度人为干扰
荒草坡	富磷山地	15~30	40~80	马桑、蔗茅、紫茎泽兰	放牧干扰强
富磷农田	富磷坡耕地	0~15	10~70	玉米、蔬菜	人为种植管理干扰强
大棚农田	坝平地	0~3	100	蔬菜、花卉	人为种植管理干扰剧烈
大棚沟渠	坝平地	0~3	0~30	稗、早熟禾、莲子草	中度人为干扰
露天农田	坝平地	0~3	30~80	蔬菜或玉米	人为种植管理干扰强

土壤指标及方法分别为:pH 值测定采用电位计法[$V(\text{水}):m(\text{土})=5:1$];土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾氧化外加热法;土壤全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法;土壤碱解氮采用碱解扩散吸收法;土壤总磷(TP)采用酸溶-钼锑抗比色法;土壤有效磷(AP)采用双酸浸提-钼锑抗比色法^[22];无机磷(IP)分级采用 Chang 和 Jackson^[3]的方法,其中,Al-P 用 0.5 mol/L 的 NH_4F 提取,Fe-P 用 0.1 mol/L 的 NaOH 提取,O-P 用 0.3 mol/L 的柠檬酸钠和连二亚硫酸钠溶液提取,Ca-P 用 0.25 mol/L 的 H_2SO_4 提取。无机磷含量为 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 之和。

2.2 数据处理

为了了解不同土地利用方式下土壤理化性质的变化特征,数值以平均值±标准偏差的形式进行表示,同时用标准偏差除以平均值来表示该指标的变异系数(CV)。同时,为了对比不同土地利用方式下磷素的活化程度,采用土壤磷素活化系数(PAC)来表示,即土壤有效磷与全磷的比值(AP/TP)^[23]。所有数据采用 Excel 2016 对数据进行整理,单因素方差

分析和相关性分析利用 SPSS 25.0 软件进行分析,各组数据差异显著性采用 Duncan's 法进行比较。利用 Origin 9.1 进行分析制图。

3 结果与分析

3.1 土壤基本理化性质

不同土地利用方式立地属性特征、土壤基本理化性质见表 1—2,云南松林地、荒草坡及富磷农田为酸性土壤,大棚农田、大棚沟渠及露天农田为中性至碱性土壤,露天农田土壤 pH 值显著高于其他土地利用方式,达 7.69。大棚农田 SOM 平均含量显著高于其他土地利用方式,达 7.21%,而富磷农田仅为 3.74%,显著低于其他土地利用方式;SOM 平均含量的空间变异以云南松的变异程度最高,露天农田变异程度最低。对氮素而言,大棚农田、大棚沟渠与露天农田的氮素含量较高,其中大棚农田氮素含量最高;荒草坡氮素含量最低,空间变异程度以荒草坡变异程度最大。荒草坡的碱解氮含量显著低于其他土地利用方式,仅为 80.54 mg/kg,其他土地利用方式土壤碱解氮含量均较高。

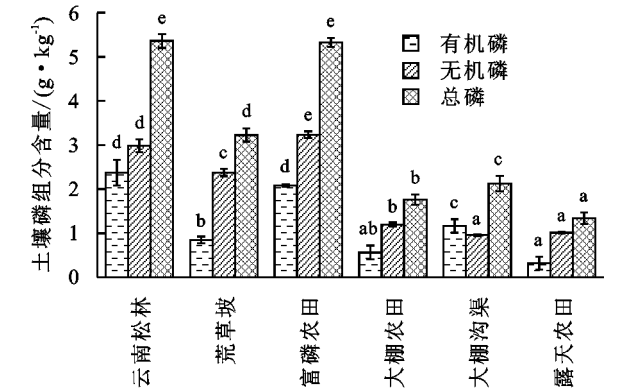
表 2 柴河流域不同土地利用方式土壤基本理化性质

样地	数据	pH 值	SOM/%	TN/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
云南松林	M±SD	4.47±0.01b	5.51±0.78b	1.76±0.30bc	140.78±29.08b
	CV/%	0.26	14.23	16.90	20.66
荒草坡	M±SD	4.47±0.04ab	4.29±0.55a	0.90±0.81a	80.54±7.52a
	CV/%	0.81	12.77	89.79	9.34
富磷农田	M±SD	4.40±0.02a	3.74±0.14a	1.09±0.22ab	212.10±12.38c
	CV/%	0.39	3.85	19.95	5.84
大棚农田	M±SD	6.94±0.09c	7.21±0.85c	2.38±0.22c	161.53±46.69bc
	CV/%	1.23	11.77	9.18	28.90
大棚沟渠	M±SD	7.54±0.02d	5.52±0.40b	2.09±0.08c	144.56±6.29b
	CV/%	0.20	7.22	3.95	4.35
露天农田	M±SD	7.69±0.01e	6.34±0.24bc	1.81±0.16c	152.08±16.92bc
	CV/%	0.08	3.71	9.09	11.12

注:数据以平均值±标准偏差(M±SD)表示,CV 为变异系数。同列不同小写字母表示各个土壤参数在不同土地利用方式之间差异显著($p<0.05$)。

3.2 土壤磷素特征

本研究区不同土地利用方式的土壤总磷、有机磷及无机磷含量见图 1。总磷含量最高的是云南松林地,达 5.36 g/kg,且土壤有机磷含量也显著高于其他土地利用方式达 2.37 g/kg,占总磷含量的 44.19%;但由于其有效磷含量较低,其 PAC 最低。总磷含量最低的是露天农田,为 1.34 g/kg,且有机磷含量也显著低于其他土地利用方式,仅为 0.32 g/kg,占总磷含量的 23.59%。富磷农田的无机磷及有效磷含量显著高于其他土地利用方式,分别为 3.23,0.24 g/kg,无机磷含量占总磷含量的 60.78%。大棚沟渠的无机磷含量显著低于其他土地利用方式,仅为 0.96 g/kg,占总磷含量的 45.31%;除该样地,其他土地利用方式的无机磷含量均高于有机磷含量。土壤有效磷及土壤磷素活化系数见图 2,其中富磷农田与大棚农田土壤的有效磷含量显著高于其他土地利用方式,而土壤 PAC 值则表明土壤磷素活化程度依次表现为大棚农田>露天农田>大棚沟渠>富磷农田>荒草坡>云南松,其中云南松和荒草坡之间、富磷农田与大棚沟渠之间土壤磷素活化程度均无显著差异(图 2)。



注:不同字母表示各个土壤参数在不同土地利用方式之间差异显著($p<0.05$),下同。

图 1 不同土地利用方式土壤总磷、有机磷及无机磷含量

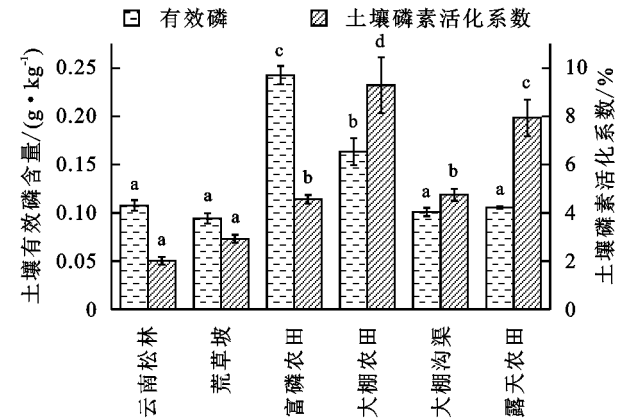


图 2 不同土地利用方式土壤有效磷含量及土壤磷素活化系数

3.3 土壤无机磷各组分含量及相关性

不同土地利用方式土壤无机磷组分含量及比例分布见图 3、表 3。研究区不同土地利用方式土壤 Ca-P 含量在 0.70~1.04 g/kg,占总无机磷的比例为 28.59%~72.56%,其中富磷农田最高,荒草坡最低;Fe-P 含量在 0.048~1.16 g/kg,占总无机磷的 4.72%~38.95%,其中云南松林地最高,露天农田最低;Al-P 含量在 0.041~0.82 g/kg,占总无机磷的 4.26%~25.45%,其中富磷农田最高,大棚沟渠最低;O-P 含量在 0.16~0.33 g/kg,占总无机磷的比例最低,为 8.02%~17.44%,其中富磷农田最高,露天农田最低。总体来看,山地区内的云南松林、荒草坡和富磷农田土壤以 Fe-P 和 Ca-P 为主,二者占无机磷含量的 64.24%~68.24%,而坝平地中的大棚农田、大棚沟渠及露天农田土壤则以 Ca-P 和 O-P 为主,二者含量占无机磷含量的 83.49%~89.70%(表 3)。

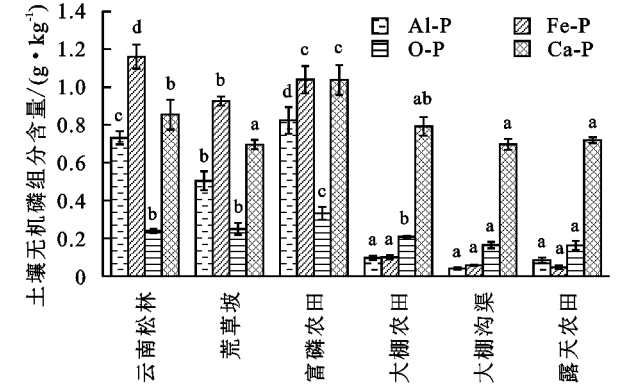


图 3 不同土地利用方式土壤无机磷各组分含量

表 3 不同土地利用方式土壤无机磷组分比例

样地	Ca-P	O-P	Fe-P	Al-P
云南松林	28.59	8.02	38.88	24.51
荒草坡	29.30	10.55	38.95	21.20
富磷农田	32.07	10.29	32.19	25.45
大棚农田	66.06	17.44	8.41	8.09
大棚沟渠	72.56	17.14	6.04	4.26
露天农田	70.88	16.08	4.72	8.32

本研究区 6 种不同土地利用方式土壤中,除有效磷外,pH 值与其他磷素形态均呈显著的负相关关系;除有效磷和 Ca-P 外,SOM 含量与其他磷素形态均呈显著的负相关关系。除有效磷外,总磷含量与其他磷素形态均有显著正相关关系,与无机磷及 Al-P 的相关性系数最高。除有效磷外,无机磷与其他磷素形态均呈显著的正相关关系。有效磷与无机磷中的 O-P 和 Ca-P 呈显著的正相关关系,有机磷与无机磷及其组分呈显著的正相关关系(表 4)。

4 讨论

4.1 土壤磷组分含量

土壤总磷是土壤磷素的总储量,是衡量磷素营养水平的参考指标,主要来源于成土母质和动植物残体的归还,也与施肥措施、土地管理方法等人类生产活动有关^[22]。本研究显示,不同土地利用方式下土壤总磷含量为 1.34~5.36 g/kg(图 1),大小顺序为云南松

林地与富磷农田>荒草坡>大棚沟渠>大棚农田>露天农田。据相关报道,农田由于施肥等管理措施,磷含量较高^[10],但在本研究中,除富磷农田,其他两种农田总磷含量均不及云南松林地,这可能与云南松林地所处富磷山地区有关,土壤磷素背景值较高。而同样处于坝平地的大棚沟渠总磷含量高于农田,则是因为沟渠为大棚农田灌溉渗出水的收集场所,汇集了农田土壤中流失的磷,因此总磷含量更高。

表 4 不同土地利用方式土壤磷素形态与土壤理化性质间的相关系数

项目	TP	AP	OP	IP	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	SOM
AP	0.420								
OP	0.939**	0.349							
IP	0.960**	0.440	0.803**						
Al-P	0.960**	0.445	0.811**	0.995**					
Fe-P	0.928**	0.250	0.769**	0.974**	0.964**				
O-P	0.774**	0.688**	0.592**	0.852**	0.835**	0.763**			
Ca-P	0.712**	0.832**	0.636**	0.709**	0.710**	0.539**	0.761**		
SOM	-0.624**	-0.317	-0.474*	-0.690**	-0.692**	-0.677**	-0.680**	-0.416	
pH	-0.885**	-0.299	-0.695*	-0.960**	-0.945**	-0.980**	-0.815**	-0.532**	0.682**

注:*,**表示在 0.05,0.01 水平上显著相关。TP 为总磷;AP 为有效磷;OP 为有机磷;IP 为无机磷;Al-P 为磷酸铝磷;Fe-P 为磷酸铁盐磷;O-P 为闭蓄态磷;Ca-P 为磷酸钙盐磷;SOM 为土壤有机质。

无机磷在土壤磷素中含量较多,占总磷的 60%~80%,是植物所需磷的主要来源^[2]。本研究显示,不同土地利用类型土壤无机磷含量为 0.96~3.23 g/kg(图 1),占总磷含量 45.31%~76.41%。结果显示,无机磷总量比例偏低,可能由于 pH 值影响了有机磷的含量,因此在云南松、富磷农田等酸性土壤中,有机磷占比较高。在该区域,无机磷形态以 Ca-P 为主,含量最高为富磷农田土壤,达 1.04 g/kg(图 3)。Ca-P 是一种比较稳定的结合态磷,主要来源于磷灰石或碎屑岩,以及较难溶的磷酸钙矿物^[24]。有研究指出 Ca-P 在酸性土壤中份额较小^[2],但该流域内总体 Ca-P 含量较高(图 3),可能与流域冲积母质来源于碎屑岩及石灰岩有关^[25]。滇池流域四周为中低山环绕,山体主要由碳酸盐岩(石灰岩和白云岩为主)、碎屑岩和玄武岩构成,这些岩层构成了流域的成土母岩,形成了以黄红壤、棕红壤为主的土壤^[26]。而云南松林地、荒草坡以及富磷农田又位于柴河流域磷矿区,不仅使 Ca-P 含量增加,还含有较高的磷酸铁盐和磷酸铝盐,使土壤中 Fe-P 含量占优势,同时 Al-P 含量也较高(图 3)。这一结果与黄维恒^[13]关于滇池南岸不同土地利用方式下土壤无机磷分布是一致的,其结果也表明在矿区土壤中 Fe-P 与 Al-P 含量较高,可见,矿区中磷素有很大一部分都是以 Fe-P 和 Al-P 的形态存

在。O-P 主要来自土壤中动物植物残体,在酸性条件下易释放出来^[2],其含量在该研究区中总体较低,虽然大棚农田、大棚沟渠和露天农田土壤中 O-P 的比例显著高于云南松林地、荒草坡以及富磷农田(表 3),但就含量来说,后三者 O-P 含量仍显著高于前三者(图 3)。可能是云南松林地、荒草坡以及富磷农田土壤 pH 值更小(表 2),O-P 易释放,因此含量更高。

土壤有机磷是土壤磷素的重要组成部分,对土壤肥力和植物营养有着重要的影响,其含量占总磷的 20%~40%^[27]。本研究显示,不同土地利用方式下土壤有机磷含量为 0.32~2.37 g/kg(图 1),占总磷含量的 23.59%~54.70%。有机磷含量与 Fe-P, Al-P 含量呈极显著的正相关关系(表 4),表明土壤 Fe-P 和 Al-P 可提高土壤有机磷含量。有机磷是以 Fe³⁺, Al³⁺ 等金属离子为桥梁与有机质结合而形成的复合物^[28]。在磷酸铁盐和磷酸铝盐含量较高的云南松林地、荒草坡以及富磷农田中,有机磷含量也较高,这可能与土壤中有较多的 Fe³⁺, Al³⁺ 等金属离子有关,利于有机磷积累。于此同时,有机磷也可通过矿化促进有效磷的含量,进而通过吸附、沉淀等过程增加土壤 Fe-P 与 Al-P 的含量^[29]。

4.2 土壤供磷潜能

土壤的供磷潜能可由无机磷的有效性结合有效

磷和土壤磷素活化系数来表征。有效磷是土壤中可被植物吸收的磷组分,是土壤磷素养分直接供应水平高低的指标。土壤磷素活化系数也可用来衡量土壤磷素的有效性^[23]。不同形态无机磷有效性的相关研究表明,在酸性旱地土壤中,A1-P 被视为有效态磷,在还原条件下 Fe-P 也是有效磷源,可通过 Fe^{3+} 的还原,使部分磷酸盐得以释放^[30-31],而 Ca-P 作为与有效磷最相关的无机磷组分(表 4),是潜在有效磷源。研究区域内,山地区的云南松林地和荒草坡土壤有效磷和 PAC 虽然较低(图 2),但作为酸性或中性土壤有效态磷(A1-P)和缓效态磷(Fe-P)含量却较高,潜在的有效磷源(Ca-P)含量也较高(图 3),表明其具有较高的供磷潜力。与其他土地利用方式相比,富磷农田土壤中有有效磷含量最高,但 PAC 仍较低(图 2),可能是由于其较高的土壤总磷含量。富磷农田中缓效态的 Fe-P 含量和潜在有效磷源的 Ca-P 含量均较高,表明其有一定的供磷潜能。大棚农田和露天农田土壤均是有效磷含量不高,但 PAC 较高(图 2),这两种土地利用方式主要分布在坝平地区,也是农业最集中且人为管理强度较高的区域,可能是农业种植以及人为管理对土壤中磷素活化造成一定影响。但这两种农田土壤中 A1-P 和 Fe-P 含量极低,表明其土壤供磷潜能不高。

4.3 土壤磷流失风险

柴河流域源头区土壤中,总磷含量较高,土壤磷素通常通过农田排水和地表径流向水体迁移,造成土壤磷素流失,从而加剧下游滇池水体的富营养化^[20]。土壤磷素流失与降雨强度、植被覆盖度、土壤理化性质、坡长、坡度以及无机磷组分等多方面因素相关^[32]。本研究区中,云南松林与荒草坡位于山地区,坡度较大,土壤总磷含量高,磷流失可能性较大,但由于其植被覆盖度高达 80%~95%(表 1,图 1),植物叶片降低了雨水对地面的侵蚀,有一定的缓冲作用。且云南松林生物量大,凋落物积累量多,进一步隔离了雨水对地表土壤的作用。而荒草坡因人为放牧干扰,磷流失风险较云南松林稍大。富磷农田和露天农田土壤,虽然植被覆盖度较高(表 1),但其复种率也高,几乎无凋落物存在,且无大棚遮盖,降水直接在田间蓄留,当超过其最大持水量时,即产生地下淋溶和地表径流土壤磷素随之进入水体,而富磷农田坡度稍大(表 1),更易形成地表径流,磷流失风险极大。大棚农田由于大棚覆盖,降雨对其没有影响,但人为种植管理干扰剧烈,灌溉、施肥等活动可能也会造成一

定的磷素流失。大棚沟渠由于大棚薄膜对降水的再汇集,使得其土壤遭受降水冲击及降水量的影响更大,且植物覆盖度低,磷素流失加剧^[33]。从磷素组分来看,流域内土壤无机磷组分以 Ca-P 和 Fe-P 为主(图 3)。碱性条件下,Ca-P 稳定性较高,但进入水体后,当水体 pH 值下降尤其是水中厌氧酸性环境会导致部分难溶性的 Ca-P 释放而造成水体内源污染^[34]。而 Fe-P 作为不稳定的磷形态,进入水体后由于氧化还原电位改变会导致磷酸盐释放^[30],增加水体中生物可利用磷的含量,可能会进一步加剧水体富营养化程度甚至威胁饮用水安全^[15]。因此,土壤总磷含量高,有效磷含量高,且 Ca-P 与 Fe-P 含量均较高的富磷露天农田土壤磷素流失潜力最高,其土壤中碱解氮含量也显著高于其他土地利用类型(表 2),在该流域面源污染防治中应作为重点土地利用方式进行防控。

5 结论

(1) 柴河流域 6 种不同土地利用方式土壤中,土壤磷素背景较高总磷含量较高。其中土壤全磷含量为 1.34~5.36 g/kg,有效磷含量为 0.09~0.24 g/kg,有机磷含量为 0.32~2.37 g/kg,无机磷含量为 0.96~3.23 g/kg。

(2) 柴河流域不同土地方式土壤中,山地区的云南松林、荒草坡和富磷农田土壤以 Fe-P 和 Ca-P 为主,二者占无机磷含量的 63.21%~68.49%,而坝平地中的大棚农田、大棚沟渠及露天农田土壤则以 Ca-P 和 O-P 为主,二者含量占无机磷含量 83.33%~89.58%。

(3) 土壤有机磷与 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 呈显著正相关;有效磷则与 O-P 和 Ca-P 呈显著正相关。

(4) 流域山地区内的荒草坡和云南松林由于具有较好的供磷潜能有利于退化区的生态修复,而由于较高的磷组分含量和磷素流失潜力,富磷农田是该流域面源污染防治的重点区域。

参考文献:

- [1] Weihrauch C, Opp C. Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far[J]. Geoderma, 2018, 325: 183-194.
- [2] 沈兵松,张鼎华.酸性土壤无机磷研究进展[J].福建林业科技, 2005, 32(1): 75-78.
- [3] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. Soil Science, 1957, 84(2): 133-144.
- [4] 王忠威,王圣瑞,戴建军,等.洱海沉积物中磷的赋存形态[J].环境科学研究, 2012, 25(6): 652-658.
- [5] 史静,俎晓静,张乃明,等.滇池草海沉积物磷形态、空间

- 分布特征及影响因素[J].中国环境科学,2013,33(10):1808-1813.
- [6] 耿玉辉,柴立涛.不同碱性条件对苏打盐碱土无机磷组分的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):226-229.
- [7] 封克,汪晓丽,陆海明,等.风干对土壤主要无机磷组分的影响[J].中国农业科学,2004,37(6):865-870.
- [8] Song K, Xue Y, Zheng X, et al. Effects of the continuous use of organic manure and chemical fertilizer on soil inorganic phosphorus fractions in calcareous soil [J]. Scientific Reports, 2017,7(1):1-9.
- [9] 乔思宇,周丽丽,范昊明,等.冻融条件下黑土无机磷分级及有效性研究[J].土壤,2016,48(2):259-264.
- [10] 滕泽琴,李旭东,韩会阁,等.土地利用方式对陇中黄土高原土壤磷组分的影响[J].草业学报,2013,22(2):30-37.
- [11] 谭玉兰,杨丰,陈超,等.喀斯特山区土地利用方式对土壤质量的影响[J].西南农业学报,2019,32(5):1133-1138.
- [12] 杨慧,曹建华,孙蕾,等.岩溶区不同土地利用类型土壤无机磷形态分布特征[J].水土保持学报,2010,24(2):135-140.
- [13] 黄维恒.滇池南岸典型区域不同土地利用方式下土壤无机态磷的分布[J].环境污染与防治,2018,40(6):689-692.
- [14] Humer U, Makeschin F, Stadler J, et al. Soil organic matter and microbial community structure in set-aside and intensively managed arable soils in NE-Saxony, Germany[J]. Applied Soil Ecology, 2008,40(3):465-475.
- [15] 胡博.不同坡度及降雨强度下面源污染中磷素流失特征研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [16] 李中杰,郑一新,张大为,等.滇池流域近20年社会经济发展对水环境的影响[J].湖泊科学,2012,24(6):875-882.
- [17] 邹继颖,刘辉,胡良宇,等.磷对吉林市小型景观水体富营养化的影响[J].黑龙江大学工程学报,2017,8(1):42-46.
- [18] 蒋倩文,刘锋,彭英湘,等.生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应[J].环境科学,2019,40(5):2194-2201.
- [19] 吴晓妮,付登高,刘兴祝,等.柴河流域典型景观类型土壤氮磷含量的空间变异特征[J].土壤,2016,48(6):1209-1214.
- [20] 付登高,吴晓妮,何锋,等.柴河流域不同景观类型径流氮磷含量及其计量比变化特征[J].生态与农村环境学报,2015,31(5):671-676.
- [21] 王洁.滇池流域不同农田化肥农药使用对壤中流水质及其自净效能的影响[D].昆明:云南大学,2016.
- [22] 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,1999.
- [23] Wu Q, Zhang S, Zhu P, et al. Characterizing differences in the phosphorus activation coefficient of three typical cropland soils and the influencing factors under long-term fertilization[J]. PLoS One, 2017, 12(5). DOI:10.1371/journal.pone.0176437.
- [24] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments: A synthesis of recent works[J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 2001, 370(2):224-228.
- [25] Zhang G S, Ni Z W, Michael G. Soil phosphorus fractions in aggregate size classes in southwestern China [J]. Soil Use & Management, 2018,34:266-275.
- [26] 冯泽波,史正涛,苏斌,等.滇池主要入湖河流水化学特征及其环境意义[J].水生态学杂志,2019,40(3):18-24.
- [27] 向万胜,黄敏,李学垣.土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J].植物营养与肥料学报,2004,10(6):663-670.
- [28] Meissner R, Leinweber P, Rupp H, et al. Mitigation of diffuse phosphorus pollution during rewetting of fen peat soils: a trans-European case study[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2008,188(1):111-126.
- [29] 姜一,步凡,张超,等.土壤有机磷矿化研究进展[J].南京林业大学学报:自然科学版,2014,38(3):160-166.
- [30] 马利民,张明,滕衍行,等.三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释的影响[J].环境科学,2008,29(4):1035-1039.
- [31] 胡宁,袁红,蓝家程,等.岩溶石漠化区不同植被恢复模式土壤无机磷形态特征及影响因素[J].生态学报,2014,34(24):7393-7402.
- [32] 杨鑫芳,李欣欣,李晋超,等.农业土地利用中磷流失研究进展[J].山西农业大学学报:自然科学版,2013,33(3):255-261.
- [33] 吴晓妮,付登高,段昌群,等.柴河流域种植方式与沟渠类型对农田径流氮、磷含量的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):38-42.
- [34] 许春雪,袁建,王亚平,等.沉积物中磷的赋存形态及磷形态顺序提取分析方法[J].岩矿测试,2011,30(6):785-794.