

喀斯特山区生态恢复中土壤剖面无机磷形态分布特征及其影响因素

蔡鑫淋, 舒英格, 陈梦军

(贵州大学 农学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: [目的] 研究贵州喀斯特高原峡谷生态恢复过程中土壤剖面无机磷的形态分布特征, 为喀斯特山区生态恢复过程土壤磷素的研究及科学管理提供科学依据。[方法] 选取贵州省晴隆县莲城镇内 4 种代表性样地(耕地、退耕还草地、荒草地和林草间作地)为对象, 研究土壤无机磷形态特征及影响因素。[结果] 4 种代表性样地土壤全磷和速效磷含量分别在 1.96~3.88 g/kg, 1.16~11.25 mg/kg 范围。无机磷总量在 591.39~1 024.79 mg/kg 之间, 表现为: 耕地>退耕还草地>林草间作地>荒草地。不同土壤剖面磷素活化系数(PAC)均远小于 2%。不同形态的无机磷含量依次表现为: O-P>Fe-P>Ca-P>Al-P; 各形态的无机磷均与速效磷呈极显著正相关关系(O-P 除外); 各无机磷形态之间呈显著相关关系。不同形态的钙素(水溶性钙和交换性钙)以及 pH 值、黏粒含量均会影响各形态无机磷的比例以及相互间的转化。[结论] 在生态恢复过程中, 研究区由耕地→退耕还草地→荒草地→林草间作地, 地表植物逐渐恢复, 土壤理化性质得到了改善, 土壤磷素含量也随之增加。

关键词: 喀斯特山区; 植被类型; 土壤剖面; 影响因素; 无机磷形态

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)02-0107-08

中图分类号: S153.6

文献参数: 蔡鑫淋, 舒英格, 陈梦军. 喀斯特山区生态恢复中土壤剖面无机磷形态分布特征及其影响因素 [J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 107-114. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.015; Cai Xinlin, Shu Yingge, Chen Mengjun. Distribution characteristics and influencing factors of inorganic phosphorus in soil profiles during ecological restoration in karst mountain areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 107-114.

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Inorganic Phosphorus in Soil Profiles During Ecological Restoration in Karst Mountain Areas

Cai Xinlin, Shu Yingge, Chen Mengjun

(College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: [Objective] The distribution characteristics of inorganic phosphorus in the soil profile during the ecological restoration process in the karst plateau canyon of Guizhou Province were studied, in order to provide a scientific basis for the research and scientific management of soil phosphorus in the ecological restoration process in karst mountain. [Methods] Four types of representative plots (cultivated land, converted cropland to grassland, barren grassland, and forest-grass intercropping land) were selected in Liancheng Town, Qinglong County, Guizhou Province, to study the morphological characteristics and influencing factors of soil inorganic phosphorus. [Results] The contents of total phosphorus and available phosphorus in four representative plots were 1.96~3.88 g/kg and 1.16~11.25 mg/kg, respectively. The total amount of inorganic phosphorus ranged from 591.39 to 1024.79 mg/kg, which was manifested as cultivated land> returning cultivated land to grassland> forest-grass intercropping land> wild grassland. Phosphorus activation coefficient (PAC) in different soil profiles was much less than 2%. The content of inorganic phosphorus in different forms was showed as follows: OP > Fe-P > Ca-P > Al-P. All forms of inorganic phosphorus showed a very significant

收稿日期: 2019-10-18

修回日期: 2019-12-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特山区林草间作生态恢复过程中土壤质量演变规律及其评价: 以贵州“晴隆模式”为例”(31460133)

第一作者: 蔡鑫淋(1994—), 男(汉族), 贵州省仁怀市人, 硕士研究生, 研究方向为植物营养。Email: 951921371@qq.com。

通讯作者: 舒英格(1973—), 男(汉族), 贵州省镇宁县人, 博士研究生, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业资源与环境、土地利用与规划研究。Email: maogen958@163.com。

positive correlation with fast-acting phosphorus (except OP). Inorganic phosphorus in different forms was positively correlated with available phosphorus. Different forms of calcium (water-soluble calcium and exchangeable calcium), as well as pH value and clay content, affected the proportion and conversion of inorganic phosphorus. [Conclusion] In the process of ecological restoration, the research area gradually recovered from cultivated land to grassland, to wild grassland, and to forest and grass intercropping. The soil physical and chemical properties were improved, and the soil phosphorus content was increased.

Keywords: karst mountain area; vegetation type; soil profile; influencing factors; inorganic phosphorus form

磷是植物生长发育必不可少的营养素之一,对维持农业的可持续发展和生态系统的平衡具有重要作用。土壤中磷素以有机态与无机态的形式存在,在土壤中无机磷占有主导地位,占全磷含量的 50%~90%^[1]。土壤中无机磷的分级是利用基于具有不同浸出能力的化学萃取剂对土壤中各种无机磷酸盐的分离。蒋柏藩和顾益初^[2]在张守敬和 Jackson^[3]等的无机磷分级方法基础上,对无机磷分级方法进行了改进,根据不同组成的 Ca-P 化合物采用相应的浸提剂将磷酸钙磷(Ca-P)细分为 3 级,即磷酸二钙型(Ca₂-P)、磷酸八钙型(Ca₈-P)、磷酸十钙型(Ca₁₀-P),并对磷酸铁(Fe-P)的测定做了改进。迄今为止,国内外许多专家学者对不同土壤类型、不同植被群落、不同土壤发生层次、不同的施肥方法、添加不同外源有机物料、外源有机酸与腐殖质、不同土地利用方式等对土壤无机磷形态间的相互转化及有效性的关系开展了较为深入的研究^[4-11]。土壤中不同形式的磷的有效性存在差异,这反映在以下事实上:植物生长和发育所需的磷主要来自土壤磷库中的可用磷。而土壤无机磷又是作为植物直接有效的磷素的重要来源,其形态结构直接影响土壤磷的生物有效性^[12]。无机磷分级是了解磷的地球化学行为和土壤中磷供应潜力的有效方法。通过了解不同形式的无机磷在土壤中的分布特征以及它们之间的关系以及与有效磷的关系,能够有效掌握土壤磷素供应状况。

喀斯特是地表生态系统的重要组成部分。以贵州高原为中心的西南岩溶区是世界三大岩溶区之一。它是中国六个脆弱的生态系统之一,植被环境高度退化,并具有独特的生态和经济问题^[13]。因此许多专家学者^[14-20]从不同角度对喀斯特生态系统的恢复与

重建措施进行了尝试和研究。陈梦军^[21]等对贵州喀斯特地区有机无机磷的方法进行了比较研究,周炼川^[22]等对贵州省荔波县及普定县不同石漠化阶段典型土壤的有效磷含量进行了研究,但目前对贵州喀斯特地区生态系统中土壤无机磷形态及分布格局还缺乏了解。因此,研究喀斯特山区土壤无机磷的形态特征及其转化的影响因素,这对喀斯特山区自然植被环境演替规律以及自然环境的开发保护具有十分重要的意义。运用适当的土壤磷分级方法研究土壤中磷的形态,转化和有效性对揭示土壤磷的供需状况具有重要意义^[23]。本文以贵州省晴隆县为研究区域,采用改进的无机磷分级方法,研究贵州喀斯特高原峡谷生态恢复过程中土壤剖面无机磷的形态分布特征,以期对喀斯特山区生态恢复过程土壤磷素的研究及科学管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省西南部黔西南州晴隆县,属于典型的石漠化治理示范区(105°01′—105°25′E, 25°33′—26°11′N),该区属于高原热带季风气候区,年平均气温为 14℃,总降水量在 1 500~1 650 mm 之间,属于贵州省内典型的高山石漠化贫困地区,全县面积的 58%左右为喀斯特地貌,该县面积的 30.59%为石漠化区域。该区生态环境十分脆弱,土壤母质为碳酸盐岩,土壤类型为黄色石灰土,研究区内岩石裸露度高,土壤侵蚀严重,土层浅薄,属于典型生态环境脆弱区。植被属亚热带常绿落叶阔叶混交林,原生植被早已遭受破坏,取而代之的是次生植被和人工植被(表 1),总体植被资源丰富^[24]。

表 1 研究区样地自然概况

利用方式	海拔/m	坡度/(°)	植被覆盖率/%	主要植被
耕地	1 406	13.2	0	玉米、烤烟轮作
退耕还草地	1 550	26.1	30	三叶草、牙毛草、黑麦草
荒草地	1 516	20.6	50	皇竹草、三叶草、茅草等
林草间作地	1 422	27.0	70	黑麦草、三叶草、楸树蕨间作

1.2 样品采集与处理

根据研究区高原峡谷生态系统的恢复过程,结合植被群落的特征,选取耕地(主要种植玉米、烤烟)、退耕还草地(主要种植三叶草、牙毛草、黑麦草)、荒草地(主要植被皇竹草、三叶草、茅草等)、林草间作地(黑麦草、三叶草、楸树间作,蕨类间作)4种不同生态恢复模式的土壤为研究对象。土壤样品采样时间为2018年,采集土壤样品均为碳酸盐岩风化发育形成的黄色石灰土。采集耕地3个、退耕还草地12个、荒草地6个、林草间作地6个共计27个样地、111个样品。选用经典采样法,取样时挖取土壤剖面。由于研究区内土层较薄,所以土壤剖面均深挖到母岩位置,用木制工具采集0—10 cm,10—20 cm以及20 cm—母岩的3层土壤,每层土样采集3 kg左右的原状土样,装入袋中带回实验室去除碎石根茎,经室内自然风干,分别研磨过2 mm筛和0.149 mm筛后用于土壤基本理化性质和土壤无机磷组分的测定。

1.3 样品分析

土壤pH值采用蒸馏水浸提(土水比为1:2.5)电位法测定。土壤有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法测定。土壤颗粒分析采用比重计法。土壤全氮测定采用开氏法,碱解氮采用碱解扩散法测定。全磷采用酸溶—钼锑抗比色法测定,速效磷采用NaHCO₃浸提—钼锑抗比色法测定^[1]。

无机磷分级测定采用蒋柏藩—顾益初的方法, Ca₂-P采用c(NaHCO₃)=0.25 mol/L浸提;Ca₈-P采用c(CH₃COONH₄)=0.5 mol/L浸提;AL-P采用c(NH₄Cl)=1 mol/L和c(NH₄F)=0.5 mol/L浸提;Fe-P采用c(NaOH)=0.1 mol/L浸提;O-P采用0.3 mol/L柠檬酸钠+连二亚硫酸钠+0.5 mol/LNaOH

浸提;Ca₁₀-P采0.5 mol/L的1/2 H₂SO₄浸提。所有磷素组分采用磷钼蓝比色法进行测定。

1.4 数据处理

数据分析采用Pearson相关系数进行分析,数据处理与作图利用Excel,Origin 2017,SPSS 20.0软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同生态恢复过程土壤理化性质分析

由表2可知,4种不同生态恢复模式土壤的pH值在6.58~7.16之间,呈中性偏碱性,同一生态恢复类型下土壤pH值随土层深度的增加而增大。4种不同代表性土壤的有机质含量在31.01~100.87 g/kg之间,平均值为62.08 g/kg,根据我国第二次全国土壤质量普查制定的土壤有机质含量分级与丰缺度指标可以看出,本研究区有机质含量处于1级,处于丰富状态。这主要是由于喀斯特山区土壤母质为碳酸盐岩,易淋溶的可溶性钙与土壤当中腐殖质结合、凝聚形成稳定的胡敏酸钙,极有利于土壤有机质的累积,所以与非岩溶区同类型土地利用土壤相比,石灰土土壤有机质含量较高^[25]。同时由于研究区气温较低,年平均气温为14℃,研究样地大量的枯枝落叶有利于有机质的积累。研究区耕地的有机质含量处于较高的水平,可能是由于栽种的玉米秸秆就地还田以及农民施加农家肥所致。研究区全磷含量在1.96~3.88 g/kg之间,平均值为2.93 g/kg;速效磷含量在1.16~11.25 mg/kg之间,平均值为4.58 mg/kg。根据土壤养分等级标准,该值属于较低水平,表明虽然喀斯特地区的总磷含量较高,但速效磷含量较低,不利于植物生长,这也是喀斯特土地生产力偏低的主要因素之一。

表2 不同生态恢复类型土壤剖面样品基本理化性质

利用方式	采样深度/cm	pH值	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	水解氮/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)
耕地	0—10	6.74±0.13 ^a	81.29±16.86 ^a	5.37±0.09 ^a	377.33±63.28 ^a	3.88±0.12 ^a	11.25±3.21 ^a
	10—20	6.79±0.14 ^a	74.84±19.87 ^a	4.99±0.68 ^{ab}	332.65±68.56 ^{ab}	3.73±0.06 ^a	7.96±5.63 ^a
	20—母岩	6.93±0.34 ^a	53.29±23.67 ^a	3.85±1.04 ^b	250.73±40.13 ^b	3.41±0.23 ^a	6.93±5.28 ^a
荒草地	0—10	6.58±0.14 ^a	75.32±18.64 ^a	5.65±1.91 ^a	415.95±117.94 ^a	3.03±0.55 ^a	4.22±2.74 ^a
	10—20	6.74±0.17 ^a	66.39±26.02 ^a	4.07±1.27 ^b	353.72±159.62 ^a	2.77±0.60 ^a	2.97±1.52 ^{ab}
	20—母岩	7.00±0.09 ^a	40.46±9.96 ^a	2.88±0.53 ^c	228.74±68.94 ^b	2.12±0.24 ^a	1.16±0.99 ^b
退耕还草	0—10	6.58±0.43 ^a	53.93±18.80 ^a	3.03±0.91 ^a	229.39±70.13 ^a	2.69±0.89 ^a	5.26±4.44 ^a
	10—20	6.72±0.34 ^a	49.80±19.85 ^a	2.70±1.00 ^a	197.93±87.21 ^a	2.39±0.90 ^a	3.13±1.94 ^a
	20—母岩	6.85±0.39 ^a	44.58±19.02 ^a	2.90±1.15 ^a	200.78±104.41 ^a	2.46±0.93 ^a	2.84±1.59 ^a
林草间作地	0—10	6.85±0.26 ^a	100.87±36.37 ^a	6.41±2.23 ^a	447.27±175.61 ^a	3.56±1.48 ^a	4.38±1.98 ^a
	10—20	7.00±0.21 ^a	73.14±32.39 ^{ab}	4.60±1.97 ^{ab}	344.56±165.04 ^a	3.21±1.44 ^a	3.06±2.03 ^a
	20—母岩	7.16±0.16 ^a	31.00±4.31 ^b	2.81±1.67 ^b	181.40±173.70 ^a	1.96±0.67 ^a	1.78±1.52 ^a

0—10 cm 土层土壤全磷变化在 2.69~3.88 g/kg 范围内,10—20 cm 土层土壤全磷变化在 2.39~3.73 g/kg 范围内,20 cm—母岩土壤全磷变化在 1.96~3.41 g/kg 之间;土壤速效磷 0—10 cm 土层变化在 4.22~11.25 mg/kg 之间,10—20 cm 土层变化在 3.06~7.96 mg/kg 之间,20 cm—母岩变化在 1.16~6.93 mg/kg 之间,土壤全磷、速效磷的含量均随土层深度的增加而减少。不同生态恢复类型土壤全磷与速效磷含量差异明显,全磷含量表现为:耕地>林草间作地>荒草地>退耕还草地,速效磷含量表现为:耕地>退耕还草地>林草间作地>荒草地。各剖面土壤 pH 值、有机质含量表现为:林草间作地>耕地>荒草地>退耕还草地,全氮、碱解氮含量表现为:林草间作地>荒草地>耕地>退耕还草地,说明在生态恢复过程中研究区地表植物逐渐恢复,增加了土壤有机质,降低了土壤中的盐分,使得土壤性质得到了改善^[26]。

2.2 不同生态恢复土壤无机磷组分分布特征

对生态恢复中土壤不同形态的无机磷进行分析(表 3),结果表明,4 种生态恢复土壤不同层次下无机磷的总量在 128.91~424.53 mg/kg 之间,占全磷的比例为 6.58%~11.96%,说明喀斯特地区无机磷在全磷中所占比例较低。 Ca_2 -P 含量在 0.61~4.67

mg/kg 之间,在总无机磷含量中所占比例平均为 1.13%; Ca_8 -P 在 1.15~4.18 mg/kg 之间,所占比例平均为 1.17%,含量仅次于 Ca_2 -P; Ca_{10} -P 在 18.16~98.30 mg/kg 之间,所占比例为 10.64%~24.56%;Al-P 在 0.95~20.79 mg/kg 之间,所占比例为 0.56%~4.9%;Fe-P 在 26.24~122.59 mg/kg 之间,所占比例平均为 26.36%;O-P 在总无机磷中所占比例最大,其含量 56.44~217.02 mg/kg 之间,所占比例为 40.99%~71.87%。由此可知,作为植物生长发育所需磷素有效的磷源 Ca_2 -P, Ca_8 -P,Al-P 在研究区无机磷组分中所占比例较低,土壤中磷素极易被碳酸钙所吸附,转化为羟基磷灰石(Ca_{10} -P),变成难以被植物吸收利用的形态,同时可从表中看出研究区 O-P 含量较高,所以这也是研究区土壤当中速效磷含量较低的原因。

在耕地和退耕还草地中,各无机磷形态含量的大小顺序为:O-P>Fe-P> Ca_{10} -P>Al-P> Ca_2 -P> Ca_8 -P;在荒草地与林草间作地中,O-P>Fe-P> Ca_{10} -P>Al-P> Ca_8 -P> Ca_2 -P。从无机磷总量来看,耕地最高,为 1 024.79 mg/kg,其次为退耕还草地 851.21 mg/kg 和林草间作 673.54 mg/kg,荒草地含量最低,为 591.39 mg/kg,无机磷总量表现与速效磷的含量表现一致。

表 3 各样地剖面无机磷形态含量

利用方式	采样深度/cm	Ca_2 -P	Ca_8 -P	Ca_{10} -P	Al-P	Fe-P	O-P	无机磷总量
耕地	0—10	4.67±3.06 ^a	4.18±2.06 ^a	98.30±61.45 ^a	20.79±8.74 ^a	122.59±46.61 ^a	174.01±170.11 ^a	424.53±115.31 ^a
	10—20	3.86±2.50 ^a	3.23±1.12 ^a	51.88±16.51 ^a	6.60±0.33 ^b	66.37±26.07 ^a	217.02±182.70 ^a	348.96±154.79 ^a
	20—母岩	2.82±1.64 ^a	2.56±1.90 ^a	61.72±20.20 ^a	5.69±0.41 ^b	56.60±15.90 ^a	121.91±31.99 ^a	251.30±4.96 ^a
荒草地	0—10	3.44±2.92 ^a	3.71±2.26 ^a	32.12±11.27 ^a	9.59±7.33 ^a	53.75±42.47 ^a	137.27±85.41 ^a	239.87±88.92 ^a
	10—20	2.23±1.53 ^a	2.76±1.66 ^{ab}	29.00±15.54 ^a	4.76±3.55 ^{ab}	56.34±34.10 ^a	85.69±37.20 ^a	180.78±40.24 ^a
	20—母岩	1.53±1.14 ^a	1.15±0.26 ^b	18.16±0.63 ^a	0.95±0.61 ^b	26.24±11.88 ^a	122.71±94.38 ^a	170.74±81.26 ^a
退耕还草	0—10	5.79±3.30 ^a	3.29±2.39 ^a	47.64±28.90 ^a	20.08±27.39 ^a	118.76±42.14 ^a	126.21±81.58 ^a	321.76±127.28 ^a
	10—20	3.89±3.35 ^a	2.38±0.98 ^a	37.37±15.94 ^a	8.96±7.62 ^a	77.21±30.50 ^a	135.31±107.37 ^a	265.12±120.19 ^a
	20—母岩	2.37±2.09 ^a	2.38±1.66 ^a	37.36±16.90 ^a	6.59±3.51 ^a	74.23±33.02 ^a	141.40±108.41 ^a	264.33±123.24 ^a
林草间作地	0—10	3.40±2.51 ^a	4.16±2.29 ^a	33.15±13.25 ^a	9.73±4.89 ^a	78.84±41.50 ^a	158.91±122.45 ^a	288.18±113.22 ^a
	10—20	2.20±1.70 ^a	2.49±1.05 ^a	30.14±13.07 ^a	4.98±3.34 ^{ab}	58.30±34.75 ^a	158.35±135.04 ^a	256.45±126.15 ^{ab}
	20—母岩	0.61±0.43 ^a	2.72±1.66 ^a	24.42±5.91 ^a	2.57±3.20 ^b	42.16±32.23 ^a	56.44±16.54 ^a	128.91±25.15 ^b

图 1 显示各无机磷形态在同一土壤剖面不同层次的含量特征。从图 1 可以看出,4 种不同代表性土壤的 Ca_2 -P,Al-P,Fe-P(除荒草地外)的含量随土层深度的增加而减少; Ca_8 -P 中除退耕还草地、林草间作地在 10—20 cm 和 20 cm—母岩含量基本相同外,其余均是随土层深度的增加而减小; Ca_{10} -P 中耕地的含量呈先减小后增大的趋势,其余均是随土层深度的增

加而减小;而 O-P 所在的 4 种代表性土壤中,则呈现不同的变化趋势,林草间作地随土层深度的增加而减少,荒草地呈先减少后增加的趋势,耕地则呈先增加后减少的趋势,退耕还草地 10—20 cm 和 20 cm—母岩含量基本相同。从无机磷总量和各组分含量的变化看,随着土壤深度的增加,土壤无机磷的增加和各组分含量的减少,表现出表层堆积的现象。

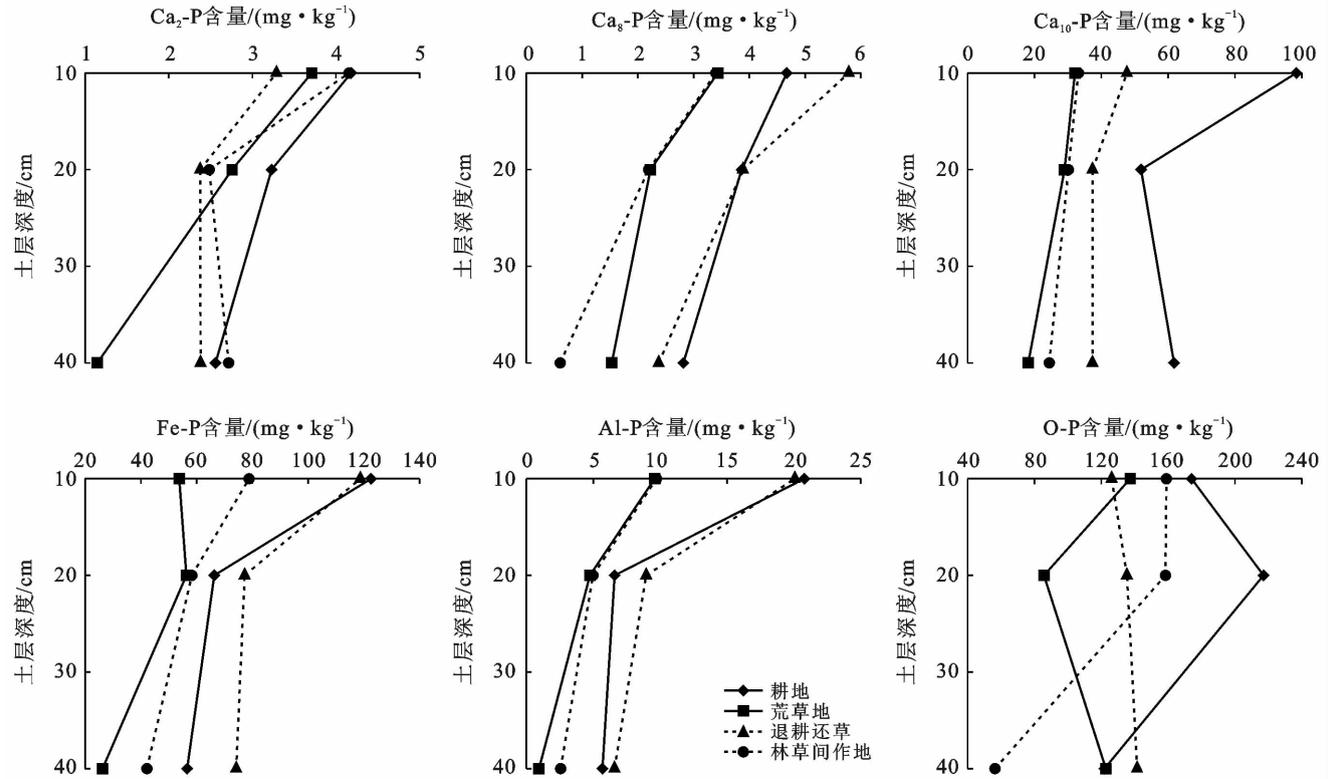


图 1 同一剖面不同发生层次上土壤无机磷分布特征

2.3 各无机磷组分关联性及有效性分析

由表 4 可知,除 O-P 与速效磷的相关性不显著外,其余形态的无机磷均与速效磷呈极显著正相关关系,这说明 Ca₂-P, Ca₈-P, Ca₁₀-P, Al-P, Fe-P 对速效磷的影响较大,均是有效磷源,可被植物吸收, Ca₈-P, Ca₁₀-P, Al-P, Fe-P 与速效磷的显著相关性表现为他们通过 Ca₂-P 均会对速效磷有显著的间接影响。各无机磷形态之间, O-P 与 Ca₂-P, Ca₈-P, Al-P 相关性

不显著,与 Fe-P 呈显著负相关关系; Ca₁₀-P 与 Ca₂-P, Al-P 相关性不显著。除此以外,其余各形态无机磷之间均呈显著相关关系或极显著相关关系。由此可以说明,在研究区域的土壤中,无机磷的每种形态均保持相对稳定的比例,并且表明,除了 O-P, Ca₁₀-P 以外,其他形式的无机磷具有不同大小的活性,在达到一定的转化条件下,各形态的无机磷可进行相互转化。

表 4 无机磷组分与速效磷相关系数和显著性检验

项目	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	Al-P	Fe-P	O-P	速效磷
Ca ₂ -P	1						
Ca ₈ -P	0.193*	1					
Ca ₁₀ -P	0.002	0.269**	1				
Al-P	0.476**	0.487**	0.383**	1			
Fe-P	0.223*	0.291**	0.128	0.348**	1		
O-P	-0.102	-0.138	0.266**	0.111	-0.194*	1	
速效磷	0.245**	0.355**	0.454**	0.550**	0.477**	0.092	1

注: ** 表示 $p < 0.01$, * 表示 $p < 0.05$, $n = 111$ 。下同。

同时,土壤全磷和速效磷是用来衡量土壤中磷素状态的两个重要指标,为了探明研究区全磷与速效磷之间转化的难易程度,选取土壤磷素活化系数(phosphorus activation coefficient, PAC),即速效磷与全磷之比来衡量土壤全磷的有效性^[27]。PAC 的计算公式为: $PAC = \text{Olsen-P} / (\text{全磷} \times 1000) \times 100\%$ 式中: Olsen-P 为速效磷 (mg/kg); 全磷单位为 g/kg。

张学敏等研究表明^[28], PAC 大于 2.0% 说明全磷容易转化为速效磷, PAC 小于 2.0% 说明全磷各形态很难转化为速效磷,有效性不高。从图 2 可以看出,研究区内 4 种代表性土壤不同发生层次的 PAC 均远远小于 2%, 说明研究区内的全磷含量虽然很高,但是能够转化为被当季植物生长利用的速效磷含量却很少。

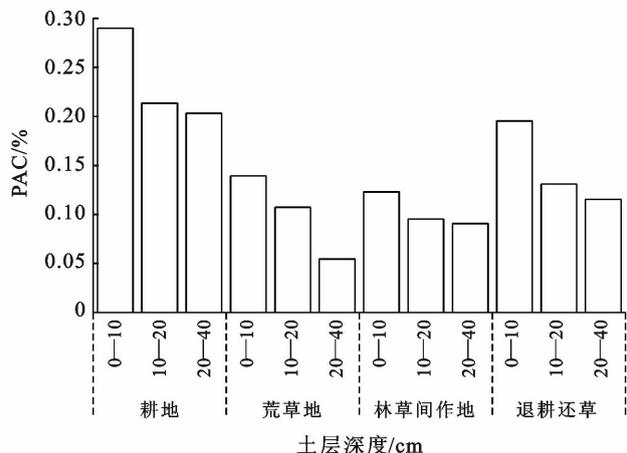


图 2 研究区不同植被类型土壤 PAC 的变化

喀斯特山区富集钙的背景以及石灰土成土过程中富钙脱钙作用反复进行,使石灰岩土壤富含大量钙素。为了进一步研究钙素对岩溶山区石灰土中无机

磷相互转化的影响,对研究区域不同剖面不同形态的钙素与总钙以及不同形态的无机磷进行相关性分析。由表 5 可以看出,土壤全钙与 Ca_8-P 呈极显著正相关;水溶性钙与 Ca_8-P 呈极显著正相关,与 $Fe-P$ 呈极显著负相关;交换性钙与 Ca_2-P , $Ca_{10}-P$, $Al-P$ 呈显著正相关,与 Ca_8-P 呈极显著正相关,与 $Fe-P$ 呈显著负相关。随着土壤钙素的增加,尤其是交换性钙的含量增加, Ca_2-P , $Ca_{10}-P$, $Al-P$ 所占比例也会随之增加, $Fe-P$ 比例下降。

各形态无机磷占无机磷总量的比例与其他土壤理化性质的相关分析结果见表 5。各形态无机磷中, Ca_2-P , $Al-P$ 与 <0.001 黏粒含量呈极显著负相关, $Fe-P$ 与 <0.001 mm 黏粒含量呈显著负相关; $Fe-P$, $O-P$ 与 pH 呈显著负相关, Ca_8-P 与 pH 呈极显著正相关。由此表明,在研究区自然条件下 pH 值与 <0.001 mm 黏粒含量均会影响无机磷的转化。

表 5 各无机磷形态含量比例与土壤理化性质间相关分析

无机磷含量/%	pH 值	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	水溶性钙	交换性钙	全钙	<0.001 mm 黏粒
Ca_2-P	0.097	0.096	-0.024	0.234*	0.139	-0.549**
Ca_8-P	0.291**	0.156	0.311**	0.349**	0.319**	-0.003
$Ca_{10}-P$	0.001	0.150	0.223*	0.199*	0.147	-0.058
$Al-P$	-0.044	0.177	0.132	0.242*	0.181	-0.355**
$Fe-P$	-0.241*	0.055	-0.231*	-0.248**	-0.153	-0.197*
$O-P$	-0.194*	0.221*	0.147	0.05	-0.107	-0.121

3 讨论

3.1 各形态无机磷含量、所占比例及有效性

土壤中磷素的含量主要取决于成土母质和耕作活动时人为含磷矿物肥料的施用。研究区全磷含量在 1.96~3.88 g/kg 之间,平均值为 2.93 g/kg;速效磷含量在 1.16~11.25 mg/kg 之间,平均值为 4.58 mg/kg。研究区内全磷含量很高,但是能够转化为当季利用的速效磷含量却很低。研究区内不同生态恢复类型土壤 PAC 均远远小于 2%,直接反映出研究区土壤全磷与速效磷的转化难易程度,表明研究区内土壤全磷很难转化为能被植物直接吸收利用的速效磷,这与杨慧等人的研究结果一致^[29]。本研究表明,在研究区内不同生态恢复土壤剖面中无机磷形态以 $O-P$ 为主,大约占无机磷总量的 40.99%~71.87% (平均约为 52.72%),其次是 $Fe-P$,所占比例平均为 26.36%, $Ca-P$ (Ca_2-P , Ca_8-P 与 $Ca_{10}-P$ 之和) 约占 17.95%, $Al-P$ 所占比例最小,约占 2.97%。这与胡宁^[30]等人研究结果一致。而化党领^[7]、张素霞^[10]等

人研究表明石灰性土壤中无机磷的形态以 $Ca-P$ 为主,这可能与研究区的气候环境条件以及土壤母质及其风化发育程度有关。本研究区土壤母质为碳酸盐岩,土壤类型为黄色石灰土,土壤无机磷的形态主要为 $O-P$ 和 $Fe-P$, $O-P$ 是被氧化铁胶膜包被的磷酸盐,其含量则明显受到土壤中氧化铁铝含量的影响。作为植物生长发育所需磷素有效的磷源 Ca_2-P , Ca_8-P , $Al-P$ 在研究区无机磷组分中所占比例较低,土壤中磷素极易被碳酸钙所吸附,转化为羟基磷灰石 ($Ca_{10}-P$), 变成难以被植物吸收利用的形态,同时可从表中看出研究区 $O-P$ 含量较高,所以这也是研究区土壤当中速效磷含量较低的原因。

在本研究中,4 种生态恢复模式土壤剖面无机磷总量在 591.39~1 024.79 mg 之间,不同层次下无机磷的总量在 128.91~424.53 mg/kg 之间,占全磷的比例为 6.58%~11.96%,说明喀斯特地区无机磷在全磷中所占比例较低。从无机磷总量来看,耕地最高,为 1 024.79 mg/kg,其次为退耕还草地 851.21 mg/kg 和林草间作地 673.54 mg/kg,荒草地含量最

低,为 591.39 mg/kg,耕地中无机磷的总量最高可能是由于人为耕作活动施肥所致。表明在研究区所属的生态脆弱区,植被恢复增加对研究区的生态建设有积极的影响作用,长期的退耕封山育草育林活动,能使植物根分泌的有机酸可以充当配体,与金属离子(例如 Ca^{2+} , Al^{3+} 或 Fe^{3+})形成络合物或螯合物,从而降低阳离子的浓度并释放无机磷^[9]。有研究表明^[31],一般认为, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 易被作物吸收,是土壤中的第一有效磷源; $\text{Ca}_8\text{-P}$, Fe-P 和 Al-P 也有相当的有效性,可作为作物的第二有效磷源; $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P 的有效性很低,是作物的潜在磷源。本研究区中各无机磷形态与速效磷的相关性表明除 O-P 与速效磷的相关性不显著外,其余形态的无机磷均与速效磷呈极显著正相关关系。本研究区中作为潜在磷源之一的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 与速效磷呈极显著正相关关系,原因还有待探究。

3.2 影响无机磷形态转化的因素

母质是土壤形成的基础,同时也是土壤中磷素形态和含量的决定因素之一。刘建国^[32]等人研究表明不同母质植烟土壤 Fe-P , Ca-P 含量差异较大,穆晓慧^[33]等人研究表明土壤类型能够影响土壤各形态磷含量的分布特征。不同的土地利用方式也会导致土壤中磷素含量分布及转化。滕泽琴^[34]等人研究表明不同土地利用方式会影响土壤各组分磷的含量,谷思玉^[35]等人对 4 种土地利用方式下的黑土土壤剖面磷素分布进行测定分析,结果表明,不同利用方式对黑土剖面磷形态分布影响较大。本研究所取土样均为同一母质发育而成的土壤,样品采集的区别在于样品所处的生态恢复阶段不同。

本研究有机质含量与 O-P 呈显著正相关关系,与其余形态的无机磷无相关关系。闫金龙^[36]等研究表明对三峡库区消落带落干期 3 种典型土壤去除有机质后,土壤中各种磷形态的含量变化较小。这与本研究相符。喀斯特山区的土壤中钙含量很高,钙含量高对土壤中无机磷的化学活性有重要影响,研究表明土壤全钙、水溶性钙、交换性钙含量与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 均呈显著或极显著正相关;水溶性钙、交换性钙与 Fe-P 呈显著或极显著负相关,表明钙含量高背景值的喀斯特地区,高钙活性对土壤无机磷有着重要的制约作用。 Fe-P 和 Al-P 是指与 Al , Fe , Mn 和它们的水合物及氧化物结合的磷酸盐。它们是土壤中主要的活性磷成分,在土壤与植物生物活动循环系统中,磷素在其中起主要作用,但它们易受土壤环境的影响,并且不同地区的含量差异很大。在南方水稻土及红壤区, Fe-P 占到无机磷总量的 30%~40%, Al-P 占 5%~10%,而在北方地区,受土壤含水量、pH 等的影

响量则明显降低^[37]。本研究中 Fe-P 所占比例平均为 26.36%, Al-P 约占 2.97%。研究区中, $\text{Ca}_2\text{-P}$, Al-P 与 $<0.001\text{ mm}$ 黏粒含量呈极显著负相关, Fe-P 与 $<0.001\text{ mm}$ 黏粒含量呈显著负相关, Fe-P , O-P 与 pH 呈显著负相关,表明研究区内 $<0.001\text{ mm}$ 黏粒含量和 pH 均会影响无机磷的转化。

4 结论

(1) 研究区土壤全磷含量在 1.96~3.88 g/kg 之间,平均值为 2.93 g/kg;速效磷含量在 1.16~11.25 mg/kg 之间,平均值为 4.58 mg/kg;无机磷总量在 591.39~1 024.79 mg/kg 之间,表现为:耕地>退耕还草地>林草间作地>荒草地。不同植被类型土壤 PAC 均远小于 2%。

(2) 研究区内 4 种同生态恢复类型土壤剖面中无机磷形态中,以 O-P , Fe-P 占绝对优势,其次为 Ca-P , Al-P 。从各无机磷形态与速效磷相关性分析来看,除 O-P 与速效磷的相关性不显著外,其余形态的无机磷均与速效磷呈极显著正相关关系。

(3) 土壤全钙、水溶性钙、交换性钙含量与 $\text{Ca}_8\text{-P}$, Fe-P 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 具有相关性。研究区自然条件下 pH 与 $<0.001\text{ mm}$ 黏粒含量均会影响无机磷的转化。

[参 考 文 献]

- [1] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社,1999:166-179.
- [2] 蒋柏藩,顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学,1989,22(3):58-66.
- [3] 范业宽,李世俊. Bowman-Cole 石灰性土壤有机磷分组法的改进[J]. 土壤通报,2004,35(6):743-749.
- [4] 丁怀香,宇万太. 土壤无机磷分级及生物有效性研究进展[J]. 土壤通报,2008,39(3):681-686.
- [5] 王艳玲,王杰,赵兰坡,等. 黑土无机磷形态及其有效性研究[J]. 水土保持学报,2004,18(3):85-89.
- [6] 包先明,崔宏. 退耕还湖后不同植被群落湿地土壤剖面磷素形态分布特征[J]. 土壤,2019,51(1):25-31.
- [7] 化党领,余长坤,刘世亮,等. 石灰性土壤不同土层磷形态研究[J]. 中国农学通报,2008,24(9):277-282.
- [8] 林德喜,范晓晖,胡锋,等. 长期施肥后简育湿润均腐土中磷素形态特征的研究[J]. 土壤学报,2006,43(4):605-610.
- [9] 章爱群,贺立源,赵会娥,等. 有机酸对不同磷源条件下土壤无机磷形态的影响[J]. 应用与环境生物学报,2009,15(4):474-478.
- [10] 张素霞,吕家珑,杨瑜琪,等. 黄土高原不同植被坡地土壤无机磷形态分布研究[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(1):29-32.

- [11] 陈冲,贾重建,卢瑛,等.珠江三角洲平原土壤磷剖面分布及形态特征研究[J].土壤通报,2015,46(5):1025-1033.
- [12] 沈仁芳,蒋柏藩.石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性[J].土壤学报,1992,29(2):80-86.
- [13] 彭晚霞,王克林,宋同清,等.喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式[J].生态学报,2008,28(2):811-820.
- [14] 史迎春,舒英格.喀斯特石漠化时空变化特征及驱动因子分析:以贵州晴隆县为例[J].林业资源管理,2017,38(1):135-143,152.
- [15] 肖盛杨,舒英格,陈梦军.喀斯特高原峡谷区不同植被类型的土壤抗蚀性[J].水土保持通报,2019,39(4):30-35,81.
- [16] 王大龙,舒英格,文小琴,等.岩溶山区石灰土剖面硅铁铝元素分布特征:以贵州省晴隆县为例[J].中国岩溶,2018,37(5):777-785.
- [17] 文小琴,舒英格,何欢.喀斯特山区土地不同利用方式的土壤养分及微生物特征[J].西南农业学报,2018,31(6):1227-1233.
- [18] 彭文君,舒英格.喀斯特山区县域耕地景观生态安全及演变过程[J].生态学报,2018,38(3):852-865.
- [19] 彭文君,舒英格.典型石漠化地区土地覆被变化对生态环境的影响:以贵州省晴隆县为例[J].江苏农业科学,2017,45(14):200-206.
- [20] 何秀,文小琴,舒英格,等.喀斯特石漠化区土地利用方式对土壤质量性状的影响[J].江苏农业科学,2017,45(9):234-238.
- [21] 陈梦军,舒英格,肖盛杨.喀斯特山区土壤有机无机磷分级方法的比较研究[J].农业资源与环境学报,2019,36(4):462-470.
- [22] 周炼川,陈效民,李孝良,等.西南喀斯特地区不同石漠化阶段土壤有效磷变异研究[J].地球科学与环境学报,2009,31(4):418-422.
- [23] 张林,吴宁,吴彦,罗鹏,等.土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J].应用生态学报,2009,20(7):1775-1782.
- [24] 高亚敏,张大权,孔嫣.晴隆县发展草地畜牧业对农村劳动力的影响[J].草业科学,2011,28(3):472-477.
- [25] 杨慧,张连凯,于爽,等.桂林毛村岩溶区与碎屑岩区不同土地利用方式对土壤水稳性团聚体特征的影响[J].中国岩溶,2012,31(3):265-271.
- [26] 胡芳,杜虎,曾馥平,等.典型喀斯特峰丛洼地不同植被恢复对土壤养分含量和微生物多样性的影响[J].生态学报,2018,38(6):2170-2179.
- [27] 张英鹏,陈清,李彦.不同磷水平对山东褐土耕层无机磷形态及磷有效性的影响[J].中国农学通报,2008,24(7):245-248.
- [28] 李学敏,张劲苗.河北潮土磷素状态的研究[J].土壤通报,1994,25(6):259-260.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 陈欣,宇万太,沈善敏.磷肥低量施用制度下土壤磷库的发展变化(II):土壤有效磷及土壤无机磷组成[J].土壤学报,1997,34(1):81-88.
- [32] 刘建国,罗建新,田飞,等.湖南不同母质植烟土壤磷形态的研究[J].烟草科技,2019,52(8):24-29.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 谷思玉,张一鹤,陆欣春,等.不同土地利用方式对农田黑土剖面磷形态分布的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(3):149-156.
- [36] 闫金龙,吴文丽,江韬,等.土壤组分对磷形态和磷吸附-解吸的影响:基于三峡库区消落带落干期土壤[J].中国环境科学,2019,39(3):1124-1131.
- [37] 齐雁冰,常庆瑞,田康,等.黄土丘陵沟壑区不同植被恢复模式土壤无机磷形态分布特征[J].农业环境科学学报,2013,32(1):56-62.