

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.

CHEN Meng-jun, SHU Ying-ge, XIAO Sheng-yang. Methods of soil organic and inorganic phosphorus fractionation in karst areas[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 462-470.

喀斯特山区土壤有机无机磷分级方法的比较研究

陈梦军, 舒英格*, 肖盛杨

(贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘要:为精准测定各形态磷含量,分析各形态磷对有效磷的贡献率,进而评价土壤的供磷能力,以贵州省晴隆县喀斯特地区草地、林地、耕地3种土地利用方式下土壤为研究对象,采用蒋柏藩-顾益初无机磷分级方法、Bowman-Cole有机磷分级方法和Tiessen-Moir有机无机磷结合分级方法进行比较研究。结果表明:各方法测定的土壤有机无机磷含量在不同土地利用方式下差异明显。综合各样地分析发现,采用蒋柏藩-顾益初法和Tiessen-Moir法测定的土壤无机磷形态含量相差不大,无机磷总量占全磷比例分别为20.13%和22.38%。采用Bowman-Cole法和Tiessen-Moir法测定的土壤有机磷含量占全磷比例相差较大,二者相差4.99个百分点,Bowman-Cole法测定土壤有机磷总量高于Tiessen-Moir法。各方法测定土壤有机无机磷形态含量与有效磷含量相关性分析表明,研究区采用蒋柏藩-顾益初土壤无机磷分级方法与Bowman-Cole有机磷分级方法更具代表性。综合考虑土壤有机无机磷的实际含量、各形态磷的化学性质及其生物有效性,研究区采用蒋柏藩-顾益初提出的土壤无机磷分级方法比较适合,Bowman-Cole提出的土壤有机磷分级方法较Tiessen-Moir法更适合于研究区土壤有机磷的分级。

关键词:喀斯特地区;土壤;有机磷;无机磷;测定方法

中图分类号:S151.9+3;S158.2 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2019)04-0462-09 doi: 10.13254/j.jare.2018.0279

Methods of soil organic and inorganic phosphorus fractionation in karst areas

CHEN Meng-jun, SHU Ying-ge*, XIAO Sheng-yang

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

Abstract: The scientific method of soil phosphorous fractionation can accurately determine the pool of phosphorus in each form, analyzing the rate of contributions about the phosphorus in the form of available phosphorus, it can evaluate the phosphorus supply capacity of soil. In this study, soils of three land use patterns including grassland, woodland and cultivated field from the karst area of Qinglong County, Guizhou Province were examined using the methods of Jiang-Gu on soil inorganic phosphorus and Bowman-Cole on organic phosphorus, and Tiessen-Moir soil organic and inorganic phosphorus fractionation to carry out comparison study of soil phosphorous fraction. The results showed that, under different land use modes, the contents of soil organic and inorganic phosphorus differed significantly. Through comprehensive analysis, it was found that there was no significant difference in the content of soil inorganic phosphorus by using the methods of Jiang-Gu and Tiessen-Moir, and the total content of which accounted for total phosphorus was 20.13% and 22.38% respectively. The methods of Bowman-Cole and Tiessen-Moir were used to determine the organic phosphorus difference in the proportion of total phosphorus in soil, with the difference between the two as high as 4.99%. However, the total organic phosphorus in soil determined by the Bowman-Cole method was higher than that by the Tiessen-Moir method. The correlation analysis of soil organic and inorganic phosphorus contents with available phosphorus content showed that the methods of Jiang-Gu and Bowman-Cole were more representative in the study area. Consider-

收稿日期:2018-10-16 录用日期:2018-11-26

作者简介:陈梦军(1993—),男,贵州三都人,硕士研究生,主要从事土壤质量监测与评价研究。E-mail: 1269441679@qq.com

*通信作者:舒英格 E-mail: maogen958@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31460133)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31460133)

ing the actual quantity of soil organic and inorganic phosphorus and the chemical properties of different forms of phosphorus and their biological effectiveness comprehensively, this research showed that the Jiang-Gu method on soil inorganic phosphorus fractionation was suitable for the study area, whereas the Bowman-Cole method on soil organic phosphorus fractionation was more suitable than the Tiessen-Moir method.

Keywords: karst area; soil; organic phosphorus; inorganic phosphorus; determination method

在土壤养分研究中,通常采用全磷评价土壤磷库大小,采用有效磷含量高低评价土壤供磷能力,而对土壤各形态磷库数量和不同形态磷可作为潜在磷源考虑较少^[1]。土壤磷素分为有机磷和无机磷两大类,磷素在土壤中的化学形态直接影响其生物有效性^[2-5]。国内外研究者较注重磷分级方法的探索和改进研究,但局限于农业土壤^[6-10],不同分级方法对磷组分之间差异研究鲜见报道。早期土壤无机磷分级方法很粗略,直至Chang和Jackson于1957年提出土壤无机磷分级方法,土壤无机磷分级才得到进一步突破,但该方法对Ca-P、Al-P、Fe-P区分还存在问题^[11]。其后,蒋柏藩等^[12]将土壤Ca-P细分为Ca₂-P、Ca₈-P、Ca₁₀-P(蒋柏藩-顾益初无机磷分级方法),并普遍运用于石灰性、中性及酸性土壤^[13]。土壤有机磷形态较复杂,Bowmen等^[14]提出的有机磷分级方法体系(Bowmen-Cole有机磷分级方法)较为完整,是目前研究土壤有机磷组分与土壤供磷能力关系最广泛采用的方法^[1]。蒋柏藩-顾益初土壤无机磷分级方法与Bowmen-Cole有机磷分级方法是目前广泛采用的土壤有机无机磷分级方法^[1,12-13]。Hedley等^[15]提出兼顾土壤

有机磷和无机磷的测定方法,但该方法对仪器精度要求高,且步骤繁琐、易损失磷素含量,众多学者都对其进行修正,但都有各自的优缺点,其中Tiessen等^[16]提出的修正法(Tiessen-Moir有机无机磷结合分级方法)最为经典,省去了含量较低的土壤微生物磷和土壤团聚体内磷,是目前应用最为广泛的Hedley磷素分级改进法^[7]。本研究采用蒋柏藩-顾益初无机磷分级方法、Bowman-Cole有机磷分级方法和Tiessen-Moir有机无机磷结合分级方法,对贵州省晴隆县喀斯特地区草地、林地、耕地3种土地利用方式下土壤磷形态进行比较研究,旨在确定适宜研究区磷素分析方法,为喀斯特地区磷素转化、生物有效性及生态恢复研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省黔西南州晴隆县(25°33′~26°11′N,105°01′~105°25′E,图1),平均海拔1456.67 m,年平均气温14℃,总降水量在1500~1650 mm之间,属高原亚热带季风气候区。贵州省喀斯特面积近

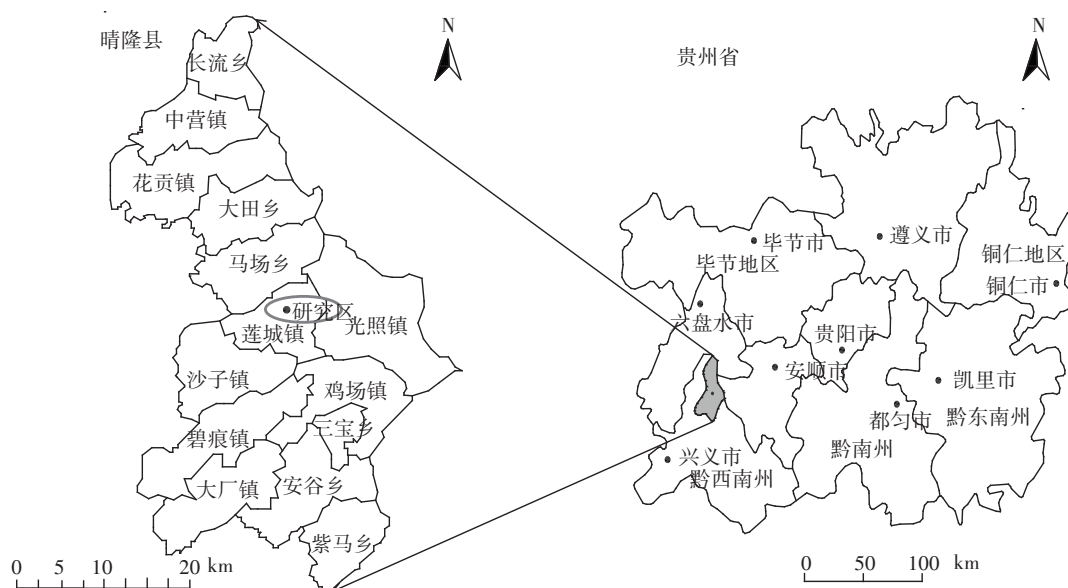


图1 研究区地理位置图

Figure 1 Location map of the study area

13万 km²,是我国西南地区喀斯特地貌发育的中心区域^[17-18]。晴隆县喀斯特面积占全县面积的57.92%,石漠化面积占全县面积的30.59%,是贵州省喀斯特地貌发育强烈、石漠化类型复杂以及石漠化面积分布较大的区域之一^[19-20]。研究区土壤母质为碳酸盐岩,土壤类型为棕色石灰土和黄色石灰土。碳酸盐岩分布区森林覆盖率低至5.02%,岩石裸露度高,石漠化面积占全省石漠化面积的40.56%^[21],水土流失严重,土层浅薄,土地贫瘠,属于典型生态环境脆弱区。

1.2 土样采集与处理

研究区位于晴隆县莲城镇,于2016年4月在研究区内选取草地、林地、耕地3种土地利用方式下的土壤为研究对象(图2)。林地包括以杉木[Cunning-

hamia lanceolata (Lamb.) Hook]和楸树(*Catalpa bungei* C. A. Mey)为主的天然林地和以扁柏[*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco]为主的人工林地;草地包括以白茅[*Imperata cylindrica* (L.) Beauv]为主的天然草地和以三叶草(*Trifolium repens* L.)、皇竹草(*Pennisetum sinense* Roxb)为主的人工草地;耕地种植玉米(*Zea mays* Linn. Sp)、萝卜(*Raphanus sativus* L)和烤烟。本研究共采集15个剖面55个土样,其中草地采集6个剖面24个土样,林地采集6个剖面22个土样,耕地采集3个剖面9个土样。土样采回后及时去除植物残体和其他侵入体,经室内风干后,分别研磨过2 mm和0.149 mm筛用于土壤基本理化性质和土壤有机无机磷组分的测定。供试土壤基本性质见表1。

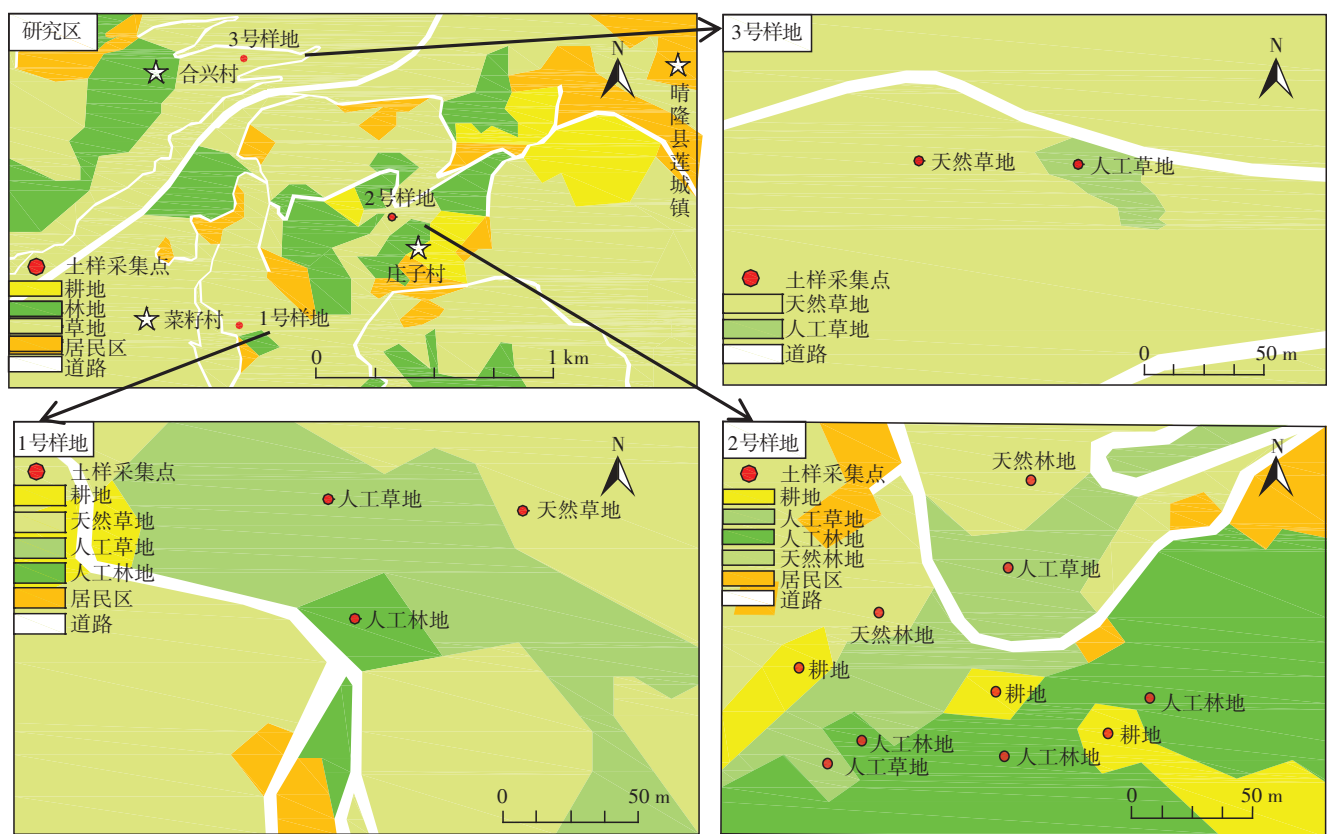


图2 研究区土地利用及采样点示意图

Figure 2 Distribution of the land use types and sampling points in the study area

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 The basic physical and chemical properties of the experimental soil

土地利用类型 Land use types	pH	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全磷 Total phosphorus/mg·kg ⁻¹	有效磷 Available phosphorus/mg·kg ⁻¹	黏粒 Clay/%
草地 Grassland	5.73~7.24	21.53~83.56	662.53~1 882.46	0.15~6.64	28.92~43.92
耕地 Cultivated field	4.90~6.91	25.17~81.14	708.99~1 629.97	0.84~13.68	25.00~36.92
林地 Woodland	4.68~7.16	14.67~136.40	729.10~2 192.43	0.29~7.40	24.92~48.92

1.3 测定方法与数据处理

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测定。全磷(TP)采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮,钼锑抗比色法测定。有效磷采用 Olsen 法,钼锑抗比色法测定。黏粒含量采用比重计法测定。土壤磷分级测定方法如下:

方法 I:无机磷的测定采用蒋柏藩等^[12]根据正磷酸盐结合阳离子差异所提出的土壤无机磷分级方法,具体为 $0.25\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ 浸提磷酸二钙($\text{Ca}_2\text{-P}$); $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NH}_4\text{Ac}$ 浸提磷酸八钙($\text{Ca}_8\text{-P}$); $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{H}_2\text{SO}_4$ 浸提磷酸十钙($\text{Ca}_{10}\text{-P}$); $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NH}_4\text{F}$ 浸提铝磷酸盐(Al-P); $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaOH-Na}_2\text{CO}_3$ 浸提铁磷酸盐(Fe-P); $0.3\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸钠- $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-NaOH}$ 浸提闭蓄态磷(O-P); $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}(1/2\text{ H}_2\text{SO}_4)$ 浸提钙磷(Ca-P); 总无机磷(Total IP)为各无机磷组分之和。有机磷的测定采用 Bowman 等^[14]根据土壤有机磷矿化率随活性增加而增加的理论所提出的有机磷分级方法,具体为 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3(\text{pH } 8.5)$ 浸提活性有机磷(LOP); $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶解的磷加上 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaOH}$ 溶解的磷为中等活性有机磷(MLOP); $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaOH}$ 浸提中等稳定性有机磷(MROP , 在 pH 1~1.5 的条件下不发生沉淀的部分富里酸磷)和高稳定性有机磷(HROP , pH 1~1.5 的条件下发生沉淀的部分胡敏酸磷); 总有机磷(Total OP)为各有机磷组分之和。

方法 II: Tiessen 等^[16]对 Hedley 磷素分级法作了进一步修正,具体为树脂浸提树脂交换磷(Resin-Pi); $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3(\text{pH } 8.5)$ 浸提得到 NaHCO_3 浸提态无

机磷和有机磷($\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$); $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaOH}$ 浸提得到 NaOH 浸提态无机磷和有机磷(NaOH-Pi 和 NaOH-Po); $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 稀盐酸浸提得到稀盐酸浸提态无机磷(D.HCl-Pi); $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓盐酸浸提得到浓盐酸浸提态无机磷和有机磷(C.HCl-Pi 和 C.HCl-Po); $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓硫酸浸提得到残留态磷(Residual-P)。

利用 Excel 2010 对数据进行处理与制表,应用 SPSS 23.0 对数据进行相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 两种方法测定土壤磷组分含量的差异

由表 2 和表 3 可知,采用方法 I 和方法 II 测定土壤无机磷组分含量及其总量在相同土层不同土地利用方式下差异普遍不显著,除个别形态差异显著外,其他差异均不明显。采用方法 I 测定土壤无机磷组分含量及其总量在不同土地利用方式下均表现为耕地含量最高,在草地和林地间差异不显著,这可能是因为耕地长期施肥能显著提高土壤无机磷组分含量^[8-9,13],而采用方法 II 测定土壤无机磷组分含量在不同土地利用方式下变化规律不明显,无机磷总量表现为林地最高,但与耕地和草地的含量差异不显著,这与耕地长期施肥能显著提高土壤无机磷组分含量的说法不一致。

由表 4 和表 5 可知,采用方法 I 和方法 II 测定土壤有机磷组分含量及其总量在相同土层不同土地利用方式下有所差异,有机磷总量在耕地土壤中均显著

表 2 方法 I 测定各样地土壤无机磷组分含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 Determination of soil inorganic phosphorus content in each plot by method I ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土层深度 Soil depth/cm	利用方式 Land use types	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	Al-P	Fe-P	O-P	Total IP
0~10	耕地 Cultivated field	4.49±0.20a	6.08±0.92a	46.24±3.51a	11.38±0.05a	161.44±29.83a	82.95±12.68a	312.57±29.18a
	草地 Grassland	1.84±0.18b	5.26±1.73a	32.54±5.10b	6.55±2.60a	119.53±31.83a	58.23±16.25a	223.95±43.71b
	林地 Woodland	1.37±0.36b	5.90±0.47a	33.61±4.17b	8.41±2.44a	110.25±26.53a	67.40±26.80a	226.95±19.41b
10~20	耕地 Cultivated field	2.59±0.58a	4.22±0.04a	46.38±17.36a	8.00±1.49a	95.66±21.85a	72.80±18.40a	228.41±33.82a
	草地 Grassland	1.76±0.14ab	3.91±2.67a	34.13±6.73a	5.34±2.03a	90.57±21.94a	69.63±16.47a	205.35±36.73a
	林地 Woodland	0.85±0.52b	3.34±0.96a	41.85±16.98a	6.30±2.18a	94.41±28.92a	70.24±34.86a	218.24±39.77a
20~40	耕地 Cultivated field	1.31±0.09a	3.90±0.71a	61.45±22.24a	6.51±0.40a	71.10±30.84a	74.55±18.23a	218.81±44.47a
	草地 Grassland	1.03±0.68a	2.34±1.00b	43.64±16.56a	4.60±1.44a	85.65±38.81a	63.98±25.74ab	201.23±38.02ab
	林地 Woodland	0.71±0.52a	2.32±0.47b	36.70±10.06a	5.31±2.79a	86.43±26.77a	42.58±9.28b	174.06±47.51b
40~60	草地 Grassland	0.59±0.23a	2.49±0.95a	25.71±9.91a	3.82±2.19a	59.30±25.88a	58.19±27.57a	150.11±63.69a
	林地 Woodland	0.30±0.19a	1.07±0.20a	37.98±6.69a	4.53±1.06a	77.55±23.93a	51.27±6.83a	172.69±35.72a

注:数据为平均值±标准差($n=3$),相同土层不同土地利用方式下不同字母表示在 5% 水平差异显著。下同。

Note: Data in the table are mean±standard deviation ($n=3$). Different letters in the same layer indicate significant differences among different land use types at 5% level. The same below.

表3 方法Ⅱ测定各样地土壤无机磷组分含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 Determination of soil inorganic phosphorus content in each plot by method Ⅱ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土层深度 Soil depth/cm	利用方式 Land use types	Resin-Pi	$\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$	NaOH-Pi	D.HCl-Pi	C.HCl-Pi	Total IP
0~10	耕地 Cultivated field	5.07±1.08a	10.53±0.32a	140.50±32.24a	35.07±7.87a	99.79±63.86a	290.96±103.64a
	草地 Grassland	3.90±0.70a	10.29±0.71a	148.46±5.02a	8.43±3.90b	42.70±39.69a	213.78±38.37a
	林地 Woodland	4.41±2.09a	8.68±3.81a	138.13±33.34a	18.08±11.55b	131.84±66.65a	301.13±108.04a
10~20	耕地 Cultivated field	4.65±0.62a	5.92±0.40a	84.66±9.98b	21.55±9.18a	74.81±50.60ab	191.59±64.86a
	草地 Grassland	3.30±0.64a	7.31±0.81a	117.60±10.57ab	7.08±4.04a	40.49±40.44b	175.78±48.16a
	林地 Woodland	3.95±1.58a	6.38±2.87a	120.87±28.78a	16.93±11.92a	150.13±41.67a	298.25±77.45a
20~40	耕地 Cultivated field	3.39±0.58a	6.04±1.40a	71.34±9.20b	17.99±15.64a	65.68±60.53a	164.43±82.02a
	草地 Grassland	2.89±0.45a	7.21±0.93a	106.85±21.70a	6.29±4.75a	32.53±32.97a	155.76±33.66a
	林地 Woodland	2.56±1.41a	5.48±3.02a	106.24±30.44a	13.07±8.24a	97.88±43.58a	225.23±79.20a
40~60	草地 Grassland	2.28±0.16a	5.25±3.43a	102.76±23.11a	9.40±4.22a	47.39±41.68a	167.07±33.16a
	林地 Woodland	1.44±0.81a	5.01±2.23a	110.17±23.19a	14.45±10.12a	164.23±45.17a	295.31±73.85a

表4 方法Ⅰ测定各样地土壤有机磷组分含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 4 Determination of soil organic phosphorus content in each plot by method Ⅰ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土层深度 Soil depth/cm	利用方式 Land use types	LOP	MLOP	MROP	HROP	Total OP
0~10	耕地 Cultivated field	6.59±1.24a	377.23±64.27a	313.97±29.70a	735.16±103.84a	1 432.94±130.94a
	草地 Grassland	7.35±3.74a	209.40±26.19b	168.94±18.88b	356.44±84.63b	742.14±125.55b
	林地 Woodland	8.86±1.58a	220.56±37.39b	139.11±46.89b	215.86±54.64b	584.38±85.32b
10~20	耕地 Cultivated field	5.22±0.57a	224.16±30.80a	290.61±40.89a	634.90±80.89a	1 154.87±72.27a
	草地 Grassland	6.24±0.41a	186.79±32.42b	149.02±19.53b	326.43±74.99b	668.48±84.62b
	林地 Woodland	7.14±2.26a	205.72±30.16ab	123.00±44.13b	178.25±35.14b	521.11±61.84b
20~40	耕地 Cultivated field	3.73±0.54a	278.22±92.25a	253.90±88.76a	498.25±74.30a	1 034.11±55.60a
	草地 Grassland	4.28±2.73a	177.52±57.89a	200.63±94.14a	292.58±101.19b	675.01±53.03b
	林地 Woodland	6.75±1.87a	206.11±5.80a	131.72±53.32a	169.70±45.92b	514.27±95.10b
40~60	草地 Grassland	5.31±3.00a	165.95±5.99a	155.69±36.87a	255.45±53.98a	582.39±10.78a
	林地 Woodland	6.14±2.28a	198.34±17.11a	119.66±56.10a	157.87±36.22a	482.02±88.06a

表5 方法Ⅱ测定各样地土壤有机磷组分含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 5 Determination of soil organic phosphorus content in each plot by method Ⅱ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土层深度 Soil depth/cm	利用方式 Land use types	$\text{NaHCO}_3\text{-Po}$	NaOH-Po	C.HCl-Po	Residual-P	Total OP
0~10	耕地 Cultivated field	29.46±3.60a	473.95±102.78a	452.05±74.92a	262.23±51.18a	1 217.68±72.67a
	草地 Grassland	24.80±7.98a	327.49±27.73ab	86.82±25.90b	231.21±3.18ab	670.32±36.38b
	林地 Woodland	26.89±8.63a	263.37±51.96b	80.93±36.85b	195.43±21.18b	566.62±39.53b
10~20	耕地 Cultivated field	24.62±1.61a	387.51±22.01a	472.76±99.48a	282.09±20.36a	1 166.99±95.89a
	草地 Grassland	19.09±0.80a	290.55±50.84ab	83.58±52.21b	236.12±23.51b	629.33±52.87b
	林地 Woodland	22.97±6.14a	228.78±58.98b	68.40±13.10b	183.04±3.48c	503.19±67.04c
20~40	耕地 Cultivated field	15.38±6.06a	254.87±59.50a	430.25±60.34a	272.97±36.52a	973.47±72.96a
	草地 Grassland	16.58±5.90a	209.44±70.87b	77.36±43.81b	245.41±34.80a	548.79±65.33b
	林地 Woodland	21.88±2.47a	253.82±58.04a	83.85±47.29b	201.19±23.03b	560.75±60.46b
40~60	草地 Grassland	17.95±2.79a	325.64±107.87a	134.26±42.44a	205.83±38.33a	683.68±38.20a
	林地 Woodland	19.33±8.86a	200.83±10.82a	54.79±11.84a	202.18±15.33a	477.14±107.61a

高于草地和林地,在草地和林地间差异不显著。有研究表明,施无机肥料对有机磷组分含量影响结论不一致,但施有机肥料能增加土壤有机磷组分含量^[8-9],其

与方法Ⅰ和方法Ⅱ测定土壤有机磷组分含量及其总量结论一致。方法Ⅰ测定土壤有机磷总量均高于方法Ⅱ,这可能是由于不同分级方法之间存在差异。

2.2 两种方法测定土壤无机磷组分含量及比例的差异

由表6可知,采用方法 I 和方法 II 浸提 Total IP 占 TP 比例相差不大,分别为 20.13% 和 22.38%。方法 II 中 Resin-Pi、NaHCO₃-Pi 和方法 I 中 Ca₂-P、Ca₈-P 均为易浸提的活性无机磷,其平均含量之和相差较大,分别占 TP 的 1.22% 和 0.46%,这可能是方法 II 采用振荡过夜测定 NaHCO₃-Pi,其浸提液包括土壤微生物体内的核酸、磷脂等活性无机磷^[15]。方法 II 浸提出的 NaOH-Pi 是可与 Fe、Al 结合的无机磷,与方法 I 浸提的 Al-P、Fe-P 平均含量之和相差不大,分别占 TP 的 10.77% 和 10.18%。方法 II 中 C.HCl-Pi 和方法 I 中 Ca₁₀-P、O-P 为稳定态无机磷^[22],平均含量之和相差不大,分别占 TP 的 8.76% 和 9.22%。但方法 I 将 Ca-Pi 细分为 Ca₂-P、Ca₈-P 和 Ca₁₀-P 三级,并能把 Fe-P、Al-P 和 O-P 较好地分离开来。有研究表明,酸性旱作土壤中 Al-P 的有效性较高,水稻土淹水条件下 Fe-P 是有效磷源^[23]。石灰性土壤 Ca₂-P 有效性最高, Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 可作为缓效磷源, Ca₁₀-P 和 O-P 只是一种潜在磷源^[12]。而方法 II 把 Al-P、Fe-P 笼统归类为 NaOH-Pi,把钙磷笼统归类为 C.HCl-Pi 的分级方法较粗。因此,方法 I 能更好地说明各形态磷的化学性质及其生物有效性。

2.3 两种方法测定土壤有机磷组分含量及比例的差异

由表7可知,采用方法 I 和方法 II 浸提的 Total OP 存在一定的差异,分别占 TP 的 74.13% 和 69.14%,二者相差 4.99 个百分点。方法 I 中 LOP 和方法 II 中 NaHCO₃-Po 为易矿化的活性有机磷,其平均含量相差较大,分别占 TP 的 0.60% 和 2.05%,这与活性无机磷相同,均受处理时间的影响。MLOP 和 NaOH-Po 是与无定形结晶铝、铁磷酸盐以及胡敏酸和富里酸结合的磷,是较易矿化的中等活性有机磷。采用方法 I 和方法 II 浸提的中等活性有机磷相差较大,分别占 TP 的 21.82% 和 26.84%。MROP 和 C.HCl-Po 是难于矿化的中稳性有机磷^[24],而采用两种方法浸提的中稳性有机磷相差不大,这与范业宽等^[6]得到的先用酸后用碱提取中等活性有机磷会降低其纯度和质量,而使中稳性有机磷含量提高的结论不一致。土壤有机磷的矿化受土壤特性^[25]、海拔高度^[26]、季节^[27]和人为因素等多种因素共同作用,因此,本研究采用两种方法浸提中等活性有机磷的差异性应从多方面影响因素作进一步分析。方法 I 中浸提的 HROP 和方法 II 浸提的 Residual-P 为不易矿化的高稳性有机磷^[28],其平均含量相差最大,分别占 TP 的 33.35% 和 22.05%,这可能是因为两种方法均采用连续提取的方法,浸提中等活

表6 两种方法测定的土壤无机磷组分含量及比例

Table 6 Quantity and proportion of inorganic phosphorus components by two methods

方法 I Method I	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	Ca-P	Al-P	Fe-P	O-P	Total IP
变幅 Range/mg·kg ⁻¹	0.26~2.23	1.44~7.69	18.25~53.65	31.00~71.15	2.10~22.79	32.40~243.09	39.38~122.70	97.28~443.99
平均含量 Average content/mg·kg ⁻¹	1.19	3.65	34.41	45.47	7.76	99.66	62.91	212.44
占全磷比例 Proportion of TP/%	0.11	0.35	3.26	4.31	0.74	9.44	5.96	20.13
方法 II Method II	Resin-Pi	NaHCO ₃ -Pi	NaOH-Pi	D.HCl-Pi	C.HCl-Pi	Total IP		
变幅 Range/mg·kg ⁻¹	0.98~7.96	1.31~26.22	40.35~237.90	1.45~54.80	16.47~256.44	70.66~559.16		
平均含量 Average content/mg·kg ⁻¹	3.88	9.02	113.61	17.23	92.43	236.17		
占全磷比例 Proportion of TP/%	0.37	0.85	10.77	1.63	8.76	22.38		

表7 两种方法测定的土壤有机磷组分含量及比例

Table 7 Quantity and proportion of organic phosphorus components by two methods

方法 I Method I	LOP	MLOP	MROP	HROP	Total OP
变幅 Range/mg·kg ⁻¹	2.62~12.85	121.92~363.38	77.26~428.38	137.43~755.77	432.11~1 554.04
平均含量 Average content/mg·kg ⁻¹	6.30	230.27	193.81	351.84	782.22
占全磷比例 Proportion of TP/%	0.60	21.82	18.37	33.35	74.13
方法 II Method II	NaHCO ₃ -Po	NaOH-Po	C.HCl-Po	Residual-P	Total OP
变幅 Range/mg·kg ⁻¹	8.84~32.75	145.99~403.49	18.02~669.03	181.21~338.31	422.54~1 431.87
平均含量 Average content/mg·kg ⁻¹	21.58	283.18	192.07	232.70	729.54
占全磷比例 Proportion of TP/%	2.05	26.84	18.20	22.05	69.14

性有机磷存在差异性而拉开了高稳性有机磷差距。方法 I 的分级依据为有机磷组分的矿化速率随其活性增加而增加,能较好地监测土壤有机磷对植物有效性影响的高低^[16]。综上可知,从两种方法浸提有机磷的实际数量和能更好地说明有机磷对植物有效性两方面考虑,方法 I 优于方法 II。

2.4 两种方法测定土壤磷组分与有效磷的相关性分析

有效磷含量的高低通常用于评价土壤供磷能力。由表 8 可知,采用两种方法测定土壤无机磷组分与有效磷的相关性较好,均达到 1% 的极显著水平,其中方法 I 的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 与有效磷的相关系数为 0.645、0.954,达到极显著水平,这与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 为主要有效磷源的说法相吻合。 Al-P 、 Fe-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 与有效磷的相关系数为 0.893、0.902、0.518,达到极显著水平,研究表明在无机磷组分中 Al-P 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为潜在的有效磷源^[23]。 O-P 与有效磷也达到极显著水平,这与 O-P 是一种潜在有效磷源的说法相吻合。而方法 II 将钙磷和铁铝磷笼统地归类,特别是钙磷的不同形态磷活性有很大差异,将同一形态但不同有效性的磷划在一级不利于磷素有效性分析^[5]。

两种方法测定土壤有机磷组分与有效磷的相关性存在较大的差异,方法 I 测得的 MLOP 相关系数最大,达到极显著水平,表明其对有效磷的贡献最大,LOP 相关系数最小。冯跃华等^[29]也认为,土壤有机磷组分中,MLOP 是土壤有效磷的主要来源,因 LOP 含量太低,对有效磷的贡献太小,只有通过 MLOP 的不断补充,才能满足作物的磷素营养需求。方法 II 中

各有机磷组分与有效磷的相关系数大小顺序为活性有机磷($\text{NaHCO}_3\text{-Po}$)>中稳性有机磷(C.HCl-Po)>高稳性有机磷(Residual-P)>中等活性有机磷(NaOH-Po)。有机磷组分的矿化速率随其活性增加而增加,活性越高的有机磷组分对植物有效性也越高^[16]。方法 II 中 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 与有效磷的相关性达到极显著水平,这与活性有机磷为主要有效磷源的说法相吻合,但中等活性有机磷与有效磷的相关系数最小,中稳性有机磷相关系数反而达到 0.507,与有效磷极显著相关,这与人研究结论不一致。

3 结论

(1) 土壤无机磷的测定采用蒋柏藩-顾益初法表现为耕地中含量较高,Tiessen-Moir 法表现为林地中含量较高。不同土地利用方式下采用 Bowman-Cole 法测定的土壤有机磷总量均高于 Tiessen-Moir 法。

(2) 研究区采用蒋柏藩-顾益初提出的土壤无机磷分级方法比较适合,Bowman-Cole 提出的土壤有机磷分级方法较 Tiessen-Moir 法更适合研究区土壤有机磷的分级。

(3) 与土壤有效磷相关性分析发现,研究区土壤采用蒋柏藩-顾益初无机磷分级方法与 Bowman-Cole 有机磷分级方法进行测定更具代表性。

参考文献:

[1] 孙桂芳,金继运,石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展

表 8 两种方法测定土壤有机、无机磷组分与土壤有效磷的相关系数

Table 8 Correlation coefficient between available phosphorus and inorganic/organic phosphorus components by two methods

分级方法 Fractionation method	组分 Constituent	相关系数 Correlation coefficient	分级方法 Fractionation method	组分 Constituent	相关系数 Correlation coefficient
I: 蒋柏藩-顾益初土壤无机磷分级测定方法 The grading determination method of soil inorganic P by Jiang-Gu	$\text{Ca}_2\text{-P}$	0.645**	II: Tiessen-Moir 对 Hedley 磷素分级法修正法 Tiessen-Moir further revised the Hedley phosphorus grading method	Resin-Pi	0.822**
	$\text{Ca}_8\text{-P}$	0.954**		$\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$	0.914**
	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	0.518**		NaOH-Pi	0.779**
	Ca-P	0.551**		D.HCl-Pi	0.867**
	Al-P	0.893**		C.HCl-Pi	0.559**
	Fe-P	0.902**		$\text{NaHCO}_3\text{-Po}$	0.541**
	O-P	0.742**		NaOH-Po	0.154
	LOP	0.103		C.HCl-Po	0.507**
Bowman-Cole 土壤有机磷分级测定方法 The grading determination method of soil organic P by Bowman-Cole	MLOP	0.751**		Residual-P	0.276
	MROP	0.268			
	HROP	0.374			

注:*表示在 5% 水平上相关性显著,**表示在 1% 水平上相关性极显著($n=26$)。

Notes: * indicates that the correlation is significant at the 5% level, ** indicates that the correlation is extremely significant at the 1% level($n=26$).

- [J]. 中国土壤与肥料, 2011(2):1-9.
- SUN Gui-fang, JIN Ji-yun, SHI Yuan-liang. Research advance on soil phosphorous forms and their availability to crops in soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(2):1-9.
- [2] 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.
- XIANG Wan-sheng, HUANG Min, LI Xue-yuan. Progress on fractioning of soil phosphorous and availability of various phosphorous fractions to crops in soil[J]. *Plant Nutrition and Fertiliser Science*, 2004, 10(6):663-670.
- [3] 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.
- DING Huai-xiang, YU Wan-tai. Review on soil inorganic-P fractionation and the influential factors on P bio-availability[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3):681-686.
- [4] 谢英荷, 洪坚平, 韩旭, 等. 不同磷水平石灰性土壤 Hedley 磷形态生物有效性的研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6):141-144.
- XIE Ying-he, HONG Jian-ping, HAN Xu, et al. Study on soil bioavailability of the Hedley P forms in calcareous soil with different phosphorus level[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6):141-144.
- [5] 韩晓日, 温秋香, 李娜, 等. 棕壤有机无机磷分级方法的比较研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(6):692-697.
- HAN Xiao-ri, WEN Qiu-xiang, LI Na, et al. Methods of inorganic and organic phosphate fractionation in brown soils[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2011, 42(6):692-697.
- [6] 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.
- FAN Ye-kuan, LI Shi-jun. A modification of Bowman-Cole fractionation method of soil organic phosphorus[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(6):743-749.
- [7] 张林, 吴宁, 吴彦, 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.
- ZHANG Lin, WU Ning, WU Yan, et al. Soil phosphorus form and fractionation scheme: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7):1775-1782.
- [8] 周广业, 阎龙翔. 长期施用不同肥料对土壤磷素形态转化的影响[J]. 土壤学报, 1993, 30(4):443-446.
- ZHOU Guang-ye, YAN Long-xiang. Effects of long-term application of fertilizers on soil phosphorus morphology and transformation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(4):443-446.
- [9] Zhang Y S, Ni W Z. Influence of organic manure on organic phosphorus fraction in soils[J]. *Pedosphere*, 1993, 30(4):361-369.
- [10] 徐光荣, 张世熔, 钟钦梅, 等. 基于 Tiessen 方法的土壤磷分级浸提过程的改进研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(1):134-140.
- XU Guang-rong, ZHANG Shi-rong, ZHONG Qin-mei, et al. Comparison study on extraction methods of phosphorus fraction in four typical soils of Sichuan basin, China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(1):134-140.
- [11] 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(1):80-86.
- SHEN Ren-fang, JIANG Bai-fan. Distribution and availability of various forms of inorganic-P in calcareous soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(1):80-86.
- [12] 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.
- JIANG Bai-fan, GU Yi-chu. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22(3):58-66.
- [13] 来璐, 郝明德, 彭令发. 土壤磷素研究进展[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1):65-67.
- LAI Lu, HAO Ming-de, PENG Ling-fa. Development of researches on soil phosphorus[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1):65-67.
- [14] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. *Soil Science*, 1978, 125(2):95-101.
- [15] Hedley M J, Stewart 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*, 1982, 46(5):970-976.
- [16] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential fractionation[M]//Carter M R, Gregorich E G. Soil sampling and methods of analysis. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [17] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4):461-466.
- YUAN Dao-xian. World correlation of karst ecosystem: Objectives and implementation plan[J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(4):461-466.
- [18] 苏维词, 杨华, 李晴, 等. 我国西南喀斯特山区土地石漠化成因及防治[J]. 土壤通报, 2006, 37(3):447-451.
- SU Wei-ci, YANG Hua, LI Qing, et al. Rocky land desertification and its controlling measurements in the karst mountainous region southwest of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3):447-451.
- [19] 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, 1(1):135-143.
- SHI Ying-chun, SHU Ying-ge. Analysis on karst rocky desertification temporal and spatial variation characteristics and driving factors: A case study of Qinglong County of Guizhou Province[J]. *Forestry Resource Management*, 2017, 1(1):135-143.
- [20] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 等. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. 生态学报, 2014, 34(18):5328-5341.
- SONG Tong-qing, PENG Wan-xia, DU Hu, et al. Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18):5328-5341.
- [21] 彭文君, 舒英格. 基于 GIS 的石漠化山区县域土地利用空间变化的生态风险测度[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1):342-348.
- PENG Wen-jun, SHU Ying-ge. Assessment on ecological risk of land use spatial change at county level in the rocky desertification mountainous area based on GIS[J]. *Research of Soil and Water Conserva-*

- tion, 2018, 25(1):342-348.
- [22] 李会彬, 李东坡, 武志杰, 等. 不同开垦年限白浆土土壤磷库特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(1):135-140.
LI Hui-bin, LI Dong-po, WU Zhi-jie, et al. Albic soil phosphorus fractions after different years of cultivation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1):135-140.
- [23] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998:160-162.
LU Ru-kun. Principles and fertilization of soil-plant nutrition[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998:160-162.
- [24] 杨小燕, 陈祥伟. 未开垦干扰黑土土壤磷素形态垂直分布特征[J]. 土壤通报, 2016, 47(2):378-383.
YANG Xiao-yan, CHEN Xiang-wei. Vertical distribution of soil phosphorus fractionation in uncultivated black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(2):378-383.
- [25] Ivanoff D B, Reddy K R, Robinson S. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols[J]. *Soil Science*, 1998, 163(1):36-45.
- [26] 董 伟. 不同草甸类型土壤有机磷的分组与探讨[J]. 养殖与饲料, 2008, 4(8):56-58.
DONG Wei. Grouping and discussion of soil organic phosphorus in different meadow types[J]. *Culture and Feed*, 2008, 4(8):56-58.
- [27] Scott J T, Condron L M. Dynamics and availability of phosphorus in the rhizosphere of a temperate silvopastoral system[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2003, 39(2):65-73.
- [28] Rose T J, Hardiputra B, Rengel Z. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics[J]. *Plant & Soil*, 2010, 326(1/2):159-170.
- [29] 冯跃华, 张杨珠, 黄运湘, 等. 湖南省主要类型水稻土有机磷形态分级研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2001, 27(1):24-28.
FENG Yue-hua, ZHANG Yang-zhu, HUANG Yun-xiang, et al. Fractionation of organic phosphorus forms in major types of paddy soils in Hunan Province[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2001, 27(1):24-28.