

DOI: 10.5846/stxb201303190452

胡宁, 袁红, 蓝家程, 袁道先, 傅瓦利, 文志林. 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. 生态学报, 2014, 34(24): 7393-7402.

Hu N, Yuan H, Lan J C, Yuan D X, Fu W L, Wen Z L. Factors influencing the distribution of inorganic phosphorus fractions in different vegetation restoration areas in karst rocky desertification areas. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24): 7393-7402.

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

胡 宁^{1,*}, 袁 红², 蓝家程¹, 袁道先^{1,3}, 傅瓦利¹, 文志林¹

(1. 西南大学地理科学学院/西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要:为分析岩溶石漠化区不同植被恢复模式土壤无机磷的形态特征,评价植被恢复的土壤供磷潜力,阐明有机碳及钙素在无机磷形态转化中的作用,选取研究区内 8 种有代表性的样地,采用蒋柏藩无机磷分级方法对土壤无机磷形态特征及影响因素进行研究。结果表明:研究区土壤全磷与速效磷含量分别在 0.25—1.35 g/kg、1.05—53.01 mg/kg 范围,无机磷总量在 123.94—934.61 mg/kg,耕地与退耕地以及各退耕地之间全磷、速效磷、各形态无机磷含量水平差异明显,各退耕地磷素含量水平介于耕地与次生马尾松林地之间,退耕地中桃林地、花椒林地磷素含量水平较高、樟树林地、柳杉林地、撂荒草地次之、撂荒灌丛地较低。各样地土壤无机磷占全磷比例在 51.2%—72.4%,不同形态的无机磷含量表现为 O-P>Fe-P>Ca-P>Al-P,其中 Ca₂-P、Al-P 对速效磷的贡献率大,Fe-P、Ca₈-P 贡献较小,O-P、Ca₁₀-P 贡献率最小。不同活性土壤有机碳与不同形态钙素对各形态无机磷在总无机磷中比例的影响较大,pH、容重、粘粒含量、含水量等其它理化性质影响较小。

关键词:植被恢复;岩溶石漠化;无机磷形态;影响因素

Factors influencing the distribution of inorganic phosphorus fractions in different vegetation restoration areas in karst rocky desertification areas

HU Ning^{1,*}, YUAN Hong², LAN Jiacheng¹, YUAN Daoxian^{1,3}, FU Wali¹, WEN Zhilin¹

1 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir (Ministry of Education), School of Geographical Sciences, Southwest China University, Chongqing 400715, China

2 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China

3 The Karst Dynamics Laboratory (MLR), Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China

Abstract: Phosphorus is an essential element for plant growth. It is taken up from the soil where it is found in two main forms, organic phosphorus and inorganic phosphorus. In cultivated soils, inorganic phosphorus is the main form found. Phosphorus is very active chemically in soils. Mineral phosphorus added to cultivated soils in fertilizer is readily fixed, which results in low availability of phosphate. Furthermore, the availability of inorganic phosphorus is different in different inorganic phosphorus fractions. The fractionation of inorganic phosphorus allows us to understand the geochemical behavior of inorganic phosphorus and measure the potential availability of the soil phosphorus pool. Limestone soils are typical azonal soils, which are formed from a parent material of carbonate rock and are typically characterized by high concentrations of calcium. This property strongly influences the geochemical behavior of inorganic phosphorus. To analyze the characteristics of

基金项目:国家自然科学基金(41072192, 41202135);岩溶动力学重点实验室开放课题项(KDL2011-04);重庆市自然科学基金(CSTC2012jjA80008)

收稿日期:2013-03-19; 网络出版日期:2014-03-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ninghu2006@yahoo.com.cn

soil inorganic phosphorus in areas with different patterns of vegetation recovery in karst rocky areas, and evaluate the potential capacity of different fractions to provide phosphorus and the roles of organic carbon and calcium in the process of inorganic phosphorus transformation in karst areas, we studied the characteristics of inorganic phosphorus in these areas by applying the Jiangbofan method for fractionating inorganic phosphorus. This allowed an investigation of the factors influencing the transformation of inorganic phosphorus in eight representative types of land. Concentrations of total and available phosphorus in the soils ranged from 0.25—1.35 g/kg and 1.05—53.01 mg/kg, respectively. Total inorganic phosphorus contents ranged from 123.94—934.61 mg/kg and it was the main form in the study area. The concentrations of total phosphorus, available phosphorus and inorganic phosphorus fractions showed significant differences between cultivated land and abandoned land, and also among the abandoned lands. By comparison with secondary Masson pine woodland, phosphorus concentrations in cultivated lands showed an accumulation process, whereas abandoned lands showed a consumption process. Phosphorus concentrations in abandoned lands were higher than in secondary Masson pine woodland and lower than in cultivated land. In abandoned lands, the Peach land and Pepper land had the highest phosphorus concentrations, followed by Camphor tree land, Cryptomeria land, ruderal land, and scrubland which had the lowest concentrations of phosphorus. The proportion of inorganic phosphorus to total phosphorus ranged from 51.2%—72.4% in different soil profiles. Concentrations of inorganic phosphorus fractions followed the order: O-P > Fe-P > Ca-P > Al-P, with $\text{Ca}_2\text{-P}$ and Al-P providing the highest contribution to available phosphorus, Fe-P providing a lower contribution, and the contributions of $\text{Ca}_8\text{-P}$, O-P and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ being the lowest. Soil organic carbon of different active levels and different calcium fractions play important roles in the transformation of inorganic phosphorus, whereas pH, bulk density, clay content, water content, and other soil physical and chemical properties have a lesser impact. TOC, LOC, and DOC were significantly or very significantly positively correlated with $\text{Ca}_2\text{-P}$, Al-P, Fe-P, and $\text{Ca}_8\text{-P}$, significantly negatively correlated with O-P, and showed no significant correlation with $\text{Ca}_{10}\text{-P}$. Soil total calcium, exchangeable calcium were significantly or very significantly negatively correlated with $\text{Ca}_2\text{-P}$, Al-P, Fe-P, and positively correlated with $\text{Ca}_{10}\text{-P}$. Soil pH, bulk density, clay content, water content showed no significant correlation with fractions of inorganic phosphorus.

Key Words: vegetation restoration; rocky desertification; inorganic phosphorus fraction; influent factors

土壤磷素是植物生长必需的营养元素之一,由有机态磷和无机态磷两部分组成。在农业土壤中,无机磷是主体,无机磷含量一般要占土壤全磷含量的 60%—80%^[1]。土壤磷素是化学性质十分活跃的元素,矿质磷肥施入土壤后,极易被固定,当季利用率仅为 10%—25%^[2]。不同组分的无机磷含量及其有效性差异很大,无机磷分级研究是了解磷素地球化学行为,衡量土壤供磷潜力的有效方法。蒋柏藩和顾益初^[3]在张守敬^[4]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。该方法将磷酸钙磷(Ca-P)细分为 3 级,并对磷酸铁磷(Fe-P)的测定作了改进。改进后使钙盐在化学性质上更加清楚,对阐明磷素的生物有效性也有重要影响。

近年来,许多研究者对无机磷组分及磷素的化学行为进行了深入研究,包括不同土壤类型、不同施肥方式、不同轮作方式、不同外源有机物料、外源有

机酸与腐殖质、不同利用方式^[5-10]等对土壤无机磷形态影响。这些研究结果表明,不同土壤类型各无机磷组分含量差异较大,且不同农业措施及添加外源物质处理方式对土壤各无机磷组分均有重要影响。但这些研究大多集中在非岩溶区土壤,而很少涉及到岩溶面积分布广大的西南岩溶地区,且对无机磷组分转化的影响因素分析只涉及到某一方面,没有从土壤理化性质本身出发进行多方面分析。石灰土属典型的非地带性土壤,受成土母质碳酸盐岩的深刻影响,具有富钙的典型特征,其磷素的化学行为也必表现不同。为分析岩溶石漠化区不同植被恢复模式土壤无机磷的形态特征,评价植被恢复的土壤供磷潜力,阐明有机碳及钙素在无机磷形态转化中的作用,本文以重庆南平镇石庆村为例,系统分析了研究区土壤无机磷各组分的分布特征及其影响因素,以期在岩溶石灰土地区对土壤磷素进行科学

管理、提高磷素的利用效率提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于南川区南平镇,是“重庆地区喀斯特山地退化生态系统恢复与重建技术开发”示范区,地理坐标为 E106°59′40″—E107°00′17″,N29°04′51″—N29°04′38″,属于中亚热带湿润性季风气候,年均温 16.6 ℃,年均降雨量 1286 mm,降雨主要集中在 4—10 月份。区内主要地貌类型为岩溶槽谷,海拔在 600—800 m。出露地层主要为嘉陵江组浅灰色中薄层灰岩及飞仙关组浅灰至深灰色中薄层灰岩、泥灰岩、白云质灰岩及紫褐色泥岩、页岩。碳酸盐岩分布

区岩石裸露率高,植被覆盖率较低,土壤侵蚀严重,为轻度至中度石漠化地区。

1.2 样品采集与处理

本研究所取土样均为发育在灰岩母质上的黄色石灰土。依据不同退耕方式依次选取桃林地、花椒林地、樟树林地、柳杉林地、撂荒草地、撂荒灌丛地,退耕年限均在 3—6a 之间,另选取旱耕地和次生马尾松灌丛共计 8 个样地。每一样地依据其面积大小分别按土壤发生学层次采集 2—3 个剖面土壤样品,分别混合均匀,一部分新鲜土样 4 ℃ 冰箱保存备用,另一部分风干、研磨备用。各取样点均位于各样地坡中间部位的向阳坡位,海拔介于 705—748 m 之间。各剖面土壤样品基本理化性质见表 1。

表 1 各剖面土壤样品基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties in different soil profiles

剖面编号 Profiles Number	利用方式 Landuse types	层次 Layers	采样深度 Depths/ cm	容重 Bulks density/ (g/cm ³)	pH	有机碳 Organic carbon/ (g/kg)	全氮 Toal nitrogen/ (g/kg)	水解氮 Avail nitrogen/ (mg/kg)	全磷 Toal phosphorus/ (g/kg)	速效磷 Avail phosphorus/ (mg/kg)	粘粒 Clay/ %
I	耕地	A	0—21	1.22	5.03	22.24	1.51	108.51	1.35	53.01	32.53
		AB	21—48	1.36	5.23	16.85	1.38	100.06	0.64	5.09	28.86
		B	48—60	1.38	6.11	8.10	1.32	82.63	0.34	2.65	29.76
II	桃林地	A	0—20	1.18	4.78	22.75	1.80	103.60	1.29	50.34	35.00
		AB	21—39	1.18	5.47	14.26	0.94	78.67	0.60	9.08	40.43
		B	40—50	1.34	5.45	5.59	0.55	32.04	0.29	2.42	56.10
III	花椒林地	A	0—21	1.18	4.70	22.22	1.81	102.22	1.06	34.72	30.00
		AB	21—41	1.28	4.78	13.93	1.54	77.74	0.46	4.60	29.04
		B	41—58	1.28	6.38	6.91	0.50	46.60	0.30	1.98	22.60
IV	樟树林地	A	0—15	1.16	5.30	23.14	1.74	109.15	0.91	22.85	29.88
		AB	15—36	1.24	5.01	20.74	1.01	96.38	0.65	13.87	25.61
		B	36—53	1.43	5.86	12.74	0.91	77.13	0.36	1.05	21.34
V	柳杉林地	A	0—17	1.35	5.31	20.51	1.26	99.15	0.70	12.61	22.41
		AB	17—40	1.49	6.21	12.96	1.17	135.28	0.38	3.70	26.73
		B	40—60	1.42	6.01	6.24	0.11	22.86	0.21	1.50	21.50
VI	撂荒草地	A	0—20	1.09	6.95	24.53	1.89	150.71	0.80	8.31	30.72
		B	20—46	1.19	6.89	6.70	1.14	54.85	0.28	1.09	24.60
VII	撂荒灌丛地	A	0—12	1.11	7.60	27.31	2.31	174.03	0.52	7.41	18.75
		AB	12—24	1.15	7.25	14.90	1.89	124.90	0.35	2.46	31.91
		B	24—49	1.15	7.15	7.34	1.47	58.81	0.26	1.58	27.88
VIII	马尾松林地	A	0—13	1.18	4.52	18.17	1.38	92.52	0.28	1.99	32.30
		AB	13—40	1.27	5.20	9.07	0.81	69.08	0.25	2.88	31.08
		B	40—60	1.30	5.26	4.34	0.53	49.99	0.23	1.52	25.05

1.3 分析方法与数据处理

无机磷分级采用蒋柏藩-顾益初方法^[3];溶解性有机碳采用 K₂SO₄ 浸提(新鲜土壤),TOC 分析仪测

定^[1];易氧化有机碳采用 333 mmol/L KMNO₄ 氧化法^[11];土壤全钙采用碳酸钠熔融 ICP-OES 测定,交换性钙采用醋酸铵浸提 ICP-OES 测定^[12],水溶性钙

采用蒸馏水浸提 ICP-OES 测定。其他理化性质测定^[12];土壤颗粒分析采用比重计法;有机质测定采用重铬酸钾容量法;全氮测定采用开氏法;碱解氮测定采用扩散法;全磷测定采用酸溶-钼锑抗比色法;速效磷测定采用 NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法。

采用 Pearson 相关系数进行数据相关分析,采用通径分析方法分析无机磷组分对速效磷贡献大小。数据处理过程与作图应用 EXCEL、SPSS16.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复土壤磷素分析

2.1.1 不同植被恢复土壤全磷与速效磷分布

由表 1 可以看出,A 层土壤全磷变化在 0.278—1.351 mg/g 范围内,AB 层土壤变化在 0.252—0.648 mg/g 范围内,B 层土壤变化在 0.211—0.355 mg/g 之间;土壤速效磷 A 层土壤变化在 1.99—53.10 mg/kg 之间,AB 层土壤变化在 2.46—13.87 mg/kg 之间,B 层土壤变化在 1.05—2.65 mg/kg。各样地剖面土壤全磷和速效磷含量差异明显,尤其表现在 A 层土壤,全磷含量绝对量相差 1.073 mg/g,速效磷相差 51.91 mg/kg,自表层向下差异减小,B 层土壤全磷与速效磷含量在各样地剖面之间差异最小。各退耕地之间全磷与速效磷含量差异明显,全磷含量表现为桃林地>花椒林地>樟树林地>撂荒草地>柳杉林地>撂荒灌丛地,速效磷含量表现为桃林地>花椒林地>樟树林地>柳杉林地>撂荒草地>撂荒灌丛地。

次生马尾松灌丛地受人类活动干扰较小,林龄长(20—30a)土壤磷素水平极低,A 层土壤全磷与速效磷含量分别为 0.278、1.99 mg/kg,且在剖面上的差异较小,一定程度上能反映当地自然状态下土壤磷素水平。与马尾松林地相比较,耕地表现出明显的土壤磷素积累过程,尤其在 A 层表现明显,全磷含量达到 1.351 mg/g、速效磷含量 53.10 mg/kg。桃林地与花椒林地属于经济林,每年依然有一定数量的无机磷肥投入,表现出不同程度地磷素积累状态。耕地退耕后,全磷和速效磷均不同程度下降,处于积累磷素消耗阶段,其中速效磷下降最为迅速。

2.1.2 不同植被恢复土壤无机磷组分分布特征

对各样地土壤不同形态无机磷进行分析(见表 2),结果表明,各剖面土壤 A 层土壤各形态无机磷含量均以耕地最高、马尾松林地最低,与全磷速、效磷的变化趋势相似。表层土 Ca₂-P 含量依次为:桃林地>樟树林地>花椒林地>柳杉林地>撂荒草地>撂荒灌丛地;Ca₈-P 含量依次为:桃林地>花椒林地>樟树林地>撂荒草地>撂荒灌丛地>柳杉林地;Al-P 含量依次为:桃林地>花椒林地>樟树林地>撂荒草地>柳杉林地>撂荒灌丛地;Fe-P 含量依次为:桃林地>花椒林地>樟树林地>柳杉林地>撂荒草地>撂荒灌丛地;O-P 含量依次为:桃林>花椒林地>樟树林地>柳杉林地>撂荒草地>撂荒灌丛地;Ca₁₀-P 含量依次为:桃林地>花椒林地>撂荒草地>柳杉林地>撂荒灌丛地>樟树林地。

表 2 各样地剖面无机磷形态含量

Table 2 Fractions of inorganic phosphorus in different soil profiles

剖面编号 Profiles number	利用方式 Landuse types	土层 Layes	Ca ₂ -P/ (mg/kg)	Ca ₈ -P/ (mg/kg)	Al-P/ (mg/kg)	Fe-P/ (mg/kg)	O-P/ (mg/kg)	Ca ₁₀ -P/ (mg/kg)	无机磷总量 Toal inorganic phosphorus/ (mg/kg)
I	耕地	A	49.26	16.68	111.95	280.90	388.69	87.13	153.07
		AB	6.60	2.39	8.69	136.43	237.29	19.93	28.91
		B	2.06	1.25	4.73	50.73	108.80	12.92	16.23
II	桃林地	A	44.50	9.57	87.65	266.57	381.12	55.17	122.34
		AB	6.05	1.56	14.05	122.65	272.54	15.44	23.04
		B	2.87	0.87	4.56	53.53	111.84	10.66	14.40
III	花椒林地	A	18.26	9.56	67.86	259.79	316.40	52.15	79.97
		AB	3.92	0.41	10.89	51.77	173.45	24.53	28.87
		B	4.58	1.01	4.67	30.27	108.94	13.40	18.99
IV	樟树林地	A	23.92	4.84	48.79	241.65	304.53	37.86	66.62
		AB	11.23	2.04	22.65	155.47	170.55	42.98	56.25

续表

剖面编号 Profiles number	利用方式 Landuse types	土层 Layes	Ca ₂ -P/ (mg/kg)	Ca ₈ -P/ (mg/kg)	Al-P/ (mg/kg)	Fe-P/ (mg/kg)	O-P/ (mg/kg)	Ca ₁₀ -P/ (mg/kg)	无机磷总量 Toal inorganic phosphorus/ (mg/kg)
V	柳杉林地	B	5.41	0.92	6.79	59.07	132.92	15.68	22.01
		A	12.84	2.61	25.77	195.60	197.33	47.14	62.59
		AB	5.97	0.92	6.84	61.52	104.95	17.51	24.41
VI	撂荒草地	B	2.29	1.73	4.80	49.08	59.86	15.23	19.25
		A	8.30	3.82	33.75	151.13	179.72	49.06	61.18
		B	1.83	0.38	5.52	45.55	102.84	19.43	21.64
VII	撂荒灌丛地	A	5.05	3.50	15.81	109.70	151.06	39.53	48.08
		AB	1.82	0.87	8.00	49.11	102.99	15.74	18.44
		B	1.86	0.44	2.95	26.51	92.96	9.18	11.48
VIII	马尾松林地	A	4.53	3.13	5.43	46.95	102.81	15.19	22.85
		AB	1.81	2.66	4.91	21.33	92.50	14.39	18.86
		B	2.88	0.37	4.38	15.95	88.37	11.99	15.24

各样地土壤各形态无机磷含量基本上都介于耕地与次生马尾松灌丛地之间,其含量在耕地与退耕地之间差异明显,这种差异在 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 含量表现尤为明显(图 1)。与次生马尾松灌丛相比,耕地与退耕地表现出不同程度地无机磷积累过程。

磷素积累主要表现在表层土壤,导致 A 层土壤各形态无机磷含量差异明显,以马尾松灌丛地为参照,其中耕地 A 层土壤 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca₁₀-P 积累率分别为:988.0%、432.5%、1961.2%、498.3%、278.1%、473.5%。各形态无机磷在各退耕

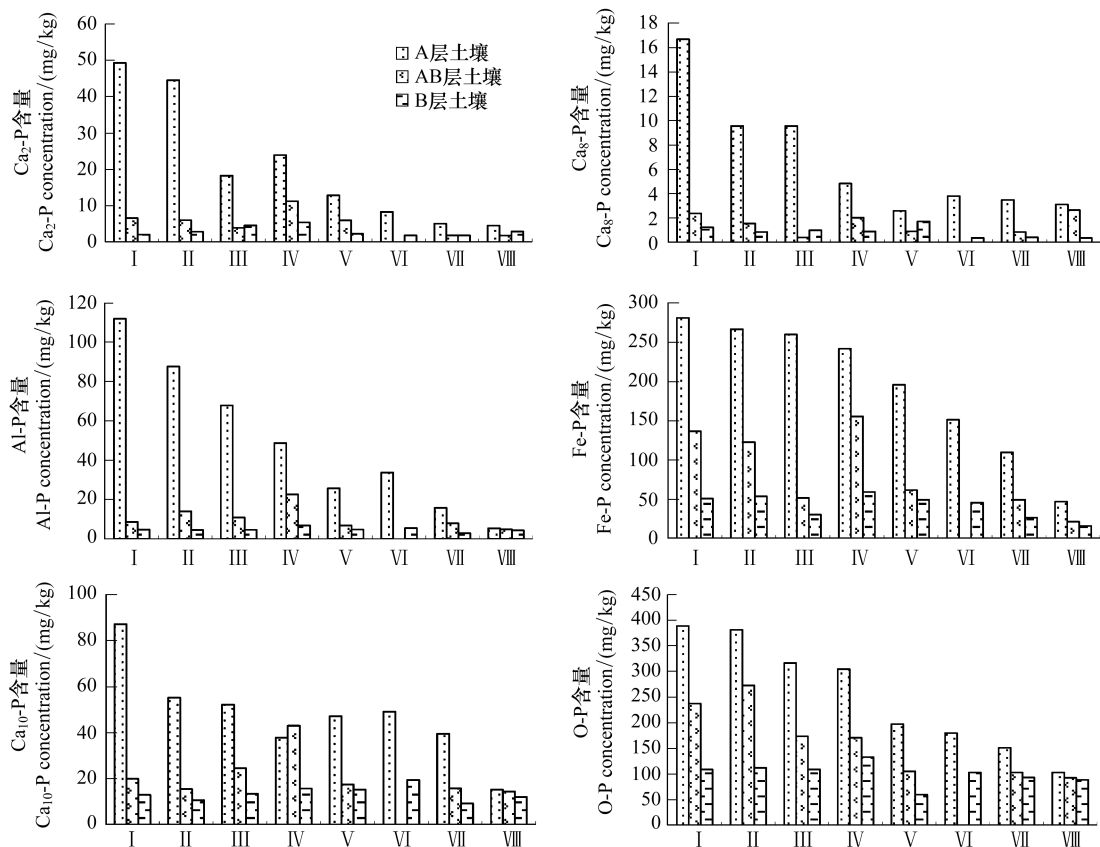


图 1 各剖面土壤无机磷形态含量分

Fig.1 The variance of phosphorus in different soil profiles

I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII 分别代表耕地,桃林地,花椒林地,樟树林地,柳杉林地,撂荒草地,撂荒灌丛地,马尾松林地

地之间也均表现出不同程度的积累,积累率小于耕地,可能是由于退耕后积累的磷素处于消耗阶段,其中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 下降较明显,撂荒灌丛地、人工樟树林地、撂荒草地、人工柳杉林地下降较快,自然撂荒灌丛 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 只有耕地的 10.3%、21.0%、14.1%,桃林地与花椒林地每年依然有一定数量的化学磷肥施入,下降较慢。各形态无机磷中, Fe-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 下降幅度比 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 小,可能是由于 Fe-P 属于缓效磷源, O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 在短期内属于无效磷源,利用率较低。

从剖面上看,各样地剖面 A 层土壤各形态无机磷含量差异较大,AB 层差异较小,B 层土壤差异最小,各形态无机磷含量随土壤层次的加深而降低;且耕地 A 层土壤与 B 层土壤差异较大,马尾松林地 A 层与 B 层差异最小,各退耕地的差异介于二者之间(图 1)。

从表 2 可以分析得出,各样地剖面土壤无机磷是磷素的主体,无机磷占全磷的比例 A 层土壤在 53.2%—72.3%之间,AB 层土壤在 51.2%—72.4%之间,B 层土壤在 53.0%—64.2%之间。从总体上讲,在不同形态无机磷之间,以 O-P 为主,其次为 Fe-P 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 Al-P 所占的比例差别不大, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 磷所占比例最小。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 、

$\text{Ca}_{10}\text{-P}$, 所占的平均比例分别为 2.28%、0.79%、4.80%、28.78%、54.90%、8.46%, Fe-P 、 O-P 共占 83.67%,是研究区土壤无机磷的主体。

2.1.3 各组分无机磷对速效磷贡献分析

为进一步明确各形态无机磷对速效磷的直接作用及各组分之间相互作用的大小及途径,对各无机磷组分与速效磷之间进行通径分析。

通径分析结果表明,各无机磷组分对速效磷的直接作用为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 与 Al-P 最大,直接作用系数分别为 0.225、0.796(表 3)。 Fe-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 O-P 直接贡献较小,作用系数分别为 0.096、0.011、0.031。 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 直接贡献最小,直接作用系数为 -0.167。由此表明,在研究区内 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 与 Al-P 的有效性大。 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 Fe-P 、 O-P ,虽与速效磷极显著正相关,但直接作用却较小,是因为它们与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Al-P 之间有较大的间接通径系数,这些无机磷组分通过 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Al-P 对速效磷间接起作用。相关研究表明, Al-P 是在 Ca-P 向 Fe-P 转化过程中的一种中间过渡性的磷化合物^[13]。矿物风化过程相关研究也表明,磷酸盐矿物风化规律亦是如此,即 $\text{Ca-P} \rightarrow \text{Ca-Al-P} \rightarrow \text{Fe-P}$ 依次转化^[14]。土壤的原生矿物磷灰石,经风化成过渡矿物 A 1-P 后再向次生的 Fe-P 和 O-P 方向转化,实质上还对磷酸盐的化学活性起着重要的活化和富集作用^[15]。

表 3 各无机磷形态与速效磷间通径分析

Table 3 The path analysis of the inorganic phosphorus and available phosphorus

通径系数 Path coefficient	$x_1 \rightarrow y$	$x_2 \rightarrow y$	$x_3 \rightarrow y$	$x_4 \rightarrow y$	$x_5 \rightarrow y$	$x_6 \rightarrow y$
$x_1 \rightarrow$	0.225	0.010	0.768	0.083	0.027	-0.142
$x_2 \rightarrow$	0.205	0.011	0.762	0.079	0.025	-0.147
$x_3 \rightarrow$	0.217	0.010	0.796	0.087	0.028	-0.152
$x_4 \rightarrow$	0.194	0.009	0.717	0.096	0.029	-0.148
$x_5 \rightarrow$	0.197	0.009	0.710	0.089	0.031	-0.132
$x_6 \rightarrow$	0.192	0.009	0.727	0.085	0.024	-0.167

x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 y 分别为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、速效磷,对角线上数字为直接通径系数

2.2 影响各无机磷形态比例的因素分析

2.2.1 有机碳及活性有机碳影响分析

岩溶区的土壤由于具备积累有机质的地质背景条件,而往往有相对较高的有机质含量^[16]。为进一步探讨土壤有机质对无机磷形态转化的影响,本文对研究区各剖面土壤不同活性的有机碳与不同形态无机磷占无机磷总量的比例之间进行相关分析,由表 3 可以看出土壤总有机碳、易氧化有机碳、溶解性

有机碳与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 之间呈显著或极显著正相关关系,与 O-P 之间呈极显著负相关,与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 之间相关关系不明显。由各形态无机磷对速效磷贡献分析可知,研究区内各剖面土壤, Al-P 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 对速效磷的贡献最大,属于有效磷, Fe-P 、对速效磷的贡献较小,属于缓效磷源,对土壤的潜在供磷能力意义重大; $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 贡献最小,其中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 对速效磷起负作用。因此,随着土壤有机碳含量

水平的提高, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 在无机磷中所占的比例将提高,相应地增加土壤中的有效和缓效磷源容量,并阻止有效磷源向在旱作条件下基本无效的 O-P 形态转化,从而改善土壤的供磷条件、提高土壤的供磷潜力。

2.2.2 不同形态钙素影响分析

土壤钙是重要的固磷基质,岩溶区富钙的地质背景,及石灰土形成过程的脱钙与复钙作用反复进行,使石灰土具有富钙特征。为进一步探讨岩溶区钙素对无机磷形态相互转化的影响,对研究区各剖面土壤不同形态钙素与不同形态无机磷占无机磷总量的比例之间进行相关分析,由表 4 可以看出,土壤全钙、交换性钙与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 呈显著负相关,与 Al-P 、 Fe-P 之间呈极显著负相关,与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 之间呈显著正相关,与 O-P 之间相关性不明显。随着土壤钙素含量

的增加,尤其是交换性钙含量的增加,土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 所占的比例将下降,而 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的比例将增加。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 、所占的比例下降,土壤的供磷能力下降; Fe-P 的比例下降将导致土壤的潜在供磷能力降低; $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的比例增加表明有部分有效或缓效磷源向无效态磷源转化,土壤的供磷能力进一步降低。

2.2.3 其他土壤理化性质影响分析

各形态无机磷占无机磷总量的比例与其它土壤理化性质的相关分析结果见表 4,可以看出,各形态无机磷比例与土壤 pH、容重、 <0.001 粘粒含量、含水量等相关性普遍不显著,除个别形态相关性达到显著以外,其他相关性均较弱。表明,在研究区自然条件下这些因素不是影响无机磷形态转化的主要因素。

表 4 各无机磷形态含量比例与土壤理化性质间相关分析

Table 4 The relation between the proportion of inorganic phosphorus and soil properties

无机磷含量/% Inorganic phosphorus	有机碳 Organic carbon	易氧化 有机碳 Liable organic carbon	溶解性 有机碳 Dissolved organic carbon	全钙 Total calcium	交换性钙 Exchanged calcium	水溶性钙 Dissolved calcium	pH	容重 Bulk density	<0.001 粘粒 Clay content	含水量 Water content
$\text{Ca}_2\text{-P}$	0.48 *	0.34	0.25	-0.54 **	-0.54 **	-0.17	-0.46 *	-0.04	0.01	-0.34
$\text{Ca}_8\text{-P}$	0.33	0.35	0.27	-0.39	-0.33	0.26	-0.31	-0.18	0.05	0.12
Al-P	0.70 **	0.65 **	0.63 **	-0.35	-0.43 *	-0.17	-0.29	-0.42 *	0.05	0.05
Fe-P	0.65 **	0.56 *	0.51 *	-0.21	-0.42 *	-0.48 *	-0.04	-0.02	-0.04	-0.09
O-P	-0.76 **	-0.71 **	-0.67 **	0.23	0.41	0.40	0.10	0.16	0.14	0.01
$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	0.07	0.27	0.31	0.48 *	0.43 *	0.04	0.33	-0.08	-0.54 **	0.35

* * 表示 $P<0.01$, * 表示 $P<0.05$, $n=23$

3 讨论

3.1 各形态无机磷含量、所占比例及有效性

土壤磷素含量主要取决于成土母质和含磷矿物肥料的施用,在农业土壤中往往磷肥施用是其主要作用。在农业生产中磷肥的施用对作物高产至关重要,在土壤资源极其宝贵的西南岩溶石漠化地区尤其如此。但长期大量施用磷肥导致土壤磷素大量积累,一方面造成资源大量浪费,另一方面,可能引起水体污染。本文显示,与次生马尾松林地相比,耕地的磷素积累显著,全磷和速效磷积累率分别达到 385.7%、2569.9%,其中速效磷绝对含量达到 53.01 mg/kg。根据相关研究结果,对于一般作物土壤速效磷含量在 20 mgP/kg 以上时对施磷无反应^[1]。而耕

地土壤磷素含量水平远远高于以上水平,这是对磷肥资源的一种浪费;而且对环境也可能是一种威胁,相关研究表明,南方高产田块特别是高产田块,凡是土壤有效磷 >20 mgP/kg (质地轻的水稻土)或 >40 mgP/kg (质地较重的水稻土)对水体环境已经构成威胁^[17]。

对红壤、砖红壤、黄棕壤、潮土等无机磷组分进行研究的结果表明,风化程度很高的砖红壤和红壤等酸性土壤以 O-P 为主,非闭蓄态磷中,以 Fe-P 为主,其次是 Al-P ,而 Ca-P 一般含量比较少;风化程度较低、具有石灰性反应的潮土等, Ca-P 占很大部分,一般约占无机磷总量的 60%—70%, Fe-P 和 Al-P 含量较少;风化程度居中的黄棕壤等无机磷组分介于上述二者之间^[18-21]。本研究对岩溶区土壤研究结果

表明,各样地剖面土壤中无机磷形态以 O-P 为主,其次为 Fe-P,二者共占 83.67%,钙结合态磷($\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 之和)占 11.53%,Al-P 含量最少只占 4.80%。研究区的成土母岩系三叠系嘉陵江组灰岩,但各形态无机磷中 O-P、Fe-P 是无机磷的主体而钙结合态磷含量较少,可能与研究区所处的水热等环境条件、及土壤的风化发育过程有关,有待深入研究。

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,Al-P 通常认为是有效性的,在水稻土淹水条件下,Fe-P 对水稻土是有效磷源^[22];在石灰性土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 及 Al-P、Fe-P 对作物都有不同程度的有效性^[23]。本研究通过通径分析表明, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、Al-P 对土壤速效磷的贡献率大,Fe-P 贡献次之。但 Fe-P 的相对含量和绝对含量均较高,作为一种缓效态磷源对土壤的潜在供磷能力意义重大,相关研究也表明,肥料磷的后效主要由转化的磷酸铁的量决定^[24]。因此,从积累磷素的后效角度讲,退耕地土壤为植被恢复提供了较好的磷素营养基础。

3.2 影响无机磷形态转化的因素

土壤有机物质对磷素的调节作用是土壤磷素有效性研究的一个重点。目前,认为有机物料提高土壤磷素有效性的机理主要有以下几种:增施有机物料可提高土壤有机磷量,通过矿化作用可释放出无机磷以及促进解磷微生物增殖等过程活化土壤中难溶态磷为可溶性磷^[25-26];土壤中添加各种有机质可以提供大量阴离子,这些阴离子一方面与铁、铝、钙等基质形成稳定的螯合体,从而释放其中的磷,另一方面,这些阴离子参与竞争土壤固相的专性吸附位点^[26-27],从而抑制对水溶态磷的吸附固定,提高磷肥有效性;有机物分解过程中产生的有机酸能溶解土壤中难溶态的磷酸盐,对磷起活化作用^[26]。本文通过对岩溶区自然土壤总有机碳、易氧化有机碳、溶解性有机碳与不同形态无机磷比例之间的相关关系研究表明,土壤有机碳与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、Al-P、Fe-P 等有效或缓效磷在总无机磷中的比重呈显著或极显著正相关,而与 O-P 的比例呈极显著的负相关关系,可能与有机碳的上述部分机理有关。易氧化有机碳与溶解性有机碳属于活性有机碳,具有一定的溶解性、移动快、不稳定、易氧化、易分解等特点,能直接参与土壤生物化学过程。但本研究结果表明,化学活动性强

的活性有机碳与钙结合态磷($\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$)之间的相关性不明显,这可能与研究区富钙的地球化学背景有一定的关系,研究区土壤中钙素主要以有效性较高的交换态形式存在。从配位体的稳定性来看,虽然钙、镁有机配合物的稳定性常数低于 Fe、Al 等,但当土壤中水溶态钙、交换性钙的含量较高时,钙表现出较强的与其他离子竞争有机配位体的能力^[27],从而影响到钙结合态磷。虽然有机碳对各形态无机磷地球化学行为的影响机理具有复杂性,但其在调节土壤磷素有效性方面的作用是毋庸置疑的。

岩溶区土壤具有富钙特征,高的钙素含量对无机磷素的化学活动性将产生重要影响。本研究显示,全钙、交换性钙、尤其是交换性钙含量与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、Al-P、Fe-P 等有效或缓效磷在总无机磷中所占的比例呈显著或极显著负相关,而与基本上属于无效态的 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 呈显著的正相关关系,表明富钙的地球化学背景,高的钙活性对无机磷的生物有效性有重要的制约作用。相关研究亦表明,土壤中加入碳酸钙后 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、Al-P、Fe-P 含量减少, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 明显增加,尤其是 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 显著增加^[28]。但本研究显示各形态钙与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的比例相关性不明显,而且研究区土壤 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量整体上都很低,原因有待研究。

4 结论

(1)研究区耕地与部分退耕地全磷、速效磷、各形态无机磷均处于较高的水平,与次生马尾松灌丛地相比耕地表现出强烈的磷素积累过程,退耕地则表现出积累磷素的消耗过程。在不同退耕地之间磷素水平也存在差异,各退耕地磷素含量水平介于耕地与次生马尾松林地之间,退耕地中桃林地、花椒林地磷素含量水平较高、人工樟树林地、人工柳杉林地、撂荒草地次之、撂荒灌丛地较低。

(2)无机磷是磷素的主体,在不同形态的无机磷中,O-P、Fe-P 占绝对优势,其次为 Ca-P、Al-P。在不同形态的无机磷中, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、Al-P 对速效磷的贡献率大,Fe-P 贡献次之, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、O-P、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 磷贡献率最小。

(3)土壤总有机碳、易氧化有机碳、溶解性有机碳与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、Al-P、Fe-P、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 之间呈显著或极显著正相关关系,与 O-P 之间呈极显著负相关,与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$

之间相关关系不明显。土壤有机碳对无机磷形态及调节土壤磷素有效性方面有重要影响。

(4) 土壤全钙、交换性钙与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 呈极显著负相关, 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 之间呈显著正相关, 与 Al-P 、 Fe-P 之间呈显著负相关。土壤钙素、尤其是活性程度较高的交换性钙对土壤中无机磷化学行为及磷素有效性有重要影响。

References:

- [1] Lu R K. Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999: 166-179.
- [2] Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer Problems in Sustainable Development of Agriculture in China. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1988: 522-522.
- [3] Jiang B F, Gu Y C. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22(3): 58-66.
- [4] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, 1957, 84(2): 133-144.
- [5] Xie L H, Lü J L, Zhang Y P, Liu L H. Influence of long-term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil II. Inorganic and organic phosphorus. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 790-794.
- [6] Lin D X, Fan X H, Hu F, Yang L Z, Hang X Z. Forms of phosphorus in hapli-udic isohumols soils after long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(4): 605-610.
- [7] Qan Y B, Chang Q R, Tian K, Liu M Y, Liu J, Chen T. Inorganic phosphorus fractions distribution in different vegetation restoration in Gully Region of Loess Plateau. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 56-62.
- [8] Zhang Q, Zhang S X, Liu K, Lü J L. Inorganic phosphorus fractionation and availability on different kinds of planting conditions of soil in Northern Shaanxi. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(4): 133-136.
- [9] Zhang J, Zhang R Z, Hai L. Effect of tillage methods on inorganic phosphorus forms in Loessal soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 387-391.
- [10] Yang K, Guan L Z, Zhu J J, Yan L. Effects of extraneous humic acids on inorganic phosphorus fractions in three different soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(6): 1172-1175.
- [11] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance. *Plant and Soil*, 1993, 155-156 (1): 399-402.
- [12] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Physical and Chemical Analysis of Soil. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [13] Jiang B P, Shen R, F. The study of fractionation scheme of inorganic phosphorus. *Progress in Soil Science*, 1990, 18(1): 1-8.
- [14] Jiang B P, Lu R K, Li Q K. An introduction on the map of potential of phosphate nutrition in the soils of China. *Acta Pedologica Sinica*, 1979, (1): 17-20.
- [15] Gu Y C, Jiang B P, Lu R K. Effect of weathering on the transformation and availability of phosphorus in different fractions of particle size of main soils of China. *Acta Pedologica Sinica*, 1984, (2): 134-143.
- [16] He Z P, Jing Z C, Lü W L, Chen G F, Meng Y C. Effect of karst dynamic system on fertility of typical calcareous soils. *Carsologica Sinica*, 2001, 20(3): 231-235.
- [17] Lu R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body. *Phosphate Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 4-6.
- [18] Xiang W S, Huang M, Li X Y. Progress on fractioning of soil phosphorus and availability of various phosphorus fractions to crops in soil. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2004, 10(6): 663-670.
- [19] Kumar V, Gilkes R J, Bollang M D A. Phosphate fertilizer placement and tillage system on phosphorous distribution in soil. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 1992, 23(13-14): 1462-1477.
- [20] Verma L P, Singh A P, Srivastva M K. Relationship between Olsen-P and inorganic P fraction in soil. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 1991, 39: 361-362.
- [21] Liu S T, Han X R, Chi R, Sui F G, Yao Y X. Effects of long-term located fertilization on status of phosphorus in non-calcareous fluoro-aquic soil. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(5): 43-46, 60-60.
- [22] Lu R K. The Principles and Fertilization of Soil-Plant Nutrition. Beijing: Chemical Industry Press, 1998: 160-162.
- [23] Shen R F, Jiang B P. Distribution and availability of various forms of inorganic-P in calcareous soils. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(1): 80-86.
- [24] Lu R K, Shi T J. Consumption and accumulation of soil phosphorus in the use process. *Chinese Journal of Soil Science*, 1980, (5): 6-8.
- [25] Oberson A, Besson J M, Maire N, Sticher H. Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping systems. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 21(3): 138-148.
- [26] Fox T R, Comeford N B, Mcfee W W. Phosphorus and aluminum release from a spodic horizon mediated by organic acids. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(6): 1763-1757.
- [27] Yang J G, Wang B G, Tang J. The Woodland Soil and Suitable Tree Species in the Southern of Guangxi. Beijing: Forestry

Publishing House of China, 1995: 24-83.

- [28] An Z Z, Jie X L, Li Y T, Bai Y L, Wei Y C, Liu S L. Effect of different water and material on inorganic phosphorus transformation in calcareous soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8 (1): 58-64.

参考文献:

- [1] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 166-179.
- [2] 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998: 522-522.
- [3] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究. *中国农业科学*, 1989, 22(3): 58-66.
- [5] 谢林花, 吕家珑, 张一平, 刘利花. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响 II. 无机磷和有机磷. *应用生态学报*, 2004, 15 (5): 790-794.
- [6] 林德喜, 范晓晖, 胡锋, 杨林章, 韩晓增. 长期施肥后筒育湿润均腐土中磷素形态特征的研究. *土壤学报*, 2006, 43(4): 605-610.
- [7] 齐雁冰, 常庆瑞, 田康, 刘梦云, 刘京, 陈涛. 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. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1): 56-62.
- [8] 张倩, 张素霞, 刘克, 吕家珑. 陕北不同土地利用类型下土壤无机磷形态分布及有效性研究. *干旱地区农业研究*, 2011, 29 (4): 133-136.
- [9] 江晶, 张仁陟, 海龙. 耕作方式对黄绵土无机磷形态的影响. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 387-391.
- [10] 杨凯, 关连珠, 朱教君, 颜丽. 外源腐殖酸对三种土壤无机磷组分的影响. *土壤学报*, 2009, 46(6): 1172-1175.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科技出版社, 1978.
- [13] 蒋柏藩, 沈仁芳. 土壤无机磷分级的研究. *土壤学进展*, 1990, 18(1): 1-8.
- [14] 蒋柏藩, 鲁如坤, 李庆逵. 《中国土壤磷素养分潜力概图》及其说明. *土壤学报*, 1979, (1): 17-20.
- [15] 顾益初, 蒋柏藩, 鲁如坤. 风化对土壤粒级中磷素形态转化及其有效性的影响. *土壤学报*, 1984, (2): 134-143.
- [16] 何子平, 蒋忠诚, 吕维莉, 陈桂芬, 蒙炎成. 岩溶动力系统对典型石灰岩土肥力特征的影响. *中国岩溶*, 2001, 20(3): 231-235.
- [17] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4-6.
- [18] 向万胜, 黄敏, 李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 663-670.
- [21] 刘树堂, 韩晓日, 迟睿, 隋方功, 姚源喜. 长期定位施肥对无石灰性潮土磷素状况的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 43-46, 60-60.
- [22] 鲁如坤. 土壤植物营养学原理和施肥. 北京: 化学工业出版社, 1998: 160-162.
- [23] 沈仁芳, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性. *土壤学报*, 1992, 29(1): 80-86.
- [24] 鲁如坤, 史陶钧. 土壤磷素在利用过程中的消耗和积累. *土壤通报*, 1980, (5): 6-8.
- [27] 杨继鎬, 汪柄根, 唐俊. 广西南部林地土壤与适生树种. 北京: 中国林业出版社, 1995: 24-83.
- [28] 安志装, 介晓磊, 李有田, 白由路, 魏义长, 刘世亮. 不同水分和添加物料对石灰性土壤无机磷形态转化的影响. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1): 58-64.