

模拟酸雨胁迫对赤红壤磷素形态特征的影响

徐华勤^{1,2}, 章家恩^{1*}, 孟磊¹, 余家瑜¹, 李宏哲¹

(1.华南农业大学 农业部生态农业重点开放实验室, 广州 510642; 2.湖南农业大学农学院, 长沙 410128)

摘要:通过田间小区模拟酸雨实验,研究酸雨胁迫下赤红壤不同磷素形态变化的方向和程度。结果表明,原位模拟酸雨影响下,一定强度($\text{pH} \geq 4.0$)的酸雨胁迫能有效促进有效磷的释放,而当 $\text{pH} < 4.0$ 强度酸雨胁迫时有效磷的释放随 pH 值降低逐渐受到抑制。随酸雨酸度的增强,土壤酸性磷酸酶和微生物量磷均呈现先升高后降低的变化趋势,可见一定强度酸雨胁迫能促进溶磷微生物和磷酸酶活性,而当高强度酸雨胁迫时土壤微生物活动逐渐受到抑制。无机磷组分中 Al-P 、 Ca-P 和 Fe-P 含量均随酸雨酸度的增强而降低,土壤 O-P 含量没有显著变化。相关分析发现,有效磷含量与微生物量磷、酸性磷酸酶呈极显著正相关,表明此时土壤有效磷变化与有机磷矿化关系最为密切。有效磷含量与各种形态无机磷(Al-P 、 O-P 、 Ca-P 和 Fe-P)含量之间也有较强的正相关性,表明土壤生态系统磷素转化是一个自我调节的动态平衡过程,且在一定条件下可以相互转化。

关键词:酸雨;赤红壤;磷素形态

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)11-2319-06

Effect of Simulated Acid Rain in Situ on Characteristics and Fractionation of Phosphorus in Lateritic Red Soils

XU Hua-qin^{1,2}, ZHANG Jia-en^{1*}, MENG Lei¹, YU Jia-yu¹, LI Hong-zhe¹

(1.Key Laboratory of Ecological Agriculture of Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.Institute of Agricultural Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: We investigated the direction and degree of the change of the simulated acid rains in situ on characteristics and fractionation of phosphorus by field experiments, results showed that soil acidification could help to increase the content of soil available P, microbial biomass P and phosphates activity to some extent, but the high-strength acid rain gradually retrained the population and activities of soil microbes. Correlation analysis suggested both the acid phosphates and SMB-P showed large additive effect on the available phosphorus, the relations between the contents of inorganic phosphorus fraction and available P, also showed that there were strong positive correlations between Al-P , O-P , Ca-P , Fe-P and available P. Relations among the other inorganic phosphorus fraction were also close, and all the results indicated that the transformation of phosphorus in soil ecosystem is dynamic balance and self-adjusting, and would be interconvertible under given conditions.

Keywords: acid rain; lateritic red soils; phosphorus forms

酸雨与全球气候变暖、臭氧层破坏并列为当今世界的三大生态环境灾难。目前酸雨污染每年给我国造成的经济损失超过 1 100 亿元^[1]。华南地区是我国几

大重要的酸雨中心之一,特别是改革开放以来,随着社会经济的持续高速发展和城市化的迅速推进,对能源的需求越来越大,加上以燃煤为主的能源结构和治理措施的不当,导致酸雨的危害日益严重,广东省已成为我国酸雨最严重的省份之一^[2]。土壤是陆地生态系统中酸雨的最终接受处,作为我国大面积地带性酸性土壤——赤红壤的广泛分布地区,华南地区成为“酸雨分布与酸性土壤分布区重叠”的生态敏感区域。在当今酸雨环境下,赤红壤变得“酸上加酸”,势必对该

收稿日期:2011-05-28

基金项目:国家自然科学基金(40871118);中国博士后特别资助(2010-03355);广东省自然科学基金(9451064201003801, 8151064201000048)

作者简介:徐华勤(1972—),女,博士后,副教授,主要研究方向为土壤生态学。E-mail: xu7541@scau.edu.cn

* 通讯作者:章家恩 E-mail: jeanzh@scau.edu.cn

地区原有酸性土壤中养分转化状况产生较大影响。

磷是植物生长的主要限制营养因子之一^[3-4]。磷在土壤中的有效性低^[5],赤红壤自身严重缺磷,且其固磷能力强,磷素在土壤中很难移动^[6],华南地区农业生产中大量使用磷肥与磷素的环境问题突出,关于土壤磷素有效性的研究显得更为紧迫和必要。磷在土壤中的有效性主要取决于 3 个转化环节^[7]:无机磷酸根离子的溶解与沉淀、吸附与解吸,有机磷在微生物作用下的矿化与合成,微生物体内磷(微生物生物量磷)的吸收与释放等。土壤有效磷总量主要由活化的无机磷、有机磷、微生物量磷三者综合构成。酸雨造成土壤酸化、土壤肥力退化以及土壤生物多样性下降,势必影响红壤磷素的转化^[8-9]。

目前酸雨的研究主要集中在室内土柱模拟酸雨对土壤有效态磷总量的影响,难以准确反映酸雨影响下原位土壤生态系统磷素转化过程中不同形态磷素的变化。本文通过田间小区模拟酸雨实验,研究酸雨胁迫下土壤无机磷、有机磷、微生物量磷转化的方向和程度,为更全面地研究酸雨对土壤磷素转化的影响机制提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 实验样地与模拟处理

实验样地为华南农业大学增城科研教学基地一块固定、平整、肥力均匀的赤红壤裸露旱地,该地区 1994—2005 年酸雨年均 pH 值为 5.47 (增城方志),样地设置 4 个人工模拟酸雨处理 (pH 分别为 5.0、4.0、3.0、2.0) 和 1 个空白对照处理 (用去离子水, pH 为 6.5), 每个处理 3 次重复,共 15 个小区,每个小区面积 $2\text{ m} \times 3\text{ m} = 6\text{ m}^2$,小区随机排列。为防止各小区不同浓度酸雨的相互影响,在各小区之间安插厚 3 cm 的木板,木板插入地下部分深 20 cm,地上部分高 30 cm。土壤基本理化性状如表 1。

1.2 模拟酸雨的配制

人工模拟酸雨的配制按照广州市近 10 a 酸雨的 S/N 成分比^[10],用分析纯硫酸和硝酸按摩尔比 3:1 配成母液,将母液加自来水调配成 pH 值分别为 2.0、

3.0、4.0、5.0 的模拟酸雨溶液。

1.3 实验方法

实验期为 2008 年 12 月 1 日至 2009 年 1 月 31 日,共 60 d。此段时间为华南地区冬季干旱时期,无自然降雨,可以忽略自然降雨对模拟酸雨的影响。喷淋量参照广州市年平均降雨量,从 2008 年 12 月 1 日开始,每隔 6 d 喷淋不同 pH 值的模拟酸雨溶液 1 次,每个小区每次喷淋 10 L,至 2009 年 1 月 31 日停止喷淋,共喷淋 9 次。喷淋结束后 3 d 左右,待土壤略干后用环刀取 0~20 cm 土壤样品。5 个点混合为一个样品,每个处理 3 次重复。

土样采集后除去动植物残体和碎石,用聚乙烯封口袋密封并低温储运,送至实验室立即放入 4 ℃ 冰箱中保存。用于测定土壤微生物量 P 的样品,调节土壤含水量至相当于 40% 的土壤饱和持水量后过孔径 2 mm 筛,测定前在 25 ℃、100% 空气湿度条件下预培养 7 d。用于测定基本理化性质的样品风干过筛后室温下保存。

酸性磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法,以 24 h 后 1 g 土壤中释放酚的毫克数表示^[11]。微生物量磷测定采用氯仿熏蒸提取法,用 $0.5\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ 溶液 (土水比 1:20) 浸提,用钼锑抗比色法测定提取液中的磷^[12]。无机磷分级采用传统的 Chang-Jackson 提取法,将无机磷分为 Al-P、Fe-P、Ca-P 和 O-P 4 级^[13]。土壤理化性质采用常规分析方法^[13]。

1.4 数据处理与分析

数据经 Excel 2003 整理后,采用 SPSS 15.0 进行统计分析,处理间的差异显著性采用单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 检验,并用 Duncan 法进行两两之间的多重比较;变量间的简单相关采用 Pearson 相关统计方法。

2 结果与分析

2.1 土壤全磷和有效磷的变化

如图 1 所示,不同 pH 值酸雨淋溶后土壤全磷的变化在 $0.37 \sim 0.42\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,在 pH6.5 (对照) 时为最大 ($0.42\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),随 pH 值降低,土壤全磷整体呈下降

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table1 The physical and chemical properties of the tested soil

项目 Items	pH	全氮 Total N/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 Total P/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾 Total K/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮 Hydrolysable N/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷 Available P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾 Available K/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质 Organic matter/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
供试土壤 Tested soil	4.45	1.34	0.44	6.45	82.71	34.18	22.56	23.15

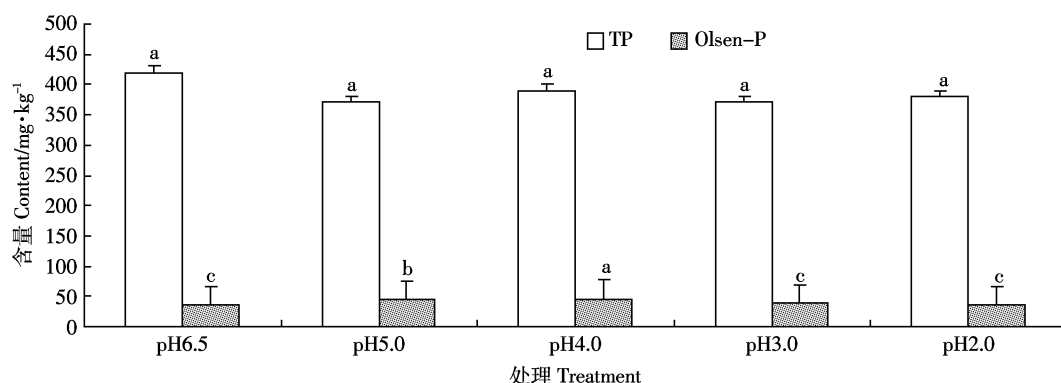


图1 田间小区模拟酸雨对赤红壤全磷和有效磷的影响

Figure 1 Effect of simulated acid rain on soil TP and Olsen-P in field experiment

趋势,但变化幅度不大,处理间未达到显著性差异($P>0.05$)。土壤有效磷变化在 $35.18\sim46.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间(图1),随酸雨 pH 值降低先上升而后下降,在 pH4.0 处理时为最大值($46.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),而在 pH2.0 处理时为最小($35.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),且处理间具有显著差异($P<0.05$)。表明在一定强度($\text{pH}\geq 4.0$)酸雨胁迫时能有效促进有效磷的释放,而当 $\text{pH}<4.0$ 强度酸雨胁迫时有效磷的释放随 pH 值降低逐渐受到抑制。

洛桑实验站(Broadbalk)长期定位试验结果表明,土壤有效磷淋失的临界值为 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [14]。鲁如坤[6]也认为,土壤有效磷在 $50\sim70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 可能是面源磷通过渗漏使水源污染的一个大致临界指标。刘广深等[8]认为酸雨对土壤磷的淋失量有较大影响。但也有研究认为酸雨对淋滤液氮磷浓度及氮磷累计淋失量的动态变化等均无显著影响,不同酸度模拟酸雨造成的各形态磷淋失量均无显著差异[9]。本研究中实验样地在两个月的模拟酸雨淋溶后,有效磷最大值为 $46.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,参照前标准似乎并未出现较严重的潜在流失风险,研究结论的差异可能与不同的土壤有效磷本底值有关。红壤磷的释放强度主要取决于土壤有效磷含量[15-16],土壤自身磷素水平在很大程度上决定了土壤磷进入径流的风险和数量[17],产生这一风险的土壤有效磷含量临界值研究也已引起关注[18]。但有关酸雨引起土壤磷素淋失的临界值还有待进一步研究。

2.2 土壤无机磷组分的变化

无机磷是作物直接有效的磷素来源,其形态结构直接影响磷的生物有效性[19]。土壤无机磷主要以 Al-P、Fe-P、Ca-P 和 O-P 形态为主。Al-P 和 Fe-P 是高度风化的酸性土壤中磷酸盐的主要组分;O-P 则是被氧化铁胶膜包被的磷酸盐,在除去外层铁质包膜前,

其效用很难发挥,被视为闭蓄态磷[20]。本研究中不同处理下供试赤红壤总无机磷含量为 $66.60\sim92.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,占全磷的比例为 $17.53\%\sim24.91\%$,平均为 21.12% ,明显低于总无机磷占全磷 $60\%\sim80\%$ 的普遍水平[21],可见供试土壤中无机磷含量偏低。

供试土壤 Fe-P 含量在无机磷总量中所占比例最高(图2),平均为 43.88% 。这是由于赤红壤长期受风化、淋溶的影响,致使土壤中 Fe-P 含量较高[22-23]。不同 pH 值酸雨淋溶后土壤 Fe-P 含量在 $27.40\sim41.52\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,随着酸雨酸度的增强土壤 Fe-P 含量逐渐降低,在 pH2.0 处理时明显最小($27.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),各处理间差异显著($P<0.05$)。

在岩溶区土壤 O-P 是无机磷的主要成分之一[20],而本研究赤红壤中 O-P 含量平均为 31.13% ,在无机磷总量中所占比例仅次于 Fe-P 含量(图2)。不同 pH 值酸雨淋溶后土壤 O-P 含量在 $23.85\sim26.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,各处理间没有显著差异($P>0.05$)。

土壤 Al-P 含量在无机磷总量中所占比例平均为 12.21% ,不同处理在 $7.88\sim12.04\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,在 pH5.0 处理时为最大($12.04\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),pH2.0 处理时为最小($7.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。土壤 Ca-P 含量在 $7.47\sim12.09\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,在 pH5.0 处理时为最大($12.09\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),pH2.0 处理时为最小($7.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),在无机磷总量中所占比例平均为 12.24% ,与 Al-P 含量接近。不同 pH 值酸雨淋溶对土壤 Al-P 含量和 Ca-P 含量均造成了显著影响,与 CK 相比,pH5.0 的酸雨淋溶后土壤 Al-P 含量和 Ca-P 含量较对照均略有增加,但经 pH 为 4.0、3.0、2.0 的酸雨淋溶后逐渐减少。

王树起等[24]研究表明,低分子量有机酸能促进土壤难溶态磷向可溶态磷转化。本研究同样发现,pH5.0 以下的酸雨淋溶后,土壤 Al-P 含量和 Ca-P 含量逐

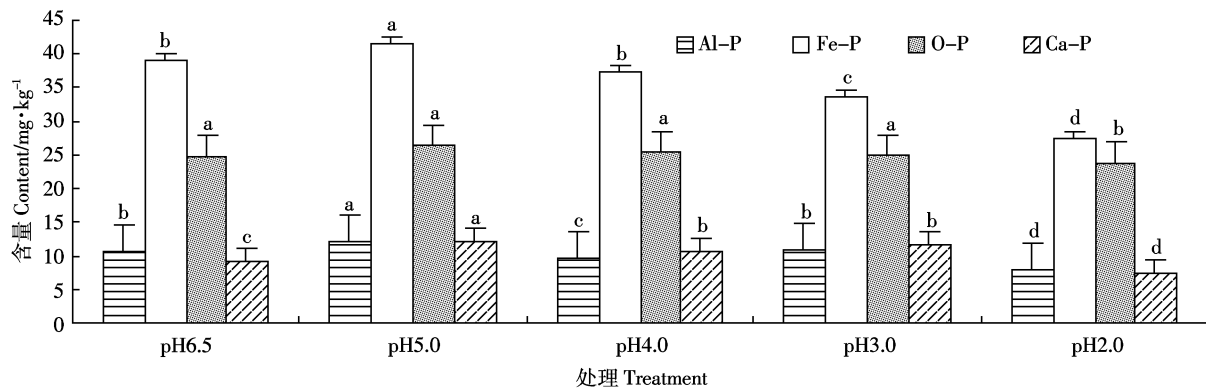


图2 田间小区模拟酸雨对赤红壤无机磷组分的影响

Figure 2 Effect of simulated acid rain on soil Al-P, Fe-P, Ca-P and O-P in field experiment

渐降低。

2.3 土壤微生物量磷和酸性磷酸酶的变化

土壤微生物量磷是土壤有机磷中最为活跃的部分,是土壤有效态磷的重要来源。它调节土壤磷的矿化和固持过程,在很大程度上能反映土壤活性磷库的容量和周转强度^[25-26]。土壤酸性磷酸酶可催化磷酸脂类或磷酸酐的水解,其活性的高低直接影响土壤有机磷的分解转化及其生物有效性^[27-28],磷酸酶的变化反应了土壤有机磷的矿化程度。因此,本研究采用酸性磷酸酶来表征酸雨胁迫对有机磷矿化的影响。

供试土壤微生物量磷变化在 18.24~36.04 mg·kg⁻¹之间(图 3)。土壤酸性磷酸酶变化在 305.97~508.00 mg·kg⁻¹·h⁻¹之间(图 4)。可见不同酸度的酸雨对土壤酸性磷酸酶和微生物量磷均造成了显著影响,随酸雨酸度的增强,土壤酸性磷酸酶和微生物量磷均呈现先升高后降低的类似的变化趋势,在一定强度(pH≥4.0)酸雨胁迫时能促进微生物量磷和磷酸酶活性,而

当 pH<4.0 强度酸雨胁迫时土壤微生物活动随 pH 值降低逐渐受到抑制。

2.4 不同形态磷素指标的相关性分析

相关性分析表明(表 2),原位模拟酸雨影响下有效磷含量与微生物量磷、酸性磷酸酶呈极显著正相关($r_1=0.873, r_2=0.995, P<0.01$),表明此时土壤有效磷变化与有机磷矿化关系最为密切。磷酸酶和土壤微生物影响着有机磷的转化,微生物量磷也是有效磷的重要组成部分之一,探讨磷酸酶活性以及土壤微生物量磷与土壤有效磷的关系,对磷素的生物管理具有重要意义。Olander 等^[29]发现在磷含量高的样地中,磷酸酶和微生物量磷的活性最高。也有研究^[30]发现,土壤磷酸酶活性随土壤磷素含量的降低而增加。但由于土壤酶和微生物量磷来源的广泛性以及研究方法的复杂性,目前生态系统中养分有效性与土壤酶活性的相关关系还很难准确建立^[31]。

章爱群等^[17]发现有机酸活化的无机磷主要来源

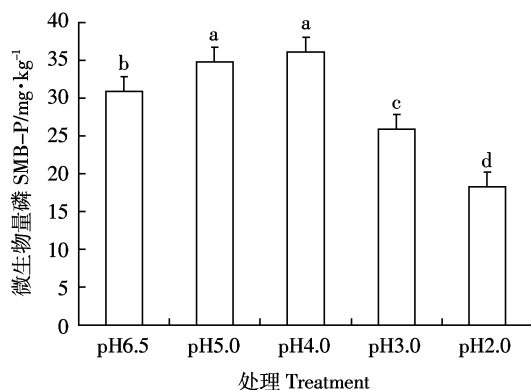


图3 田间小区模拟酸雨对赤红壤微生物量磷的影响

Figure 3 Effect of simulated acid rain on SMB-P in field experiment

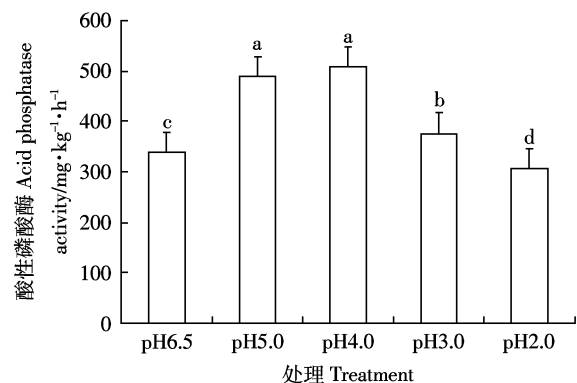


图4 田间小区模拟酸雨对赤红壤酸性磷酸酶的影响

Figure 4 Effect of simulated acid rain on acid phosphatase(ACP) activity in field experiment

表 2 磷素形态指标的相关性

Table 2 Correlated coefficients between soil Phosphorus indices

项目	全磷 TP	有效磷 Olsen-P	铝磷 Al-P	铁磷 Fe-P	闭蓄态磷 O-P	钙磷 Ca-P	微生物量磷 SMB-P	酸性磷酸酶 ACP
全磷 TP	1.000							
有效磷 Olsen-P	-0.208	1.000						
铝磷 Al-P	-0.135	0.463	1.000					
铁磷 Fe-P	0.249	0.676	0.836**	1.000				
闭蓄态磷 O-P	-0.231	0.857**	0.826**	0.872**	1.000			
钙磷 Ca-P	-0.441	0.651	0.874**	0.666	0.830**	1.000		
微生物量磷 SMB-P	0.185	0.873**	0.663	0.920**	0.867**	0.661	1.000	
酸性磷酸酶 ACP	-0.278	0.995**	0.503	0.664	0.869**	0.713	0.857**	1.000

于土壤中 Al-P 和 Fe-P 中的磷, 有机酸也能够促进土壤中闭蓄态磷(O-P)的形成与积累。而本研究中有有效磷含量与 Al-P、O-P、Ca-P、Fe-P 含量均有较强的正相关性, 表明酸雨影响下土壤生态系统磷素转化处在一个自我调节的动态平衡过程, 且在一定条件下可以互相转化, 与杨慧等^[18]的研究结论一致。

3 结论

(1)一定强度(pH≥4.0)的酸雨胁迫能有效促进有效磷的释放, 而当 pH<4.0 酸雨胁迫时有效磷的释放随 pH 值降低逐渐受到抑制。

(2)随酸雨酸度的增强, 土壤酸性磷酸酶和微生物量磷均呈现先升高后降低的变化趋势, 可见一定强度的酸雨胁迫能促进溶磷微生物和磷酸酶活性, 而当高强度酸雨胁迫时土壤微生物活动逐渐受到抑制。

(3)相关性分析表明, 有效磷含量与微生物量磷、酸性磷酸酶呈极显著正相关 ($r_1=0.873, r_2=0.995, P<0.01$), 有效磷含量与各种形态无机磷(Fe-P、Al-P 与 O-P、Ca-P)含量也有较强的正相关性, 表明酸雨影响下土壤生态系统磷素转化仍处在一个自我调节的动态平衡过程, 而土壤有效磷变化与有机磷矿化关系最为密切。

参考文献:

[1] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5):527-532.
ZHANG X M, CHAI F H, WANG S L, et al. Research progress of acid precipitation in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(5):527-532.

[2] 秦 鹏, 杜尧东, 刘锦奎, 等. 广东省酸雨分布特征及其影响因素[J]. 热带气象学报, 2006, 22(3):297-300.
QIN P, DU Y D, LIU J L, et al. Distributional characteristics of acid rain and its affecting factors in Guangdong Province[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2006, 22(3):297-300.

[3] Lajtha K, Schlesinger W H. The biogeochemistry of phosphorus cycling and phosphorus availability along a desert chronosequence[J]. *Ecology*, 1988, 69:24-39.

[4] Kellogg L E, Bridgham S D. Phosphorus retention and movement across an mbrotrophic-minerotrophic peatland gradient[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 63:299-315.

[5] 汪 涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(6):945-952.
WANG T, YANG Y H, MA W H. Storage, patterns and environmental controls of soil phosphorus in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium U-niversitatis Pekinensis*, 2008, 44(6):945-952.

[6] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1):4-8.
LU R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(1):4-8.

[7] 鲁如坤, 时正元, 钱承梁. 磷在土壤中有效性的衰减[J]. 土壤学报, 2000, 37(3):323-328.
LU R K, SHI Z Y, QIAN C L. Decline of phosphorus availability with time in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3):323-328.

[8] 刘广深, 许中坚, 徐文彬, 等. 模拟酸雨对土壤有效磷衰减的影响[J]. 矿物学报, 2002, 22(1):35-38.
LIU G S, XU Z J, XU W B, et al. Decline of available phosphorus in soil affected by acid rain[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2002, 22(1):35-38.

[9] 曾曙才, 吴启堂, 侯焕英, 等. 模拟酸雨对施肥条件下赤红壤氮磷淋失特征的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6):16-20, 69.
ZENG S C, WU Q T, HOU H Y, et al. Effects of simulated acid rain on nitrogen and phosphorus leaching characteristics in Latosolic red soils with application of organic compound fertilizer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6):16-20, 69.

[10] 吴 艳. 广州地区 1996—2005 年酸雨情况分析 [J]. 广东科技, 2006, 15:34-35.
WU Y. The analysis about the acid rain in Guangzhou from 1996 to 2005[J]. *Science and Technology of Guangdong*, 2006, 15:34-35.

[11] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
Nationwide Soil Census Office. China soil[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998.

[12] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14:319-329.

- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agrochemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [14] Hesketh N, Brokes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 105–110.
- [15] 雷波, 王定勇, 包维楷. 模拟酸雨对土壤磷元素淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 516–519.
LEI B, WANG D Y, BAO W K. Effects of simulated acid rain on leaching loss of phosphorus in soil[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(3): 516–519.
- [16] Atalay A, Bronick C, Pao S, et al. Nutrient and microbial dynamics in biosolids amended soils following rainfall simulation[J]. *Soil & Sediment Contamination*, 2007, 16(2): 209–219.
- [17] 段小华, 邓泽元, 胡小飞, 等. 模拟酸雨和外源铝对茶树铝及一些营养元素吸收积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1936–1942.
DUAN X H, DENG Z Y, HU X F, et al. Effects of simulated acid rain and exogenous Al on assimilation and accumulation of Al and some nutrition elements of tea plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 1936–1942.
- [18] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(2): 904–910.
- [19] 章爱群, 贺立源, 赵会娥, 等. 有机酸对土壤无机态磷转化和有效磷的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4061–4069.
ZHANG A Q, HE L Y, ZHAO H E, et al. Effect of organic acids on inorganic phosphorus transformation in soil with different phosphorus sources[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 15(4): 474–478.
- [20] 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.
YANG H, CAO J H, SUN L, et al. Fractions and distribution of inorganic phosphorus in different land use types of karst area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 135–140.
- [21] 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 H X, YU W T. 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.
- [22] 黄运湘, 张杨珠, 邹应斌, 等. 湖南省双季稻田土壤无机磷形态的分级研究[J]. 湖南农业大学学报, 1998, 24(2): 90–94.
HUANG Y X, ZHANG Y Z, ZOU Y B, et al. A study on the fractionation of inorganic phosphate in some paddy soils of Hunan Province[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 1998, 24(2): 90–94.
- [23] 杨凯, 关连珠, 朱教君, 等. 外源腐植酸对三种土壤无机磷组分的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1172–1175.
YANG K, GUAN L Z, ZHU J J, et al. Effects of extraneous Humic acids on inorganic phosphorus fractions in three different soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(6): 1172–1175.
- [24] 王树起, 韩晓增, 严君, 等. 低分子量有机酸对大豆磷积累和土壤无机磷形态转化的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1550–1554.
WANG S Q, HAN X Z, YAN J, et al. Effects of low molecular weight organic acids on P accumulation in soybean (*Glycine max* L.) and inorganic P form transformation in soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8): 1550–1554.
- [25] Gyaneshwar P, Naresh K G, Parekh L J, et al. Role of soil microbial in improving P nutrition of plants[J]. *Plant Soil*, 2002, 245: 83–93.
- [26] 黄敏, 吴金水, 黄巧云, 等. 土壤磷素微生物作用的研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 366–370.
HUANG M, WU J S, HUANG Q Y, et al. Progress on microbiological action of soil phosphorus[J]. *Ecol Environ*, 2003, 12(3): 366–370.
- [27] 徐冬梅, 刘广深, 许中坚, 等. 模拟酸雨对土壤酸性磷酸酶活性的影响及机理[J]. 中国环境科学, 2003, 23(2): 176–179.
XU D M, LIU G S, XU Z J, et al. Effects and mechanism of simulated acid rain on the activities of soil acid phosphatase[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(2): 176–179.
- [28] 耿玉清, 白翠霞, 赵广亮, 等. 土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 139–143.
GENG Y Q, BAI C X, ZHAO G L, et al. Soil phosphatase activity and its correlation with composition of organic phosphorus [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(2): 139–143.
- [29] Olander L P, Vitousek P M. Regulation of soil phosphatase and chitinase activity by N and P availability[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 49(2): 175–191.
- [30] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(5): 937–944.
- [31] Allison V J, Condron L M, Peltzer D A, et al. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand[J]. *Soil Biological and Biochemistry*, 2007, 39(7): 1770–1781.