

# 磷石膏与石灰石粉配施对新垦红壤耕地的改良效果

严建立<sup>1</sup>, 章明奎<sup>2</sup>, 王道泽<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>杭州市农业科学研究院, 杭州 310024; <sup>2</sup>浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058;

<sup>3</sup>杭州市植保土肥总站, 杭州 310020)

**摘要:**新垦红壤耕地兼具有强酸与养分贫瘠等多种缺陷, 需要采取多种措施加以改良。为了解磷石膏与石灰石粉配施对新垦红壤耕地降酸与增加矿质养分的作用, 以新垦黄筋泥为研究对象, 设计磷石膏、石灰石粉不同用量及其组合的盆栽试验, 研究不同改良剂处理对土壤酸度、有效养分及作物生长的影响。结果表明, 磷石膏和石灰石粉对土壤具有明显的降酸与增加有效钙的作用, 其效果随用量增加而增加; 等质量施用条件下, 单施石灰石粉、磷石膏与石灰石粉配施对土壤的降酸效果高于单施磷石膏。在改善土壤矿物养分、物理性状和蔬菜生长方面, 磷石膏与石灰石粉配施和单施磷石膏的效果高于单施石灰石粉。在试验条件下, 施用磷石膏没有明显增加土壤中重金属的积累, 且因土壤 pH 的提高蔬菜中 Cd、Cr、Pb 含量有所下降, 但 As 含量呈轻微增加, 对蔬菜中其他重金属积累的影响不明显。研究认为, 对于酸化明显和养分低下的新垦红壤可采用磷石膏与石灰石粉配施替代单独施用石灰石粉加以改良, 但应适当控制磷石膏施用量。

**关键词:**新垦红壤; 磷石膏; 石灰石粉; 酸度; 养分; 土壤改良

中图分类号: S156

文献标志码: A

论文编号: cjas20200300063

## Improvement Effect of Combined Application of Phosphogypsum and Limestone Powder on Newly Cultivated Red Soil

YAN Jianli<sup>1</sup>, ZHANG Mingkui<sup>2</sup>, WANG Daoze<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>Hangzhou Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310024, Zhejiang, China;

<sup>2</sup>College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

<sup>3</sup>Hangzhou Plant Protection and Soil-fertilizer Station, Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

**Abstract:** Newly cultivated red soil has many defects, such as strong acid and poor nutrient content, and needs to be improved by many measures. To understand the effect of phosphogypsum and limestone powder on reducing acidity and increasing mineral nutrients in the newly cultivated red soil, a pot experiment was designed to study the effect of applying different amounts and combinations of phosphogypsum and limestone powder on soil acidity, available nutrients and crop growth. The results showed that both phosphogypsum and limestone powder could significantly reduce soil acidity and increase soil available calcium, and the effect increased with the increasing dosage of amendments. Under the condition of equal mass application of the amendments, the effect of the single application of limestone powder or the combined application of phosphogypsum and limestone powder on the reduction of soil acidity was higher than that of the single application of phosphogypsum. The effects of the combined application of phosphogypsum and limestone

**基金项目:**浙江省重点研发计划项目“丘陵山地垦造耕地地力快速协调提升关键技术研究与应用”(2019C02035); 国家科技支撑计划课题“东南城郊环保型集约化生态高值农业模式研究与示范”(2014BAD14B04)。

**第一作者简介:**严建立, 男, 1967 年出生, 浙江余姚人, 高级农艺师, 主要从事新造耕地培肥和综合开发利用等方面的研究。通信地址: 310024 杭州市西湖区转塘街道朱泗路 261 号 杭州市农业科学研究院, E-mail: yj17784@163.com。

**通讯作者:**章明奎, 男, 1964 年出生, 浙江绍兴人, 教授, 博士, 主要从事土壤质量管理方面的研究。通信地址: 310058 杭州市西湖区余杭塘路 866 号 浙江大学紫金港校区环境与资源学院, E-mail: mkzhang@zju.edu.cn。

**收稿日期:**2020-03-12, **修回日期:**2021-01-20。

powder or single application of phosphogypsum on the improvement of soil mineral nutrients, physical properties and vegetable growth were higher than those of single application of limestone powder. Under the experimental condition, the application of phosphogypsum did not significantly increase the accumulation of heavy metals in the soil, and the content of Cd, Cr and Pb in vegetables decreased due to the increase of soil pH, but the content of As increased slightly, which had no obvious effect on the accumulation of other heavy metals in vegetables. The results showed that the newly cultivated red soil with obvious acidification and low nutrients could be improved by the combined application of phosphogypsum and limestone powder instead of limestone powder alone, but the application amount of phosphogypsum should be controlled properly.

**Keywords:** newly cultivated red soil; phosphogypsum; limestone powder; acidity; nutrient; soil improvement

0 引言

亚热带低丘新垦耕地土壤生产力低下,普遍存在酸性和磷素等矿质养分缺乏问题<sup>[1-3]</sup>,降酸与增加矿质养分是这一地区土壤改良的重要内容<sup>[4-7]</sup>。传统上,施用石灰是降低亚热带低丘土壤酸性和消除铝毒的较为有效的方法<sup>[8-9]</sup>,但长期高量施用石灰可引起土壤板结,导致土壤钙、钾、镁等元素的失衡。磷石膏是磷复肥与磷化工行业的副产物,其主要成分是硫酸钙,并含有少量游离的磷酸、硅<sup>[10-11]</sup>。过去几十年,磷石膏已被用于国内北方地区盐碱土的改良<sup>[12-16]</sup>,其可有效降低土壤酸度,并能促进土壤质量的提高。试验表明<sup>[17-19]</sup>,磷石膏虽然呈酸性,但其具有“自动加石灰”效应<sup>[19-21]</sup>,也可作为酸性土壤改良剂,在降低土壤酸度方面具有明显的效果,在降低心土层酸度方面有特别的效应。磷石膏进入土壤后其中的硫酸钙与土壤反应生成碱式硫酸铝,从而降低了土壤中的交换性 $Al^{3+}$ <sup>[19]</sup>、提高土壤的pH。为了解磷石膏与石灰石粉配施对新垦红壤耕地降酸、增加土壤矿质养分中的作用,以新垦黄筋泥为研究对象,设计磷石膏、石灰石粉不同用量及其组合的盆栽试验,旨在为同时改善新垦红壤酸碱度和养分状况提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为第四纪红土母质发育的黄筋泥,系浙江省低丘地区典型的红壤。土样采自近年开垦但尚未改良的耕地,为表层土壤,其基本性状见表1。

供试石灰石粉为常规的市售农用物品,含 $CaCO_3$  97%。供试磷石膏采自贵州某磷肥厂,为灰白色粉砂颗粒,含 $CaSO_4$  73%,含磷( $P_2O_5$ )量 13 g/kg;总 Pb、As、Cr、Cd、Hg、Ni、Cu、Zn 含量分别为 33.4、15.3、5.2、1.9、

0.85、18.5、13.5、132.4 mg/kg。

1.2 试验设计

盆栽试验设 7 个处理,分别为:(1)对照组不施石灰石粉和磷石膏;(2)低量石灰石粉(1.00 g/kg 土,相当于 0.225 kg/m<sup>2</sup>);(3)低量磷石膏(1.00 g/kg 土,相当于 0.225 kg/m<sup>2</sup>);(4)1/2 低量石灰石粉+1/2 低量磷石膏(即石灰石粉 0.50 g/kg 土+磷石膏 0.50 g/kg 土);(5)中量石灰石粉(1.67 g/kg 土,相当于 0.375 kg/m<sup>2</sup>);(6)中量磷石膏(1.67 g/kg 土,相当于 0.375 kg/m<sup>2</sup>);(7)1/2 中量石灰石粉+1/2 中量磷石膏(即石灰石粉 0.84 g/kg 土+磷石膏 0.84 g/kg 土)。每个处理用土量为 15 kg,重复 3 次。

盆栽土壤经与石灰石粉或磷石膏充分混匀后,在室温条件下保持 75% 的土壤田间持水量放置 6 个月后,种植蔬菜,每盆移栽 4 株 25 天龄的青菜幼苗(品种为‘苏州青’)。在种植蔬菜前,每盆施尿素和氯化钾各 1.5 g。蔬菜生长 60 天后收获蔬菜,用称重法测量蔬菜地上部分生物量,同时混合各盆土壤,采集土壤样品用于分析。采集的土壤样品经风干后分别过 2 mm 和 0.15 mm 塑料土筛,用于土壤养分和重金属测定;蔬菜样用去离子水冲洗 2~3 次后切碎、混匀,用于重金属分析。

1.3 分析方法

土壤 pH、有机质、交换性酸、CEC、有效磷、速效钾采用常规方法分析<sup>[22]</sup>;土壤有效硅用乙酸缓冲液浸提-硅钼蓝比色法测定;有效钙和有效镁用乙酸铵提取-原子吸收法测定;土壤容重采用环刀法测定;水稳性团聚体采用湿筛法测定。蔬菜样品用高氯酸消化,用石墨炉-原子吸收光谱法测定 Cu、Zn、Cd 和 Pb,荧光原子吸收法测定 Hg 和 As。土壤重金属采用国标法测定,其

表 1 供试土壤基本性状

土壤名称	pH	有机质/(g/kg)	CEC/(cmol/kg)	粘粒/(g/kg)	全氮/(g/kg)
黄筋泥	4.83	7.63	13.22	397	0.52

中, Cu、Zn、Cd、As、Ni 和 Cr 采用盐酸-硝酸-高氯酸消解, 石墨炉原子吸收分光光度法测定 Cd, 原子光谱吸收法测定 Cu、Zn、Cr 和 Ni, 荧光原子吸收法测定 As; Hg 用硝酸-高锰酸钾消解, 冷原子吸收光谱法测定; Pb 用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解, 石墨炉原子吸收分光光度法测定。分析过程中采用质量控制, 各重金属测试误差控制在 5% 以内, 重复样间相对误差控制在 10% 以下。所有数据采用 Microsoft Excel 2003 处理, 统计分析采用软件 SPSS 12.0 完成, 采用 LSD 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 对土壤酸碱性的影响

由表 2 可知, 无论是施用石灰石粉还是磷石膏均可提高土壤 pH、降低土壤的交换性酸, 其效果随石灰石粉或磷石膏用量的增加而增强。在等质量施用下, 磷石膏降低土壤酸度的效果低于石灰石粉。低剂量石灰石粉和磷石膏施用后土壤 pH 分别提高了 0.57、0.23, 中剂量石灰石粉和磷石膏施用后土壤 pH 分别提高了 0.82、0.54, 其原因是磷石膏对酸的中和值低于石灰石粉。石灰石粉与磷石膏配合施用对土壤酸度的降低效果明显高于单施磷石膏, 但低于石灰石粉, 低剂量和中剂量石灰石粉与磷石膏配合施用后土壤 pH 分别提高了 0.35、0.67。

### 2.2 对土壤物理性状的影响

无论是施用低剂量的石灰石粉还是中剂量的石灰石粉对土壤水稳定性团聚体和容重的影响均不明显(表 2), 但磷石膏或石灰石粉与磷石膏配合施用均可明显提高土壤中 >0.25 mm 水稳定性团聚体的数量, 降低土壤容重, 表明磷石膏的施用可有效改善土壤物理性状。低剂量和中剂量磷石膏施用后, 土壤中 >0.25 mm 水稳定性团聚体分别比对照提高 5.56% 和 14.57%, 土壤容重分别比对照降低 2.16%、4.43%; 低剂

量和中剂量石灰石粉与磷石膏配合施用后土壤中 >0.25 mm 水稳定性团聚体分别比对照提高 8.35%、12.19%, 土壤容重分别比对照降低 2.88%、3.60%。施用磷石膏促进土壤中水稳定性团聚体的形成可能与施用磷石膏后增加钙离子浓度有关。

### 2.3 对土壤肥力状况的影响

由表 3 可知, 与对照比较, 无论是施用石灰石粉还是磷石膏土壤有机质含量均略有下降, 其原因可能是改良剂施用后土壤 pH 提高、土壤微生物活性增强, 导致有机质矿化增加。土壤有机质下降幅度为施用石灰石粉的略多。施用石灰石粉和磷石膏均明显提高了土壤的交换性钙, 等质量条件下土壤交换性钙的增加程度是单独施用磷石膏或石灰石粉与磷石膏配合施用略高于单独施用石灰石粉, 且施用量越高土壤交换性钙增加越明显。单独施用石灰石粉对土壤交换性镁、交换性钾、有效磷、有效硅及有效硫的影响较小(其中有效钾略有下降), 但单独施用磷石膏或石灰石粉与磷石膏配合施用均可显著提高土壤的交换性镁、交换性钾、有效磷、有效硅及有效硫。低剂量和中剂量磷石膏施用后, 土壤中交换性镁、交换性钾、有效磷、有效硅及有效硫分别比对照增加 14.04%、11.60%、175.98%、41.74%、207.23% 和 21.31%、19.24%、247.30%、52.82%、299.78%; 低剂量和中剂量石灰石粉与磷石膏配合施用后, 土壤中交换性镁、交换性钾、有效磷、有效硅及有效硫分别比对照增加 11.56%、7.40%、120.30%、31.64%、188.52% 和 19.96%、12.62%、185.47%、36.98%、255.14%。

### 2.4 对土壤重金属积累的影响

由表 4 可知, 由于试验中石灰石粉和磷石膏的施用量较低, 除砷外, 无论是施用石灰石粉还是磷石膏或两者配合施用均没有显著改变土壤中重金属含量, 各处理的 Cu、Zn、Cd、Cr、Hg、Pb、Ni 等 7 种重金属元素含

表 2 改良剂对土壤酸度和物理性状的影响

处理	pH	交换性酸/(cmol/kg)	>0.25 mm 水稳定性团聚体/%	容重/(g/cm <sup>3</sup> )
对照	4.81f	6.14a	41.66d	1.39a
低量石灰石粉	5.38bc	3.69d	42.32cd	1.40a
低量磷石膏	5.04e	4.42b	43.98c	1.36b
1/2 低量石灰石粉+1/2 低量磷石膏	5.16d	4.12c	45.14bc	1.35bc
中量石灰石粉	5.63a	2.34e	41.14d	1.41a
中量磷石膏	5.35c	3.38d	47.73a	1.33c
1/2 中量石灰石粉+1/2 中量磷石膏	5.48b	2.84e	46.74ab	1.34bc

注: 表中同一列统计平均值后英文字母相同表示差异不显著( $P>0.05$ ), 下同。

表3 不同改良剂对土壤养分的影响

处理	有机质/ (g/kg)	交换性钙/ (mg/kg)	交换性镁/ (mg/kg)	交换性钾/ (mg/kg)	有效磷/ (mg/kg)	有效硅/ (mg/kg)	有效硫/ (mg/kg)
对照	7.58a	287d	52.41c	78.54d	5.37d	87.92d	13.42d
低量石灰石粉	7.36b	677c	53.24c	73.54de	6.14d	88.63d	12.83d
低量磷石膏	7.43ab	715b	59.77b	87.65b	14.82b	124.62ab	41.23c
1/2 低量石灰石粉+1/2 低量磷石膏	7.49ab	710b	58.47b	84.35c	11.83c	115.74c	38.72c
中量石灰石粉	7.28b	847a	52.98c	71.25e	5.98d	85.25d	11.94d
中量磷石膏	7.54a	874a	63.58a	93.65a	18.65a	134.36a	53.65a
1/2 中量石灰石粉+1/2 中量磷石膏	7.51a	868a	62.87ab	88.45b	15.33b	120.43bc	47.66b

表4 不同改良剂对土壤重金属含量的影响

处理	Cu	Zn	Cd	As	Cr	Hg	Pb	Ni
对照	28.54a	76.54a	0.187a	13.54b	58.47a	0.143a	23.87a	33.84a
低量石灰石粉	27.59a	77.24a	0.191a	14.14b	57.42a	0.141a	24.51a	35.62a
低量磷石膏	28.98a	74.89a	0.195a	14.83ab	56.98a	0.149a	23.74a	33.25a
1/2 低量石灰石粉+1/2 低量磷石膏	28.78a	76.54a	0.189a	14.53ab	57.91a	0.145a	24.65a	34.18a
中量石灰石粉	28.74a	77.12a	0.193a	14.09a	57.24a	0.151a	24.33a	35.24a
中量磷石膏	29.14a	78.24a	0.191a	15.69a	56.98a	0.148a	23.18a	33.62a
1/2 中量石灰石粉+1/2 中量磷石膏	28.94a	77.96a	0.198a	14.87ab	55.87a	0.146a	23.57a	34.59a

量均与对照之间无明显的差异;但施用磷石膏后土壤中 As 有轻微的增加。但所有处理土壤的 8 种重金属元素含量均在安全范围,表明在试验条件下,磷石膏的施用不会改变土壤重金属的状况。

2.5 对蔬菜生长及蔬菜中重金属含量的影响

试验结束时蔬菜地上部分鲜重的观察表明,施用石灰石粉或磷石膏均显著增加了蔬菜的生物量。对照处理蔬菜地上部分鲜重为 78 g/盆,低量石灰石粉、低量磷石膏、1/2 低量石灰石粉+1/2 低量磷石膏、中量石灰石粉、中量磷石膏、1/2 中量石灰石粉+1/2 中量磷石

膏处理蔬菜地上部分鲜重分别为 107、115、122、123、134、144 g/盆,分别比对照增加 37.18%、47.43%、56.41%、57.69%、71.79%、84.62%。在改善蔬菜生长方面的作用,磷石膏与石灰石粉配施或单施磷石膏的效果优于单施石灰石粉。

表 5 的结果表明,在试验条件下,因施用石灰石粉或磷石膏后土壤 pH 的提高(表 2),施用石灰石粉或磷石膏后蔬菜中 Cd、Cr、Pb 含量有所下降,但 As 含量呈轻微增加,对蔬菜中其他重金属积累的影响不明显。所有处理的蔬菜中 7 种元素的重金属含量均符合农产

表5 不同改良剂对蔬菜重金属含量的影响

处理	Cu	Zn	Cd	As	Cr	Hg	Pb
对照	8.85	16.54	0.013	0.074	0.032	0.0024	0.049
低量石灰石粉	9.54	15.64	0.011	0.082	0.028	0.0023	0.041
低量磷石膏	8.67	16.33	0.012	0.094	0.031	0.0025	0.044
1/2 低量石灰石粉+1/2 低量磷石膏	9.15	14.98	0.012	0.094	0.030	0.0023	0.042
中量石灰石粉	8.26	15.67	0.009	0.099	0.024	0.0021	0.037
中量磷石膏	8.74	15.39	0.010	0.110	0.028	0.0024	0.042
1/2 中量石灰石粉+1/2 中量磷石膏	8.64	15.98	0.009	0.118	0.027	0.0023	0.040
农产品安全质量无公害蔬菜要求(GB 18406.1—2001)	<10	<20	<0.05	<0.5	<0.5	<0.01	<0.2



品安全质量无公害蔬菜要求(GB 18406.1—2001)。

### 3 结论

研究表明,在磷石膏用量不是很高的条件下,施用磷石膏不会引起土壤重金属的明显积累,且因土壤pH的提高蔬菜中Cd、Cr、Pb含量有所下降。但施用磷石膏后,As含量呈轻微增加,表明磷石膏在施用时的施用量需加以控制。鉴于在改善土壤矿物养分、物理性状和蔬菜生长方面的综合作用方面磷石膏与石灰石粉配施和单施磷石膏的效果高于单施石灰石粉,研究认为,对于酸化明显和养分低下的新垦红壤可采用磷石膏与石灰石粉配施替代单独施用石灰石粉加以改良。

### 4 讨论

低丘新垦耕地土壤因强酸性、铝毒和养分缺乏等原因导致农作物生长不良<sup>[23-25]</sup>,缓解或消除这些限制因素是改良这类土壤的重要内容。本试验的结果表明,在不施用改良剂的条件下,即使施用氮肥和钾肥,蔬菜的生长仍不正常,生物量较低。传统上,酸性土壤改良主要施用石灰石粉(包括熟石灰等),其主要作用机理是中和反应,即利用改良剂中的碱性物质直接中和土壤的酸,从而达到提高土壤pH、降低铝毒的目的。虽然土壤pH的提高可在某种程度上改善土壤养分的生物有效性,但由于石灰石粉成分单一,难以从本质上提升土壤的养分状况,而且钙与其他元素的竞争作用可能还会导致矿质养分的不平衡,加剧钾、镁等元素的缺乏<sup>[26-27]</sup>。然而,磷石膏因同时含有硫酸钙、磷、硅、钾、镁等物质<sup>[10-11]</sup>,其在中和土壤酸的同时,还可补充土壤中磷、镁、钾元素,改善土壤养分的平衡及土壤物理性状。本研究的试验结果发现,虽然石灰石粉在降酸方面明显优于磷石膏,但在促进蔬菜生长方面却是磷石膏优于石灰石粉,降酸和提升矿质养分在改良新垦红壤非常重要,而磷石膏具有降酸与培肥的双重作用,是一种优于石灰的营养型酸性土壤改良剂。本研究只是一个简单的比较试验,至于石灰石粉与磷石膏的最佳比例及不同酸度土壤如何确定合理的石灰石粉与磷石膏的配比及施用量还有待进一步试验研究。

### 参考文献

- [1] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [2] 曾希柏,李菊梅,徐明岗,等.红壤旱地的肥力现状及施肥和利用方式的影响[J].土壤通报,2006,37(3):434-437.
- [3] 孙波,张桃林,赵其国,等.南方红壤丘陵区土壤养分贫瘠化的综合评价[J].土壤,1995,27(3):119-124.
- [4] 王伯仁,徐明岗,文石林.长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响[J].水土保持学报,2005,19(1):97-100.
- [5] 蔡泽江,孙楠,王伯仁,等.长期施肥对土壤pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):71-78.
- [6] 孔宏敏,何圆球,吴大付,等.长期施肥对红壤旱地作物产量和土壤肥力的影响[J].应用生态学报,2004,15(5):782-786.
- [7] 柳开楼,熊华荣,胡惠文,等.特贝钙土壤调理剂对红壤旱地花生产量和阻控土壤酸化的影响[J].广东农业科学,2017,44(5):93-98.
- [8] 冯兆滨,刘秀梅,冀建华,等.红壤调理剂的改土培肥及作物增产研究[J].中国土壤与肥料,2017(5):122-128.
- [9] 李育鹏,胡海燕,李兆军,等.土壤调理剂对红壤pH值及空心菜产量和品质的影响[J].中国土壤与肥料,2014(6):21-26.
- [10] 许敬敬,张乃明.磷石膏的农业利用研究进展[J].磷肥与复肥,2017,32(9):34-38.
- [11] 张利珍,张永兴,张秀峰,等.中国磷石膏资源综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2019(4):14-18.
- [12] 张云,张相柱.磷石膏混合法对盐碱地的改良研究[J].内蒙古水利,2018(12):19-20.
- [13] 焦娟玉,周成志.磷石膏改良盐碱地资源化利用技术试验研究[J].农业开发与装备,2018(8):112-113.
- [14] 翟永胜,苗红英,樊秀荣,等.内蒙古临河区磷石膏改良盐碱地效果分析[J].安徽农业科学,2017,45(14):98-99.
- [15] 郭全恩,车宗贤,曹诗瑜,等.地下水位上升条件下磷石膏改良剂对土壤盐分迁移的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):171-176.
- [16] 杨丹.糖醛渣和磷石膏对菱镁矿粉尘污染土壤的改良效果研究[J].环境污染与防治,2017,39(3):295-300.
- [17] 叶厚专,范业成.磷石膏改良红壤的效应[J].植物营养与肥料学报,1996,2(2):181-185.
- [18] 肖厚军,王正银,何佳芳,等.磷石膏改良强酸性黄壤的效应研究[J].水土保持学报,2008,22(6):62-66.
- [19] 张文安,徐大地,肖厚军.磷石膏改良贵州黄壤及其应用前景[J].贵州农业科学,2002,30(2):61-63.
- [20] SUMNER M E, SHAHANDEN H, BOUTON J, et al. Amelioration of an acid soil profile through deep liming and surface application of gypsum[J]. Soil science society of american journal, 1990, 50: 1254-1258.
- [21] ALVA A K, SUMNER M E. Amelioration of acid soil infertility by phosphogypsum[J]. Plant and soil, 1990, 128, 127-134.
- [22] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科技出版社,1978:105-215.
- [23] 曹志洪,周建民.中国土壤质量[M].北京:科学出版社,2008:30-39.
- [24] 易杰祥,吕亮雪,刘国道.土壤酸化和酸性土壤改良研究[J].华南热带农业大学学报,2006,12(1):23-28.
- [25] 王代长,胡红青,李学垣.酸性土壤上磷矿粉释磷机理与农学效应[J].中国农学通报,2006,22(9):242-245.
- [26] 孟赐福,傅庆林,水建国,等.浙江中部红壤施用石灰对土壤交换性钙、镁及土壤酸度的影响[J].植物营养与肥料学报,1999,5(2):129-136.
- [27] 李九玉,王宁,徐仁扣.工业副产品对红壤酸度改良研究[J].土壤,2009,41(6):932-939.