

# 磷石膏改良剂对江苏如东滨海盐土理化 性状及小麦生长的影响\*

吴洪生<sup>1†</sup> 陈小青<sup>1</sup> 周晓冬<sup>1</sup> 杨筱楠<sup>1</sup> 石佑华<sup>2</sup> 满 军<sup>3</sup> 吴红兵<sup>3</sup>

(1 南京信息工程大学农业资源与环境系, 南京 210044)

(2 如东县农业局土肥站, 江苏如东 226404)

(3 中国石油化工集团南化公司磷肥厂, 南京 210048)

## EFFECTS OF SOIL AMENDMENT PHOSPHOGYPSUM ON PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF AND WHEAT GROWTH IN COASTAL SALINE SOIL IN RUDONG, JIANGSU

Wu Hongsheng<sup>1†</sup> Chen Xiaoqing<sup>1</sup> Zhou Xiaodong<sup>1</sup> Yang Xiaonan<sup>1</sup> Shi Youhua<sup>2</sup> Man Jun<sup>3</sup> Wu Hongbing<sup>3</sup>

(1 College of Agricultural Resources and Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

(2 Rudong Bureau of Agriculture Soil and Fertilizer Station, Rudong, Jiangsu 226404, China)

(3 Sinopec Group Co. Ltd., Nanjing Chemical Company Attached Phosphate Factory, Nanjing 210048, China)

关键词 磷石膏; 滨海盐土; 改良; 小麦

中图分类号 S156.4 文献标识码 A

土壤盐渍化是影响生态环境和农业生产的全球化问题。据统计,全球盐渍化的土地面积大约有  $9.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 其中我国约有  $2.7 \times 10^7 \text{ hm}^2$ <sup>[1]</sup>。江苏省位于中国大陆东部沿海中心,地处长江三角洲,长江以北有一片淤积成陆的滨海冲积平原。因为成陆前长期浸于海水中,成陆后,土层中富含抑制植物生长的可溶性盐类,主要以 NaCl 为主,形成了滨海盐土。如果能将这些盐碱土改良,那么土地资源紧张将会得到有效的缓解。

磷石膏是磷铵工业的副产品,随意堆积会占用大量土地,而且污染环境,有必要对它进行资源再生利用。磷石膏的主要成分是二水硫酸钙,前苏联从 20 世纪 70 年代开始就已经用它来进行盐碱土的改良,并且取得较好的效果<sup>[2]</sup>。近年来,国内外许多学者开始用磷石膏代替石膏来改良盐碱土。廉晓娟等<sup>[3]</sup>对天津滨海盐土采用工程措施、灌溉洗盐、化学改良和生物改良相结合,土壤盐分由氯化

物型向硫酸盐型转变,且化学改良及有机肥能提高盐土表层养分和有机质含量。Ghazi 等<sup>[4]</sup>研究表明,施用磷石膏可以增加土壤中一些微量元素的含量,从而促进植物生长。王凯和秦毓芬<sup>[5]</sup>的研究表明,磷石膏处理的土壤养分较对照有不同程度的提高,其中速效磷增幅最大,达 66.7% ~ 100%。肖厚军等<sup>[6]</sup>研究了磷石膏矫治酸性黄壤的效应及机制,证明磷石膏对农作物确实有增产效果。程文娟等<sup>[7]</sup>研究表明,冬季利用咸水结冰灌溉结合磷石膏处理滨海盐土,可以改善滨海盐土的碱化问题,同时能够降低土壤的含盐量,这与林叶彬等<sup>[8]</sup>的研究相似。李成坤等<sup>[9]</sup>研究表明,磷石膏能解决苏打盐碱土不透水、碱性大、不利于水稻生长的问题。Mullins 和 Mitchell<sup>[10]</sup>采用磷石膏为硫肥种植小麦,研究表明磷石膏能够显著提高小麦的品质和产量。Tang 等<sup>[11]</sup>用蒸馏水模拟暴雨,比较了几种不同类型土壤施用磷石膏后土壤理化性状,研究表明磷石膏能有

\* 江苏省“六大人才高峰”项目资助计划(2009241)

† 通讯作者:吴洪生,陈小青为共同第一作者

作者简介:吴洪生(1964—),男,江苏泰州人,博士,副研究员,主要从事农业资源与环境、固体废弃物资源化利用、生物环境互作、农田温室气体微生物生态学机理及防控、生物肥料生物农药的研究工作。E-mail: wuhsluck@163.com, 电话:025-58699871

收稿日期:2011-11-14;收到修改稿日期:2012-03-11

效降低由于钠离子含量增高造成的土壤径流和侵蚀。Agassi 等<sup>[12]</sup>研究发现,施用磷石膏能够防止土壤板结,降低土壤中的钠离子浓度,能防止土壤退化和水土流失。李晓娜等<sup>[13]</sup>研究认为,施用二水硫酸钙能减少磷向可溶性形式转换,增强土壤中解磷细菌和碱性磷酸酶活性,增加土壤中磷的释放。姜瑜等<sup>[14-17]</sup>研究发现,磷石膏中的  $\text{Ca}^{2+}$  能将土壤胶体中  $\text{Na}^{+}$  代换出来,达到脱盐效果。石懿和任坤等<sup>[18-19]</sup>研究表明,施用脱硫石膏后土壤表层 pH 较对照均有明显降低。Eduardo<sup>[20]</sup> 研究发现,二水硫酸钙的应用能增加小麦叶片中钙和硫的含量。Rahmat<sup>[21]</sup> 分别以不同量的脱硫废弃物应用到水稻和小麦轮作系统土壤中,结果表明产量提高。利用磷石膏改良土壤的报道很多,但有关利用磷石膏对江苏盐碱土进行改良的研究很少,而江苏沿海滩涂面积较大,如果能加以改良,可以缓解土地紧张,促进江苏农业可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

磷石膏废弃物由中国石油化工集团南化公司的磷肥厂提供,主要参数为:pH 2.15, CaO 296.8 g kg<sup>-1</sup>, SO<sub>3</sub> 415.9 g kg<sup>-1</sup>, SiO<sub>2</sub> 60.6 g kg<sup>-1</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 28.5 g kg<sup>-1</sup>。供试滨海盐土取自江苏如东滩涂,主要参数为:全氮 117.4 mg kg<sup>-1</sup>,速效氮 15.6 mg kg<sup>-1</sup>,速效磷 18.7 mg kg<sup>-1</sup>,速效钾 29.8 mg kg<sup>-1</sup>,有机质 2.26 g kg<sup>-1</sup>,pH 8.78,全盐 3.108 g kg<sup>-1</sup>。

供试小麦品种:宁麦 13。

### 1.2 试验设计

试验采用盆钵进行温室试验。共设 7 个处理,分别为:(1) CK1:不施肥,不施磷石膏;(2) CK2:30% 复合肥 900 kg hm<sup>-2</sup>;(3)改良剂 1:30% 复合肥 900 kg hm<sup>-2</sup> + 磷石膏 1 125 kg hm<sup>-2</sup> (简写成改 1);(4)改良剂 2:30% 复合肥 900 kg hm<sup>-2</sup> + 磷石膏 2 250 kg hm<sup>-2</sup> (简写成改 2);(5)改良剂 3:30% 复合肥 900 kg hm<sup>-2</sup> + 磷石膏 11 250 kg hm<sup>-2</sup> (简写成改 3);(6)改良剂 4:30% 复合肥 900 kg hm<sup>-2</sup> + 磷石膏 22 500 kg hm<sup>-2</sup> (简写成改 4);(7)改良剂 5:30% 复合肥 900 kg hm<sup>-2</sup> + 磷石膏 45 000 kg hm<sup>-2</sup> (简写成改 5)。

每处理设 3 个重复,随机排列,盆钵规格:64 cm × 42 cm × 43 cm,将滨海盐土土样过 5 mm 筛装盆。2010 年 10 月 21 日开始盆栽试验。每盆装土壤 2.5 kg,

复合肥 60% 基施,其余在 2011 年 3 月 28 日追肥,磷石膏改良剂做基肥一次性施用,2011 年 5 月 1 日所有处理施用尿素 75 kg hm<sup>-2</sup>。每盆播种小麦种子 30 粒,一次性将水浇透,其他管理措施相同,所有盆钵放置在玻璃温室内,自然温度、光照和湿度。于 2011 年 6 月 16 日采集植株样及土样,选取有代表性的小麦样品测量其株高和生物量;每盆 3 个取样点,取表层 0~20 cm 的土样,经风干后,磨细,过 1 mm 筛后测定理化性状。

### 1.3 测定方法

土壤有机质用重铬酸钾氧化-外加加热法。土壤全氮用半微量凯氏法(KDY-9810 型凯式定氮仪),水解氮用碱解扩散法,速效磷用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法(756MC 型分光光度计),pH 用电位法(PHS-3C 型 pH 计),全盐用电导法(DDBJ-350 型电导仪),Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 用 EDTA 滴定法,Na<sup>+</sup> 和 K<sup>+</sup> 用火焰光度法(6400A 型火焰光度计),CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 用双指示剂中和滴定法,Cl<sup>-</sup> 用硝酸银滴定法,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 用 EDTA 间接络合滴定法。具体测定方法参照文献[22]。

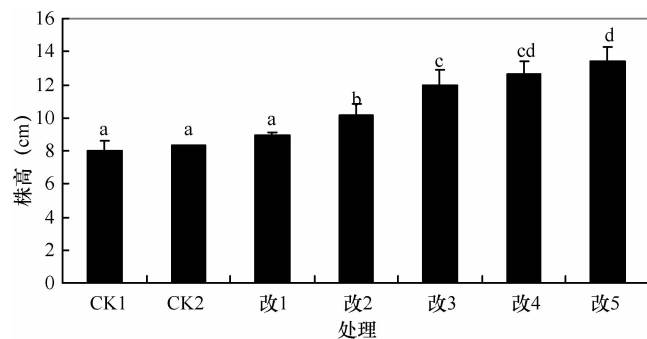
### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件对实验数据进行作图和显著性分析( $p < 0.05$ ),采用 LSD 方法进行处理间多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 施用磷石膏改良剂对小麦生长的影响

2.1.1 对小麦株高的影响 从图 1 可以看出,盆栽小麦株高改 5 > 改 4 > 改 3 > 改 2 > 改 1 > CK2 > CK1,改良剂处理较 CK1 增加的幅度分别为 12.5%、27.6%、49.7%、59.0%、68.3%,施用改良剂 45 000 kg hm<sup>-2</sup> 对小麦株高的改良效果是最好的,且磷石膏改良剂各处理之间的差异显著。同时也可



注:图中柱形上方不同字母表示在 0.05 水平上差异显著

图 1 不同磷石膏改良剂处理小麦株高的变化

看出,CK1 和 CK2 的株高差异不显著,表明施用 30% 复合肥 900 kg hm<sup>-2</sup>对小麦的株高没有显著影响。

**2.1.2 对小麦地上生物量的影响** 经测定,各处理生物量分别为:0.120、0.110、0.130、0.151、0.196、0.194、0.200 g,不同处理小麦地上生物量有一定的差别。磷石膏改良剂处理生物量均较对照的大,表明施用磷石膏改良剂较不施的处理效果好。改 5 与对照相比,差异显著,生物量较 CK1 增加 66.7%,表明磷石膏改良剂对小麦生长有一定的效果,且改良剂的用量越大,改良效果越好。

## 2.2 施用磷石膏改良剂对土壤养分的影响

土壤全氮量通常用于衡量土壤氮素的基础肥力。通过单因素方差分析,各处理间全氮  $p=0.0012 < 0.05$ ,组间差异显著,且磷石膏处理的全氮含量均大于对照。磷石膏改良剂处理较 CK2 的全氮量分别增加 59.37、29.12、41.27、67.90、75.93 mg kg<sup>-1</sup>,增幅在 21.5% ~ 56% 之间,表明磷石膏改良剂对土壤全氮量还是有贡献的,且随着磷石膏施用量越大,全氮基本呈上升趋势。

水解氮一般是用以衡量植物在近期内可以从土壤中利用的氮素养分的多少。从表 1 可以看出,改良剂 1、2、3、5 的水解氮均较 CK2 有所增加,增幅最大的是处理 3,达 50.1%。虽然各处理水解氮含量之间的差异不明显,但施用磷石膏改良剂的处理还是较对照的效果好,差异不明显的原因可能是因为磷石膏改良剂的加入只经过一个生长季,时间太短,导致磷石膏对土壤中潜在养分的活化率不高。

随着磷石膏的用量增多,速效磷含量表现出一定的上升趋势,且改 5 远远大于 CK2。经过单因素方差分析,各处理间速效磷含量的差异表现出极显著水平( $p < 0.01$ )。磷石膏改良剂处理分别较 CK2 增长 35.6%、17.4%、100.5%、81.3%、226.9%,改 5 的效果最好。这是因为磷石膏本身含有速效磷成分,其进入土壤后提高了土壤中的速效磷含量。

从表 1 可以看出施用磷石膏后,土壤的有机质含量并没有明显的改变,各处理之间的差异也不明显。

表 1 不同磷石膏改良剂处理土壤养分的差异(平均值 ± 标准差,  $n=3$ )

处理	有机质(g kg <sup>-1</sup> )	全氮(mg kg <sup>-1</sup> )	水解氮(mg kg <sup>-1</sup> )	速效磷(mg kg <sup>-1</sup> )
CK1	3.50 ± 0.31b	136.5 ± 21.0a	7.00 ± 1.21a	20.55 ± 2.18a
CK2	3.01 ± 0.51a	135.6 ± 9.9a	7.93 ± 1.46ab	21.74 ± 10.81a
改 1	3.46 ± 0.43b	195.0 ± 9.1c	9.80 ± 2.42bc	29.49 ± 0.99a
改 2	3.87 ± 0.60c	164.8 ± 19.7b	10.97 ± 6.50c	25.52 ± 6.95a
改 3	3.99 ± 0.82c	176.9 ± 8.5b	11.90 ± 4.20c	43.58 ± 1.59b
改 4	2.96 ± 0.28a	203.5 ± 35.4cd	6.30 ± 0.70a	39.42 ± 7.54b
改 5	3.18 ± 0.09ab	211.6 ± 21.2d	10.73 ± 2.25c	71.06 ± 32.45c

注:同列中不同字母表示在 0.05 置信水平上差异显著

## 2.3 施用磷石膏改良剂对土壤 pH 的影响

试验测定的各处理 pH 分别为:8.26、8.23、8.15、8.06、7.97、7.86、7.65。回归分析显示磷石膏的用量与土壤的 pH 呈负相关。磷石膏改良剂每个处理的 pH 均较 CK1 下降,最大降幅达 7.4%,对于降低土壤 pH,改 5 的效果最好。偏碱性的滨海盐土对植物生长不利,施用磷石膏后能有效降低 pH,有利于植物生长。

## 2.4 施用磷石膏改良剂对滨海盐土水溶性盐的影响

### 2.4.1 不同处理对 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 的影响

滨海盐土主要以 NaCl 为主,Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 等会阻碍植物根系吸水,引起植物生理干旱,难以出苗,施用

磷石膏后,NaCl (20℃ 溶解度为 359 kg m<sup>-3</sup>) 与 CaSO<sub>4</sub> 生成 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (20℃ 时的溶解度为 189 kg m<sup>-3</sup>),大大降低了盐分的溶解度,加上自然淋盐,Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 就会随水而去,使得耕层土壤含盐量降低,利于植物生长<sup>[23]</sup>。

从表 2 可以看出,磷石膏改良剂处理 Na<sup>+</sup> 含量与对照之间的差异显著( $p < 0.05$ ),各处理间 Na<sup>+</sup> 含量随着改良剂施用量增加而降低,降低幅度与 CK2 相比分别为 14.4%、32.5%、45.9%、59.2%、75.8%,这是因为磷石膏中的 Ca<sup>2+</sup> 置换出土壤胶体中的 Na<sup>+</sup>,Na<sup>+</sup> 随水流失,从而达到脱盐效果。施用磷石膏 45 000 kg hm<sup>-2</sup> 对于土壤消除钠离子的效果是最好的。

磷石膏改良剂各处理土壤中  $K^+$  相对于 CK2 分别增加了 58.3%、122.2%、155.6%、219.4%、300%, 且改良剂各处理与对照差异显著, 其中改 5 的效果最好。

在盐碱土中,  $Na^+$  减少,  $Ca^{2+}$  的增加有利于植物的生长发育。从表 3 可以看出, 改良剂各处理  $Ca^{2+}$  均较对照增加了, 且与对照差异显著, 且随着磷石膏施用量增加,  $Ca^{2+}$  含量增加。因为磷石膏中含有大量活化的  $Ca^{2+}$ , 所以土壤中的水溶性钙含量增加, 钙含量提高有利于代换出土壤中交换性钠, 从而降低钠危害。

从表 2 可以看出,  $Mg^{2+}$  的变化较不明显, 各处理间的差异也不太显著, 说明磷石膏的施用对土壤中  $Mg^{2+}$  的变化影响不大。

#### 2.4.2 不同处理对 $CO_3^{2-}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 的影响

从表 3 可以看出, 土壤中  $CO_3^{2-}$  微乎其微, 几乎没有。当改良剂的用量为  $11\ 250\ kg\ hm^{-2}$  时, 土壤中的  $CO_3^{2-}$  全部消失, 这是由于磷石膏的加入, 使得

土壤中的  $CO_3^{2-}$  与  $Ca^{2+}$  结合生成难溶的  $CaCO_3$ 。

经过多重比较, 磷石膏改良剂处理的  $HCO_3^-$  与对照间的差异显著, 改 1 和改 2 间的差异不显著, 改 3 和改 4 的差异不显著, 改 5 与前 4 个改良剂处理间的差异显著, 但总体上  $HCO_3^-$  含量与磷石膏用量呈负相关, 说明磷石膏改良剂的加入使得土壤的碱化度降低, 达到了改良土壤的目的。

研究发现土壤中  $Cl^-$  含量最高是改 2, 最低是 CK2, 两者相差  $0.015\ g\ kg^{-1}$ , 差异不明显, 且  $Cl^-$  变化无明显规律, 说明磷石膏改良剂对土壤中的  $Cl^-$  无明显改良效果。

从表 3 可以看出, 随着磷石膏改良剂的施用, 土壤中  $SO_4^{2-}$  含量明显增长, 施用磷石膏改良剂处理的  $SO_4^{2-}$  含量与对照之间差异显著。  $SO_4^{2-}$  含量最大的是改 5, 最小的是 CK2, 两者相差  $0.122\ g\ kg^{-1}$ , 改 5 较 CK2 增加了 171.8%, 磷石膏改良剂能增加土壤中  $SO_4^{2-}$ , 且土壤中  $SO_4^{2-}$  含量与磷石膏用量呈正相关, 这是因为磷石膏本身就含有大量的  $SO_4^{2-}$ 。

表 2 不同磷石膏改良剂处理土壤中阳离子的差异(平均值  $\pm$  标准差,  $n=3$ )

处理	土壤阳离子含量 ( $cmol\ kg^{-1}$ )			
	$Na^+$	$K^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$
CK1	4.03 $\pm$ 0.14f	0.18 $\pm$ 0.02a	0.68 $\pm$ 0.11a	0.51 $\pm$ 0.07a
CK2	3.98 $\pm$ 0.07f	0.18 $\pm$ 0.03a	0.80 $\pm$ 0.18ab	0.63 $\pm$ 0.09a
改 1	3.41 $\pm$ 0.15e	0.29 $\pm$ 0.03b	1.08 $\pm$ 0.16bc	0.62 $\pm$ 0.10a
改 2	2.69 $\pm$ 0.13d	0.41 $\pm$ 0.04c	1.45 $\pm$ 0.23d	0.67 $\pm$ 0.12a
改 3	2.16 $\pm$ 0.22c	0.47 $\pm$ 0.02d	2.14 $\pm$ 0.98e	1.00 $\pm$ 0.40b
改 4	1.63 $\pm$ 0.09b	0.59 $\pm$ 0.01e	3.27 $\pm$ 0.06f	1.11 $\pm$ 0.71b
改 5	0.97 $\pm$ 0.15a	0.74 $\pm$ 0.04f	4.96 $\pm$ 0.44g	1.84 $\pm$ 0.20c

注: 同列中不同字母表示在 0.05 置信水平上差异显著

表 3 不同磷石膏改良剂处理土壤中阴离子的差异(平均值  $\pm$  标准差,  $n=3$ )

处理	土壤阴离子含量 ( $cmol\ kg^{-1}$ )			
	$CO_3^{2-}$	$HCO_3^-$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$
CK1	0.13 $\pm$ 0.00a	0.33 $\pm$ 0.02e	2.06 $\pm$ 0.06c	3.00 $\pm$ 0.13a
CK2	0.13 $\pm$ 0.00a	0.31 $\pm$ 0.03d	1.72 $\pm$ 0.08a	2.96 $\pm$ 0.63a
改 1	0.13 $\pm$ 0.00a	0.28 $\pm$ 0.00c	1.81 $\pm$ 0.14ab	3.71 $\pm$ 0.38b
改 2	0.07 $\pm$ 0.00b	0.26 $\pm$ 0.02c	2.14 $\pm$ 0.06d	4.08 $\pm$ 0.67b
改 3	—	0.25 $\pm$ 0.02b	1.81 $\pm$ 0.17ab	6.33 $\pm$ 1.67c
改 4	—	0.25 $\pm$ 0.02b	1.83 $\pm$ 0.11b	8.00 $\pm$ 0.38d
改 5	—	0.21 $\pm$ 0.00a	2.00 $\pm$ 0.25c	8.04 $\pm$ 0.33d

注: 同列中不同字母表示在 0.05 置信水平上差异显著

### 3 结 论

1) 磷石膏改良剂处理均能不同程度地提高土壤养分,维持养分平衡。

2) 磷石膏改良剂处理均能不同程度地优化土壤中盐分组合。随着磷石膏的使用,土壤中对作物有利的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{K}^{+}$  的含量有不同程度的提高,对作物有害的  $\text{Na}^{+}$  含量逐渐减少,土壤中的  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^{-}$  逐渐减少甚至消失,对作物无害的  $\text{SO}_4^{2-}$  逐渐增加。

3) 磷石膏改良剂处理能明显降低土壤 pH。

4) 磷石膏改良剂处理均能不同程度地促进小麦生长。

综上所述,磷石膏作为磷肥工业的副产物,其中富含植物生长所必须的 P、Mg、S、Fe、Si 等元素和土壤改良所需的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ ,它能促进小麦生长,提高土壤中植物所需的养分含量,降低土壤 pH,优化土壤盐分组合。但磷石膏中还含有微量重金属元素,可能造成潜在的土壤污染,有必要对此进行进一步研究。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 王彬,肖国举,毛桂莲,等. 燃煤烟气脱硫废弃物对盐碱地的改良效应及对向日葵生长的影响. 植物生态学报,2010,34(10):1 227—1 235
- [ 2 ] 杨海儒. 大庆地区重度盐渍化土壤改良的研究. 哈尔滨:东北林业大学林学院,2008
- [ 3 ] 廉晓娟,王正祥,刘太祥,等. 滨海盐土综合改良措施及效果分析. 天津农业科学,2010,16(2):5—7
- [ 4 ] Ghazi N Al-Karaki, Al-Omouh M. Wheat response to phosphogypsum and mycorrhizal fungi in alkaline soil. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25(4):873—883
- [ 5 ] 王凯,秦毓芬. 磷石膏对改善滨海盐土理化性状的作用及其机理. 江苏农业科学,1996(6):37—39
- [ 6 ] 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. 水土保持学报,2008,22(6):62—66

- [ 7 ] 程水娟,潘洁,肖辉,等. 咸水结冰灌溉结合改良剂对滨海盐土的改良作用. 中国生态农业学报,2011,19(4):778—782
- [ 8 ] 林叶彬,顾卫,许映军,等. 冬季咸水冰覆盖对滨海盐渍土的改良效果研究. 土壤学报,2012,49(1):18—25
- [ 9 ] 李成坤,展广军,刘研,等. 苏打盐碱土种植水稻试验总结. 北方水稻,2011,41(1):33—35
- [ 10 ] Mullins G L, Mitchell C C. Use of phosphogypsum to increase yield and quality of annual forages. Bartow: Florida Institute of Phosphate Research, 1989:1—49
- [ 11 ] Tang Z, Lei T, Yu J, et al. Runoff and interrill erosion in sodic soils treated with dry PAM and phosphogypsum. Soil Sci Soc Am J, 2006, 70(3/4):679—690
- [ 12 ] Agassi M, Shainberg I, Morin J. Effect of powdered phosphogypsum on the infiltration rate of sodic soil. Irrigation Science, 1986, 7:53—61
- [ 13 ] 李晓娜,张强,陈明昌,等. 不同改良剂对苏打碱土磷有效性影响的研究. 水土保持学报,2005,19(1):71—74
- [ 14 ] 姜瑜. 烟气脱硫石膏农业资源化利用研究进展. 安徽农业科学,2007,35(28):8 950—8 951, 9 041
- [ 15 ] 徐胜光,李淑仪,廖新荣,等. 花生施用燃煤烟气脱硫副产物研究初报. 土壤与环境,2001,10(1):23—26
- [ 16 ] 吕二福良,乌力更. 石膏不同施用方法改良碱化土壤效果浅析. 内蒙古农业大学学报,2003,24(4):130—134
- [ 17 ] 耿春女,钱华,李小平,等. 脱硫石膏农业利用研究进展与展望. 环境污染治理技术与设备,2006,7(12):15—19
- [ 18 ] 石懿,杨培岭,张建国,等. 利用 SAR 和 pH 分析脱硫石膏改良碱化土壤的机理. 灌溉排水学报,2005,24(4):4—9
- [ 19 ] 任坤,任树海,杨培岭,等.  $\text{CaSO}_4$  在改良碱化土壤过程中对其理化性质的影响. 灌溉排水学报,2006,25(4):77—80
- [ 20 ] Eduardo F C, Ltacir C F, Gabriel B, et al. Lime and gypsum application on the wheat crop. ScientiaAgricola, 2002, 59(2):357—364
- [ 21 ] Rahmat U K, Raza G, Muhammad S K, et al. Effect of variable rates of gypsum application on wheat yield under rice-wheat system. Pakistan Journal of Biological Science, 2007, 10(21):3 865—3 869
- [ 22 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第 3 版. 北京:中国农业出版社,2000
- [ 23 ] 王玉江,吴涛,吴杰. 磷石膏改良盐碱地的研究进展. 安徽农业科学,2008,36(17):7 413—7 414