

不同施肥结构和酸调理剂对酸性菜园土的修复效应

谭姗姗, 张杨珠*, 李洁, 雷盼, 黄运湘, 廖超林, 盛浩

(湖南农业大学 资源环境学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 采用田间小区试验, 研究不同施肥结构和酸调理剂对由第四纪红土发育的酸性菜园土的酸性、有效养分以及作物产量的影响。结果表明: 不同施肥处理间的土壤碱解氮含量差异有统计学意义, 辣椒季、小白菜季均以化肥(NPK)处理(40d)最高, 辣椒季为(156.80±23.38) mg/kg, 小白菜季为(349.35±7.29) mg/kg; 有效磷含量辣椒季以化肥处理(60d)最高, 为(160.35±31.21) mg/kg, 小白菜季以化肥+氧化镁(NPK+MgO)处理的最高, 为(211.13±7.34) mg/kg; 速效钾含量以化肥+酸化调理剂 1 号(NPK+SR1)处理的最高, 辣椒季均值为(155.6±16.65) mg/kg, 小白菜季均值为(278.91±3.5) mg/kg; 不同施肥处理对土壤 pH、交换性酸(EA)和土壤酸碱缓冲容量(*pHBC*)影响明显, 以化肥+氧化钙(NPK+CaO)、化肥+氧化镁(NPK+MgO)处理能明显降低土壤交换性酸, 提高土壤 pH 和土壤酸碱缓冲容量(*pHBC*), 其 pH 均值分别提高了 1.23 和 1.7, 土壤 *pHBC* 值分别达 45.9 mmol/kg 和 49.0 mmol/kg, 其他处理的土壤 *pHBC* 值仅 30 mmol/kg 左右; 不同处理作物的产量差异有统计学意义, 其中辣椒季以化肥(NPK)处理的产量最高, 增产率为 226.9%, 小白菜季以化肥+氧化镁(NPK+MgO)处理的产量最高, 增产率为 58.7%, 施用 CaO、MgO 能有效降低酸性菜园土的酸性, 促进作物显著增产。

关键词: 酸化调理剂; 菜园土; 酸性土壤; 施肥结构; 辣椒; 小白菜

中图分类号: S147.3; S151.9*3

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2012)06-0662-07

Remediation effects of various fertilizations and acid soil conditioners on acid red soil for vegetable cultivation

TAN Shan-shan, ZHANG Yang-zhu*, LI Jie, LEI Pan, HUANG Yun-xiang, LIAO Chao-lin, SHENG Hao

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

Abstract: Through field experiment, the effects of several fertilizations and acid soil conditioners on the soil acidity, available nutrient status of the acid red soil developed from Quaternary red earth and on crop yields were investigated. The results showed that there was statistically significant difference in alkali-hydrolyzable N content among soils treated with different fertilizations. Treatments (40d) with chemical fertilizer (NPK) in pepper season and Chinese cabbage season both showed the highest alkali-hydrolyzable N content, which was (156.80±23.38) mg/kg and (349.35±7.29) mg/kg, respectively. In pepper season, available P content in treatment (60d) with NPK was the highest, which was (160.35±31.21) mg/kg; in Chinese cabbage season, available P content in treatment with NPK and magnesium oxide (NPK+ MgO) was the highest, which was (211.13±7.34) mg/kg. Treatment with NPK and acid soil conditioner one (NPK+SR1) showed the highest available K content, which was (155.6±16.65) mg/kg and (278.93±3.5) mg/kg on average, respectively for pepper season and Chinese cabbage season. The effects of different fertilization treatments on soil pH, exchangeable acid (EA) and acid-base buffering capacity (*pHBC*) varied significantly, of which treatment with NPK and calcium oxide (NPK+CaO) and treatment (NPK+MgO) both significantly decreased soil pH, EA and *pHBC*. The average pH was increased by 1.23 and 1.7 respectively, and the *pHBC* reached 45.9 mmol/kg and 49.0 mmol/kg respectively in treatment (NPK+CaO) and treatment (NPK+MgO), and *pHBC* in other treatment was

收稿日期: 2012-06-05

基金项目: 国家“十一·五”科技支撑计划(2008BADA7B02; 2009BAD6B005-5)

作者简介: 谭姗姗(1988—), 女, 湖南郴州人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力研究, 532400340@qq.com; *通信作者, zhangyangzhu2006

@163.com

about 30 mmol/kg. There was statistically significant difference in crop yield among different treatments, NPK treatment got the highest yield at pepper season, the yield increased by 226.9%, and treatment (NPK+MgO) got the highest yield at Chinese cabbage season, the yield increased by 58.7%. The above results indicate CaO and MgO could effectively decrease acidity in acid soil for vegetable cultivation and improve the yields of crops.

Key words: acid soil conditioner; soil for vegetable cultivation; acid soil; fertilization system; pepper; Chinese cabbage

土壤酸化会使土壤酸碱缓冲性降低, 土壤中 Ca、Mg 等营养元素大量淋失, 有毒重金属活化, 磷被固定, 从而导致作物减产^[1-5]。蔬菜作物需肥量大, 产量高, 复种指数高, 从土壤中携出的养分也大^[6]。菜农为了获得更大的经济效益, 追求蔬菜高产, 盲目施用化学氮肥和酸性磷肥, 导致菜园土不断酸化^[7-9]。红菜园土是中国南方蔬菜生产地区广泛分布的、酸性较严重的土壤。在湿热气候条件下, 酸性土壤中可形成对植物有毒害的 Al^{3+} , 其浓度较高时可抑制作物对土壤中营养元素的吸收利用, 从而严重危害农作物的生长及产量^[10]。现有关土壤改良剂的研究^[11-13]多围绕石灰、白云石、膨润土等开展, 也有少部分结合当地的实际情况, 利用各种有机肥或工业废弃物等进行酸性土壤的改良^[14-17], 但对土壤调理剂应用效果的研究报道较少。笔者以湖南长沙市郊酸性红菜园土为研究对象, 探究不同施肥结构及酸调理剂对土壤的酸性、有效养分以及作物产量的影响, 旨在为酸性红菜园

土的修复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试作物为辣椒品种湘研 15 号和小白菜品种湘潭矮脚白。供试土壤为位于浏阳河岸二级阶地的第四纪红土红壤开垦而来的红菜园土, 其基本理化性质见表 1。供试肥料: 氮肥为尿素(N 含量为 46%); 磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 含量为 15% 辣椒季)和钙镁磷肥(P_2O_5 含量为 12% ,小白菜季); 钾肥为氯化钾(K_2O 含量为 60%); 有机肥为菜枯饼肥(辣椒季菜枯 N 含量 3.83%、 P_2O_5 含量 4.18%、 K_2O 含量 6.43%, 小白菜季菜枯 N 含量 5.33%、 P_2O_5 含量 3.92%、 K_2O 含量 0.12%)。酸化调理剂 1 号是一种以木霉、腐殖质等为主要成分的生物-化学调理剂; 酸化调理剂 2 号是一种以 MgO、保水剂等为主要成分的化学调理剂。

表 1 供试土壤的基本理化性质

土层深度/ cm	pH	全 N/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全 P/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全 K/ ($g \cdot kg^{-1}$)	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	碱解 N/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	有效 P/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效 K/ ($mg \cdot kg^{-1}$)
0~20	4.48	1.6	1.8	11.9	16.7	83.8	51.3	83.8
>20~40	4.56	1.4	1.2	3.7	10.6	66.4	33.1	66.4

1.2 试验设计

试验于 2011 年春季在长沙市芙蓉区东岸乡东湖村一组连续进行。采用田间小区试验, 辣椒与小白菜轮作, 春夏季种植辣椒, 秋冬季种植小白菜, 辣椒和小白菜都是先育苗后移栽。设 7 个处理: CK, 不施肥; T_1 , 施化肥(NPK); T_2 , 施化肥和石灰(NPK+CaO); T_3 , 施化肥和氧化镁(NPK+MgO); T_4 , 施 60%化肥和 40%菜枯(NPK+OM); T_5 , 施化肥和酸化调理剂 1 号(NPK+SR1); T_6 , 施化肥和酸化调理剂 2 号(NPK+SR2)。随机区组排列, 3 次重复。小区面积为 4 m×6 m。

试验各处理 N、P、K 用量均一致。辣椒季试验施 N 180 kg/hm^2 , N、 P_2O_5 、 K_2O 的质量比为 1.5 1.0 1.5; 小白菜季试验施 N 300 kg/hm^2 , N、 P_2O_5 、 K_2O 的质量比为 1.0 0.5 0.8; 石灰和 MgO 每季均按 1500 kg/hm^2 施用, 土壤酸化调理剂均按 75 kg/hm^2 施用。氮肥和钾肥 60%用作基肥, 40%用作追肥, 土壤酸化调理剂、磷肥及其他肥料均作基肥一次性施用。其他栽培管理措施按当地常规方式进行。移栽后, 每隔 20 d 采集各处理动态土样用于测定, 小白菜成熟后一次性采集植株、辣椒成熟后采集辣椒果实(分 5 次采集)及植株(最后采集)用于分析测定。

1.3 测定项目与方法

土壤 pH 采用复合电极法测定；土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定；土壤有效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提法测定；土壤速效钾含量采用乙酸铵(1 mol/L)浸提-火焰光度法测定；有机质含量采用重铬酸钾法测定；土壤全氮采用半微量开氏蒸馏法测定；全磷采用 H₂SO₄-HClO₄ 消化钼锑抗比色法测定；全钾采用 NaOH 熔融-火焰光度法测定；植株全氮、全磷、全钾分别用半微量蒸馏法、钒钼黄比色法、火焰光度计法测定；交换性 H⁺、Al³⁺ 采用 KCl 淋洗-NaOH 滴定法^[18]测定；缓冲容量采用酸碱滴定法^[19-20]测定。

小白菜和辣椒样品采集后直接称重测定生物量和经济量。小白菜的生物量和经济量均为植株的产量；辣椒的产量为辣椒果实产量加地上植株产量。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 2003 和 DPS 7.5 软件进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤有效养分的影响

2.1.1 对土壤碱解氮含量的影响

由表 2 可知，辣椒季，T₁、T₂、T₃、T₄、T₆ 处理(移栽后 100 d 的除外)在各阶段的碱解氮含量与 CK 相比均有提高，T₅ 处理在移栽后 20、40 d，碱解氮含量高于对照，在移栽后 60、80、100 d 低于对照；各处理在 20~40 d 碱解氮含量急剧增加，以 T₁ 最高，为(156.80±23.38) mg/kg，但各处理间(T₅ 除外)差异无统计学意义。小白菜季，所有施肥处理的碱解氮含量显著或极显著高于 CK，且显著或极显著高于辣椒季。辣椒季、小白菜季均以 T₁(40 d)碱解氮含量最高，分别为(156.80±23.38)、(349.35±7.29) mg/kg，与对照相比增幅分别为 31.43%、143.65%，可见，T₁ 在农业生产中供氮效果最为稳定。

表 2 不同处理土壤的碱解氮含量

		Table 2 Alkali-hydrolyzable N content in soils treated with different fertilizations					mg/kg
供试作物	处理	碱解氮含量					
		移栽后 20 d	移栽后 40 d	移栽后 60 d	移栽后 80 d	移栽后 100 d	
辣椒	CK	(63.52±15)cB	(119.30±23.22)bA	(118.08±24.56)aA	(109.30±3.79)cdCD	(111.02±3.77)bcBCD	
	T ₁	(71.08±9.94)abcAB	(156.80±23.38)aA	(125.61±25.75)aA	(126.69±2.74)aA	(123.02±3.25)aA	
	T ₂	(66.57±13.23)bcAB	(145.46±15.82)abA	(123.87±5.23)aA	(114.44±3.11)bcBCD	(118.92±3.36)abABC	
	T ₃	(71.36±10.45)abcAB	(119.69±31.17)bA	(127.92±11.51)aA	(119.96±5.62)abABC	(121.90±4.12)aAB	
	T ₄	(77.37±2.89)abAB	(132.90±34.85)abA	(128.50±21.97)aA	(119.93±4.54)abABC	(118.95±4.59)abABC	
	T ₅	(80.78±13.1)aA	(151.01±23.93)aA	(114.03±29.51)aA	(105.55±5.3)dD	(107.91±6.17)cCD	
	T ₆	(73.96±7.13)abcAB	(136.63±21.6)abA	(129.66±9.24)aA	(122.57±7.55)abAB	(105.56±6.34)cD	
小白菜	CK	(130.93±7.22)fF	(143.38±3.29)gG	(126.83±3.03)fE	(143.46±12.84)dD	(106.11±5.01)fF	
	T ₁	(195.35±2.88)dD	(349.35±7.29)aA	(169.77±4.33)dC	(189.52±8.11)bB	(200.90±1.51)bcBC	
	T ₂	(176.67±3.16)eE	(237.69±3.64)eE	(182.19±7.5)bcB	(152.88±9.08)dCD	(153.59±3.39)dD	
	T ₃	(174.57±4.21)eE	(167.22±4.01)fF	(138.04±1.89)eD	(115.18±9.18)eE	(133.58±3.8)eE	
	T ₄	(324.87±6.31)aA	(274.54±3.93)cC	(175.47±3.46)cdBC	(171.16±13.23)cBC	(192.08±3.77)cC	
	T ₅	(243.09±9.63)bB	(257.45±2.05)dD	(259.22±2.84)aA	(263.16±9.13)aA	(247.33±4.65)aA	
	T ₆	(215.55±3.82)cC	(295.82±7.77)bB	(185.44±3.26)bB	(255.12±0.87)aA	(202.41±3.04)bb	

2.1.2 对土壤有效磷含量的影响

由表 3 可知，辣椒季，移栽后 20~80 d 各处理间有效磷含量差异无统计学意义；与 T₃ 相比，除 T₅(40 d)、T₁(60 d)略高，其他施肥处理含量略低。小白菜季移栽后 40 d 和 100 d 有效磷含量变化不

大。两季作物对比，小白菜季多数处理有效磷含量显著高于辣椒季。小白菜季有效磷含量以 T₃(80 d) 最高，为(211.13±7.34) mg/kg，说明在施磷总量相同的情况下，T₃ 对土壤有效磷的提高效果优于其他处理。

表 3 不同处理土壤的有效磷含量

供试作物	处理	有效磷含量				
		移栽后 20 d	移栽后 40 d	移栽后 60 d	移栽后 80 d	移栽后 100 d
辣椒	CK	(135.10±65.67)aA	(128.45±18.53)aA	(158.32±40.01)aA	(159.63±21.21)aA	(115.58±8.84)bC
	T ₁	(136.30±55.79)aA	(129.85±48.58)aA	(187.72±37.93)aA	(171.62±44.8)aA	(134.12±4.13)aAB
	T ₂	(124.82±38.15)aA	(128.10±14.32)aA	(155.52±28.19)aA	(162.76±19.74)aA	(133.70±2.97)aAB
	T ₃	(139.67±46.69)aA	(140.22±19.77)aA	(183.59±39.05)aA	(177.73±41.35)aA	(137.62±6.1)aA
	T ₄	(127.28±49.62)aA	(134.63±29.59)aA	(175.12±22.93)aA	(154.64±43.4)aA	(123.77±4.33)bBC
	T ₅	(137.20±39.12)aA	(140.99±43.22)aA	(166.52±46.49)aA	(149.89±51.72)aA	(122.35±3.93)bBC
	T ₆	(134.53±33.49)aA	(141.82±26.04)aA	(176.66±27.08)aA	(166.52±20.2)aA	(136.97±1.68)aA
小白菜	CK	(160.25±5.47)bA	(174.18±7.24)bcB	(166.13±9.97)bA	(170.87±15.47)cdBC	164.85±6.00
	T ₁	(159.42±8.81)bA	(183.81±12.47)abAB	(165.99±12.94)bA	(190.80±13.85)bAB	177.45±24.92
	T ₂	(157.77±10.84)bA	(197.21±9.88)aA	(193.50±8.29)aA	(162.12±8.14)dC	166.02±4.93
	T ₃	(177.47±10.95)aA	(183.12±4.44)abAB	(194.41±10.27)aA	(211.13±7.34)aA	179.37±15.93
	T ₄	(171.80±12.1)abA	(177.65±13.68)bcAB	(180.85±25.69)abA	(181.06±9.03)bcBC	176.82±14.20
	T ₅	(158.94±0.88)bA	(164.61±6.15)cB	(168.03±1.52)bA	(182.58±3.96)bcBC	164.69±7.27
	T ₆	(164.30±3.19)abA	(178.28±6.83)bcAB	(174.70±5.83)abA	(169.28±7.86)cdBC	161.54±1.92

2.1.3 对土壤速效钾含量的影响

由表 4 可知,两季作物各施肥处理的速效钾含量均显著或极显著高于 CK。辣椒季,移栽后 80 d, T₁、T₂、T₃、T₅、T₆ 处理土壤速效钾含量分别比 T₄ 增加了 67.19%、57.43%、66.77%、69.44%、32.05%, 且 T₁、T₂、T₃、T₅ 极显著高于 T₄。两季作物移栽后

40 d 时速效钾含量急剧增加,其中辣椒季以 T₁ 处理最高,为(215.16±60.92) mg/kg,小白菜季以 T₂ 处理最高,为(376.51±4.75) mg/kg;随后至 60d 时速效钾含量急剧降低,辣椒季与小白菜季均以 T₄ 处理最低,分别为(69.59±12.01)、(98.93±6.04) mg/kg。

表 4 不同处理土壤的速效钾含量

供试作物	处理	速效钾含量				
		移栽后 20 d	移栽后 40 d	移栽后 60 d	移栽后 80 d	移栽后 100 d
辣椒	CK	(84.29±15.29)cB	(97.63±35.2)cB	(71.28±6.94)dD	(81.45±7.39)cB	(92.83±5.27)fE
	T ₁	(138.76±37.99)aA	(215.16±60.92)aA	(138.92±23.73)bBC	(171.75±17.74)aA	(174.81±1.99)aA
	T ₂	(107.52±6.08)bcAB	(151.22±39.87)bAB	(116.09±19.89)cC	(161.73±24.12)aA	(130.07±1.98)eD
	T ₃	(103.58±17.55)bcAB	(151.38±42.38)bAB	(143.14±25.42)bBC	(171.33±32.67)aA	(168.12±1.99)baB
	T ₄	(126.44±36.04)abA	(131.16±56.16)bcB	(69.59±12.01)dD	(102.74±22.67)bcB	(87.23±3.45)fE
	T ₅	(126.77±36.13)abA	(161.7±56.3)abAB	(172.74±7.64)aA	(174.07±35.01)aA	(160.62±3.55)cB
	T ₆	(119.18±4.34)abAB	(142.55±43.18)bcB	(143.99±15.28)bbB	(135.66±18.56)abAB	(148.41±3.43)dC
小白菜	CK	(97.08±3.06)dD	(115.05±1.84)fF	(77.93±3.03)fF	(77.14±7.64)dD	(72.23±3.56)dD
	T ₁	(249.28±10.75)aA	(359.03±4.84)bbB	(225.1±9.73)dD	(258.08±13.68)bbB	(251.45±13.25)bbB
	T ₂	(223.48±9.34)bbB	(376.51±4.75)aA	(328.81±3.03)aA	(269.03±16.88)bbB	(275.02±21.85)bbB
	T ₃	(225.09±3.06)bbB	(338.43±4.82)cC	(296.61±7.61)bbB	(318.77±20.65)aA	(268.96±20.25)bbB
	T ₄	(187.7±7.69)cC	(193.28±7.27)eE	(98.93±6.04)eE	(131.08±7.6)cC	(123.99±8.05)cC
	T ₅	(222.4±1.78)bbB	(275.01±3.61)dD	(254.92±4.62)cC	(321.19±10.64)aA	(321.07±14.39)aA
	T ₆	(247.95±1.77)aA	(338.79±4.69)cC	(221.71±6.98)dD	(274.45±8)bbB	(272.38±16.06)bbB

2.2 不同施肥处理对土壤酸碱性的影响

2.2.1 对土壤 pH 的影响

由图 1 可以看出,不同作物均以 T₂、T₃ 处理改良土壤酸性的效果较明显,其中 T₃ 处理的改良效果又明显好于 T₂ 处理,且小白菜季的效果好于辣椒

季, T₃ 处理辣椒季和小白菜季土壤的 pH 均值较不施肥处理分别提高了 1.23 和 1.7, 其余各施肥处理对土壤酸性的改良效果不明显。T₅、T₆ 处理与 CK 土壤 pH 值差异不明显,说明土壤酸化调理剂在大田的改良效果还有待进一步研究。

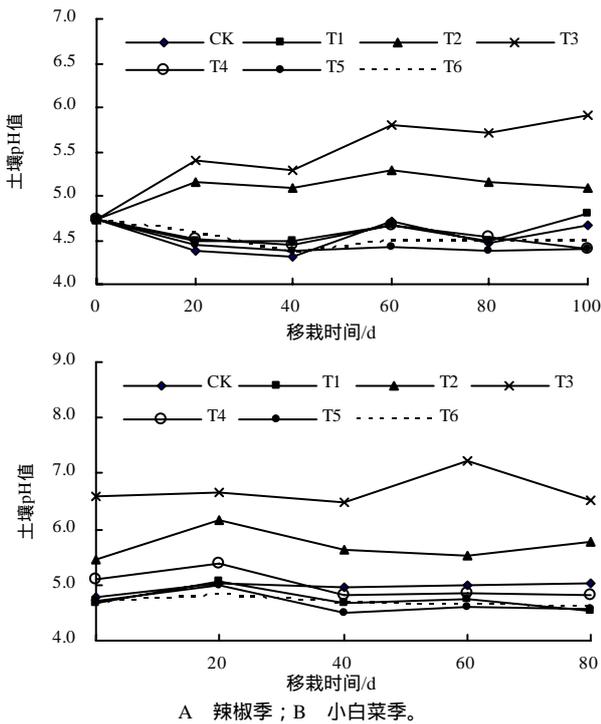


图 1 各处理土壤的 pH 值的变化规律

Fig.1 Changes of pH in soils treated with different fertilizations

2.2.2 对土壤交换性酸的影响

由表 5 可以看出,不同施肥处理对土壤交换性酸(EA)均有一定影响,其中交换性 H^+ 和 Al^{3+} 均随 EA 总量的变化而变化,但以交换性 Al^{3+} 变化迅速,交换性 H^+ 变化缓慢,也就是说,EA 总量的变化主要是由于交换性 Al^{3+} 变化所致。两季 T_4 处理土壤 EA 总量均高于 CK,说明 T_4 处理在一定程度上还加速了土壤酸

表 5 不同处理土壤的交换性酸

Table 5 EA in soils treated with different fertilizations cmol/kg				
供试作物	处理	交换性酸总量	交换性 H^+	交换性 Al^{3+}
辣椒	CK	2.441	0.468	1.973
	T ₁	1.281	0.376	0.905
	T ₂	1.424	0.437	0.986
	T ₃	2.166	0.336	1.831
	T ₄	3.204	0.315	2.888
	T ₅	3.254	0.336	2.919
	T ₆	2.593	0.336	2.258
小白菜	CK	2.624	0.366	2.258
	T ₁	2.573	0.468	2.105
	T ₂	0.061	0.010	0.051
	T ₃	0.061	0.010	0.051
	T ₄	2.865	0.468	2.397
	T ₅	2.259	0.386	1.872
	T ₆	2.197	0.366	1.831

化;在辣椒季 T_5 处理的土壤 EA 总量高于 CK 处理,说明 T_5 处理也有加速土壤酸化的趋势。小白菜季 T_2 、 T_3 处理土壤 EA 总量下降最明显,这说明施用石灰或氧化镁均可以有效减缓土壤的酸化。

2.2.3 土壤 pH 缓冲容量

由图 2 可以看出,辣椒季各处理土壤的酸碱滴定曲线非常一致,差异非常小,各曲线中间区域均有一较平缓的区域,在土壤 pH4.5~6.0(图 2A)区域,pH 缓冲容量较小,土壤容易因外源酸的加入而发生酸化现象^[21]。而小白菜季各处理土壤的酸碱滴定曲线差异明显增大, T_2 、 T_3 处理的土壤酸碱滴定曲线明显偏离其他处理,且其曲线斜率绝对值也明显大于其他各处理,这表明 T_2 、 T_3 处理不仅能够改良土壤酸性,而且还能增强土壤对外来酸的缓冲能力。

表 6 结果表明,小白菜季 T_2 、 T_3 处理的土壤酸碱缓冲容量(pHBC)值分别达 45.9、49.0 mmol/kg,而辣椒季、小白菜季其他各处理的土壤 pHBC 值仅 30 mmol/kg 左右。由此可见,在改良土壤酸性方面, T_2 、 T_3 处理的效果明显优于其他处理, T_3 处理又优于 T_2 处理。

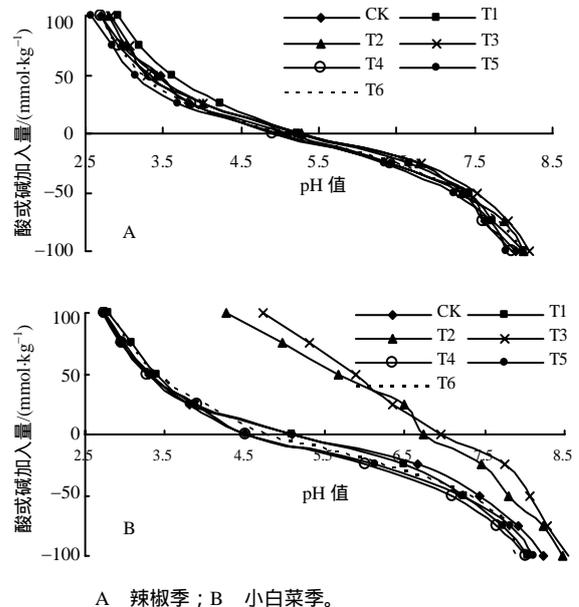


图 2 收获后各处理土壤的酸碱滴定曲线

Fig 2 Acid-base titration curves for soils treated with different fertilizations after harvest

表 6 不同施肥处理的土壤酸碱缓冲容量

Table 6 The acid-base buffer capacity of the soils treated with different fertilizations					mmol/kg
供试作物	不同处理	拟合方程	R^2	$pHBC/(mmol \cdot kg^{-1})$	
辣椒	基础土样	$y = -29.6x + 158.5$	0.95	29.6	
	CK	$y = -31.6x + 167.0$	0.96	31.6	
	T ₁	$y = -32.6x + 177.9$	0.97	32.6	
	T ₂	$y = -31.0x + 167.4$	0.96	31.0	
	T ₃	$y = -30.2x + 163.8$	0.95	30.2	
	T ₄	$y = -31.5x + 164.8$	0.96	31.5	
	T ₅	$y = -30.7x + 158.2$	0.96	30.7	
小白菜	T ₆	$y = -30.4x + 159.6$	0.96	30.4	
	CK	$y = -29.8x + 159.4$	0.96	29.8	
	T ₁	$y = -31.8x + 168.7$	0.96	31.8	
	T ₂	$y = -45.9x + 306.1$	0.98	45.9	
	T ₃	$y = -49.0x + 336.3$	0.98	49.0	
	T ₄	$y = -32.0x + 163.9$	0.96	32.0	
	T ₅	$y = -31.0x + 160.5$	0.95	31.0	
T ₆	$y = -32.1x + 168.2$	0.96	32.1		

y 示酸或碱的加入量； x 示 pH 值。

2.3 不同施肥处理对作物产量的影响

由表 7 可知, 无论辣椒, 还是小白菜, 各施肥处理都有较明显的增产效果, 且都以 T₂、T₃ 和 T₁ 处理的产量较高, T₄ 处理的产量较低, 与 CK 相比, 都达到了 5% 以上的显著差异水平。在氮、磷、钾养分施用量相同的条件下, T₄ 处理产量最低, 可能由于有机肥的养分大部分处于无效状态, 需经微生物的分解作用将其释放, 才能转化为有效养分, 供作物吸收利用, 但这一过程进行较慢; 因此, T₄ 处理的有机肥施用比例不能太高, 否则会造成作物生理

缺氮和缺磷。与 CK 相比, 辣椒季各施肥处理的增产率达 44.31%~281.79%; 小白菜季各施肥处理的增产率为 46.1%~58.7%。各施肥处理中以 T₁、T₂、T₃ 的产量比对照增产 6 291.67~8 006.94 kg/hm², 增幅达 46.13%~58.71%, 其中辣椒季 T₁ 处理产量最高, 增产率为 281.79%, 小白菜季以 T₃ 产量最高, 增产率为 58.71%。这表明, 施用 CaO、MgO 等碱性物质来改良酸性菜园土, 不仅能有效降低土壤的酸性, 还能进一步促进作物生长, 获得较好的增产效果。

表 7 不同施肥处理作物的产量(鲜重)

Table 7 The yields of crops with different fertilization treatments (fresh weight)				
供试作物	处理	平均产量/(kg·hm ⁻²)	比 CK 增产/(kg·hm ⁻²)	增产率/%
辣椒	CK	(396.32±181.49)cC		
	T ₁	(1 513.10±703.42)aA	1 116.78	281.79
	T ₂	(1 310.08±194.5)aAB	913.76	230.56
	T ₃	(1 355.98±435.65)aAB	959.66	242.14
	T ₄	(571.93±119.29)bcBC	175.61	44.31
	T ₅	(1 099.13±24.78)abABC	702.81	177.33
	T ₆	(1 166.20±437.25)abABC	769.88	194.26
小白菜	CK	(13 638.89±2 380.6)bA		
	T ₁	(19 930.56±2 655.68)aA	6 291.67	46.13
	T ₂	(20 111.11±3 221.72)aA	6 472.22	47.45
	T ₃	(21 645.83±3 108.08)aA	8 006.94	58.71
	T ₄	(16 631.94±4 074.52)abA	2 993.05	21.94
	T ₅	(19 069.44±1 561.85)abA	5 430.55	39.82
	T ₆	(18 187.50±5 469.18)abA	4 548.61	33.35

3 小结

不同施肥处理土壤碱解氮的含量与有效磷含量的变化规律相似, NPK+CaO、NPK+MgO 处理土壤碱解氮含量明显较低。NPK+MgO 处理有效磷含量一直保持在较高水平, 而 NPK+CaO 处理土壤有效磷含量则保持在较低水平, 甚至还低于 CK, 可能由于施入石灰后, 酸性土壤中 pH 急剧升高, 从而形成大量的氢氧化铝胶状沉淀, 与土壤中的可溶性磷酸盐反应形成难溶性磷酸铝盐聚合物^[22]所致。

不同施肥处理对土壤交换性酸的影响主要是降低了土壤交换性 Al^{3+} ^[23]。NPK+MgO 及 NPK+CaO 处理能降低土壤酸性, 提高土壤 pH 的效果最明显, 其中又以 NPK+MgO 处理最佳; 其余施肥处理对土壤酸性的改良效果不明显。NPK+SR1、NPK+SR2 处理与 CK 的 pH 值差异无统计学意义, 本试验采用的酸化调理剂对土壤酸性的改良效果不明显。

在 pH4.5~6.0 内土壤易因外源酸的加入发生酸化现象。在土壤酸性改良方面, 辣椒季不同处理对土壤的抗酸能力影响差异不大, 小白菜季 NPK+CaO、NPK+MgO 处理的土壤抗酸能力均明显优于其他施肥处理。

不同施肥处理都有增产效果, 其中, 辣椒季以 NPK 处理产量最高, 其次为 T₃; 小白菜季以 NPK+MgO 处理产量最高, 其次为 NPK+CaO 和 NPK+CaO 处理, 表明施用 CaO、MgO 等碱性物质在有效降低土壤酸性的同时, 还能获得较好的增产效果。

参考文献:

- [1] Ma J F, Ryan P R, Delhaize E. Aluminum tolerance in plants and the complexing role of organic acids[J]. Trends in Plant Science, 2001, 6: 273-278.
- [2] 王宁, 李九玉, 徐仁扣. 土壤酸化及酸性土壤的改良和管理[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(23): 48-51.
- [3] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 70-280.
- [4] 李平, 王兴祥. 几种低分子量有机酸淋溶对土壤 pH 和交换性铝的影响[J]. 土壤, 2005, 37(6): 669-673.
- [5] 郭天荣, 张国平, 卢玉印, 等. 铝胁迫对不同耐铝大麦基因型干物质积累和养分含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 324-330.
- [6] 李会合, 王正银. 不同施肥对酸性菜园土壤莴笋产量和叶片氮代谢的影响[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008, 30(11): 98-103.
- [7] 王仁山, 王义华, 隋好林, 等. 改良土壤时测土配肥过程中的重要环节—土壤酸碱度的改良[J]. 磷肥与复肥, 2006, 21(6): 68-70.
- [8] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(19): 1008-1010.
- [9] Stevens C J, Dise N B, Gowing D J. Regional trends in soil acidification and exchangeable metal concentrations in relation to acid deposition rates[J]. Ecosystems and Environment, 2006, 114: 239-248.
- [10] 戎秋涛, 杨春茂. 土壤酸化研究进展[J]. 地球科学发展, 1996, 11(4): 396-401.
- [11] 李春英, 刘添毅, 刘奕平, 等. 酸性植烟土壤施用石灰的后效探讨[J]. 烟草科技, 2001(7): 38-41.
- [12] 马友华. 膨润土在土壤改良和肥料生产上的研究和应用[J]. 矿产保护与利用, 1996(1): 26-29.
- [13] 朱宏斌, 王充青, 武际, 等. 酸性黄红壤上施用白云石的作物产量效应和经济效益评价[J]. 土壤肥料, 2003(5): 7-20.
- [14] 钟子楠. 不同秸秆改良酸土对大豆生理生化作用机制的影响[J]. 商业经济, 2010(7): 75-76.
- [15] 吕焕哲, 王凯荣, 谢小立, 等. 有机物料对酸性红壤铝毒的缓解效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 637-641.
- [16] 李九玉, 王宁, 徐仁扣. 工业副产品对红壤酸度改良的研究[J]. 土壤, 2009, 41(6): 932-939.
- [17] 张永春, 汪吉东, 沈明星, 等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 465-471.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 成杰民, 胡光鲁, 潘根兴. 用酸碱滴定曲线拟合参数表征土壤对酸缓冲能力的新方法[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 569-573.
- [20] 敖俊华, 黄振瑞, 江永, 等. 石灰施用对酸性土壤养分状况和甘蔗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 266-269.
- [21] 姜军, 徐仁扣, 赵安珍. 用酸碱滴定法测定酸性红壤的 pH 缓冲容量[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1247-1248.
- [22] 蔡东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(9): 206-213.
- [23] 杨甲华, 张杨珠. 不同种植模式下丘岗红壤的酸性和交换性能研究[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2012, 38(5): 526-529.

责任编辑: 罗 维

英文编辑: 罗 维