

不同土壤改良剂对酸性铝富集红壤毒性缓解效应的差异

王宇函 吕波 张林 姜存仓

华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心, 武汉 430070

摘要 在红壤中添加外源铝并种植作物, 研究不同土壤改良剂对酸性铝富集土壤的铝毒缓解效应差异及潜在机制。采用酸性红壤做盆栽试验, 添加外源铝, 并施用土壤改良剂腐殖酸(HA)、生物炭(C)和生石灰(CaO)种植小白菜, 设置 CK、HA(0.3% HA)、C(2% C)、CaO(0.3% CaO)、Al(1 mmol/kg Al³⁺)、Al+ HA(1 mmol/kg Al³⁺+0.3% HA)、Al+ C(1 mmol/kg Al³⁺+2% C)、Al+ CaO(1 mmol/kg Al³⁺+0.3% CaO)共 8 个处理, 分析腐殖酸、生物炭和生石灰对铝富集红壤不同形态活性铝及作物生长的影响。结果表明: 铝毒会显著降低小白菜的出苗率和鲜质量, 提高小白菜铝含量; 而施用改良剂能缓解铝毒对小白菜的抑制作用, 改善小白菜的生长状况, 降低小白菜铝含量, Al+ HA、Al+ C 和 Al+ CaO 处理小白菜鲜质量较 Al 处理分别增加 86%、775% 和 1 014%。添加外源 Al 较 CK 处理土壤 pH 降低 0.17 个单位, 活性铝总量显著增加, 而添加改良剂后活性铝总量减少。此外, Al 处理交换性 Al³⁺ 含量较 CK 处理上升 11.17%, Al+ HA、Al+ C 和 Al+ CaO 处理交换性 Al³⁺ 含量较 Al 处理分别下降 11.81%、59.63% 和 87.82%, 而单聚体羟基铝离子 Al(OH)²⁺ 和 Al(OH)₂⁺ 含量却上升。因此, 在土壤中加入外源铝显著降低土壤 pH, 加重酸化, 且交换性 Al³⁺ 增加, 抑制小白菜生长; 施用改良剂腐殖酸、生物炭和生石灰后交换性 Al³⁺ 含量降低, 小白菜生长状况得到改善, 其中生物炭和生石灰还能有效增加红壤 pH。因此, 改良剂通过对土壤 pH、养分含量和交换性 Al³⁺ 含量产生综合作用从而影响作物生长。

关键词 改良剂; 小白菜; 红壤; 活性铝; 铝毒缓解效应

中图分类号 S 156.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2019)02-0073-08

铝(Al)是地壳中分布最广、含量最高的金属元素^[1], 通常土壤中的铝以固定态形式存在, 对植物和环境没有毒害作用, 只有转化为离子态才对植物产生影响, 其中以 Al³⁺、Al(OH)₂⁺ 和 Al(OH)²⁺ 对植物根系影响最大^[2-3]。土壤酸化是促进土壤中固定态铝向离子态铝转化的重要因素之一, 由于肥料施用不规范, 加上酸雨的发生, 使土壤酸化和铝富集化现象加剧, 对植物的生长造成极大的危害。在土壤 pH 值为 5.0 或更低时, 毒害作用更强^[4-5]。我国酸性土壤面积达 203 万 km², 约占全国耕地总面积的 21%^[6], 土壤酸化和铝毒害已经成为该类土壤上限制作物生长的主要因子。因此, 探讨酸性富铝土壤的改良及其机制和效应日益迫切。土壤改良剂品种繁多, 生石灰是传统的酸性土壤改良剂, 可以提高土壤 pH 值, 降低土壤铝离子含量, 并且提供作物生长

所必需的钙离子^[7-8]。合理施用生石灰对作物产量的增加具有一定的效果。腐殖酸是一类由动植物残体经微生物分解和合成的高分子化合物^[9], 在土壤中施用腐殖酸可以明显改善土壤的理化性状, 增加土壤有机质含量^[10], 从而促进作物的生长^[11]。生物炭是由木材、作物秸秆等生物质在高温、缺氧条件下热裂解形成的稳定的富碳产物, 一般含有 60% 以上的 C 元素^[12-13]。由于生物炭中存在的碳酸盐和 -COO- 等有机官能团都能与土壤中的 H⁺ 相互作用, 从而直接或间接地降低土壤铝离子含量^[13-15]。张祥等^[16]研究发现在红壤中施用生物炭可以显著增加速效态 N、P、K 等养分的含量, Liu 等^[17]证明生物炭施用于酸性土壤时, 作物生产力提高了 30%。乔光等^[18]研究发现生物炭处理提高了玛瑙红樱桃土壤 pH 值和有机质含量。近年来土壤改良

收稿日期: 2018-04-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200803); 中央高校基本科研业务费专项(2017PY055)

王宇函, 硕士研究生, 研究方向: 植物营养与新型肥料, E-mail: wangyuhan@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 姜存仓, 博士, 教授, 研究方向: 农业资源与新型肥料, E-mail: jcc2000@mail.hzau.edu.cn

剂效果受到越来越广泛的关注,但是分析比较生物炭与腐殖酸、生石灰对铝富集红壤毒性的缓解效应以及对不同形态活性铝的调节作用较少。本试验通过在红壤中添加外源铝并种植小白菜,分析对比施用生石灰、腐殖酸和生物炭后不同形态活性铝及作物生长等变化,为农业生产上使用土壤改良剂缓解铝毒提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2017 年在华中农业大学盆栽场进行。供试土壤取自湖北省咸宁市,系典型酸性红壤,土壤经自然风干研磨过 2 mm 筛,混匀后备用。生石灰为西陇化工产品;腐殖酸的纯化提取根据 Billard 等^[19]的方法进行;生物炭为沈阳农业大学提供,以花生壳为原料在 400 °C 热解制备而成;供试作物为小白菜“速腾 5 号”快菜,长江流域 5—9 月均可种植。土壤及改良剂基本性质见表 1。

1.2 试验设计

采用土培盆栽试验,设置 CK、HA (0.3% HA)、C(2% C)、CaO(0.3% CaO)、Al(1 mmol/kg Al³⁺), Al+HA(1 mmol/kg Al³⁺+0.3% HA)、Al+C(1 mmol/kg Al³⁺+2% C)及 Al+CaO(1 mmol/kg Al³⁺+0.3% CaO)8 个处理,每处理 4 次重复。盆栽取 2 kg 风干土,添加外源铝(AlCl₃·6H₂O)溶液,风干后再次研磨混合均匀;称

取 NH₄NO₃ 0.57 g/kg, KH₂PO₄ 0.44 g/kg, KCl 0.14 g/kg, 加入 1 mL/L EDTA-Fe 和 1 mL/L Amon 营养液(1.78 mg/L MnCl₂·4H₂O; 0.074 9 mg/L CuSO₄·5H₂O; 0.230 mg/L ZnSO₄·7H₂O; 0.242 mg/L Na₂MoO₄·2H₂O), 最后添加改良剂与红壤混合均匀,放入塑料盆中。每盆浇水 600 mL 至土样完全湿润,于 6 月 22 日播种小白菜种子 20 粒,培养 40 d 于 8 月 3 日收获。

1.3 样品的采集与测定

1) 植物样品。调查小白菜的出苗率和株高。收获时称取小白菜单株鲜质量,每钵随机抽取样品测定膜透性以及脯氨酸含量等指标,然后所有样品在 105 °C 下杀青 30 min, 75 °C 烘干称质量磨细过筛保存。采用磺基水杨酸提取、茚三酮比色法测定脯氨酸含量,电导法测定细胞膜透性^[20]。采用孙建民等^[21]提出的羊毛铬花青 R 比色法测定植物活性铝含量。

2) 土壤样品。小白菜收获后,将不同处理的土样风干并分别过孔径 0.85 和 0.15 mm 筛,自封袋保存。根据文献^[22]的方法测定土壤指标。具体如下:pH 计法测定土壤 pH;重铬酸钾外加热法测有机质含量;碱解扩散法测碱解氮;醋酸铵提取、火焰分光光度计法测定速效钾;NH₄F-HCl 浸提,钼锑抗比色法测速效磷。采用庞叔薇等^[23]提出的浸提方法测定活性铝含量,每种浸提剂浸提的铝离子形态见表 2。

表 1 供试土壤及改良剂理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil and amendment

材料 Material	pH	碱解氮/(mg/kg) Available nitrogen	速效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium	有机质/(g/kg) Organic matter
原始土壤 Initial soil	4.80	17.70	2.30	110.9	7.40
生石灰 Lime(CaO)	12.60	/	/	/	/
腐殖酸 Humic acid (HA)	2.70	140.00	/	18 200	493.25
生物炭 Biochar (C)	8.01	102.38	274.74	4 280	477.62

表 2 不同浸提液对活性铝的浸出

Table 2 Leaching of active Al by different leaching liquor

浸提液(代码) Extract liquid (code)	溶出形态 Dissolution morphology	主要表达形态 Main morphological expression
1 mol/L KCl (I)	Al ³⁺	I = Al ³⁺
1 mol/L NH ₄ Ac (II)	Al ³⁺ , Al(OH) ₂ ⁺ , Al(OH) ₂ ²⁺	II - I = Al(OH) ₂ ⁺ , Al(OH) ₂ ²⁺
1 mol/L HCl (III)	Al(OH) ₃ ⁰ , Al ³⁺ , Al(OH) ₂ ⁺ , Al(OH) ₂ ²⁺	III - II = Al(OH) ₃ ⁰
0.5 mol/L NaOH (IV)	Al-HA, Al(OH) ₃ ⁰ , Al ³⁺ , Al(OH) ₂ ⁺ , Al(OH) ₂ ²⁺	IV - III = Al-HA

1.4 数据处理与分析

数据处理使用 Excel 软件,差异显著性分析采用统计分析软件 SAS 9.1.3,作图采用 Origin8.6 软件。

2 结果与分析

2.1 改良剂与外源铝对酸性土壤上小白菜生长的影响

由图 1 看出,从 CK 处理与腐殖酸、生物炭以及生石灰处理的小白菜长势对比看出,酸性土壤中加入改良剂可以促进小白菜的生长发育,以生石灰处理效果最好,C 处理效果次之,HA 处理效果较差。添加外源铝处理的小白菜长势比 CK 处理更差,因此,红壤中的铝毒会严重抑制小白菜的生长。对比 Al 与 Al+HA、Al+C 和 Al+CaO 的处理可以看出,加入改良剂的小白菜长势明显要好于 Al 处理,同时,Al+C 和 Al+CaO 的长势高于 CK 处理。因此,改良效果为 CaO>C>HA。说明 HA、C 和生石灰可以缓解酸性土壤铝毒害,改善小白菜的生长状况,且 C 和生石灰效果较好。

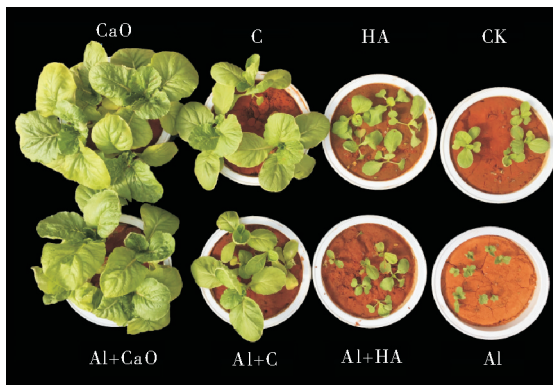


图 1 改良剂与外源铝对红壤上小白菜长势的影响

Fig.1 The effect of amendment and exogenous Al on growth of pakchoi

如表 3 所示,对照处理的小白菜出苗率为 47.50%,加入腐殖酸、生物炭和生石灰后小白菜出苗率分别增加 10.00%、26.25%和 38.75%;添加外源铝后出苗率降低了 28.95%,差异达到显著水平;而有外源铝情况下施用腐殖酸、生物炭和生石灰均可以提高小白菜出苗率,其中 Al+C 和 Al+CaO 处理的出苗率大于 CK 处理。此外,添加外源铝使小白菜的株高、鲜质量和干质量均显著降低,分别降低了 58.14%、83.33%和 80.00%,加入改良剂对小白菜的株高、鲜质量和干质量等农艺性状均有一定

的促进作用,其中 Al+HA、Al+C 和 Al+CaO 处理小白菜鲜质量较 Al 处理分别增加 86%、775%和 1 014%。结果表明,添加外源铝后小白菜生长受到抑制,与 CK 相比显著下降,铝处理下施用腐殖酸、生物炭和生石灰后,小白菜的农艺性状得到明显的改善。因此,腐殖酸、生物炭和生石灰可以促进铝富集红壤作物的生长。

表 3 改良剂与外源铝对红壤上小白菜农艺性状的影响

Table 3 The effect of anendment and exogenous Al on agronomic traits of pakchoi

处理 Treatment	出苗率/% Emergence rate	株高/cm Plant height	鲜质量/g Fresh weight	干质量/g Dry weight
CK	47.50d	1.29f	1.68e	0.15d
Al	33.75e	0.54g	0.28f	0.03e
HA	57.50c	2.98e	3.13d	0.31c
C	73.75b	8.39c	13.19b	1.29b
CaO	86.25a	12.87a	18.72a	1.64a
Al+HA	43.75d	1.23f	1.60e	0.15d
Al+C	60.00c	5.39d	8.43c	0.08ed
Al+CaO	76.25b	9.78b	14.32b	1.30b

注:同列不同小写字母表示差异达 5%显著水平,下同。Note: Different letters in the same column indicate significant differences at the 5% level, the same as below.

2.2 改良剂与外源铝对酸性土壤上小白菜膜透性和脯氨酸含量的影响

由图 2 可以看出,加入腐殖酸、生物炭和生石灰可以显著降低小白菜细胞膜透性,分别下降 11.27%、11.65%、12.72%。添加外源铝后膜透性上升 7.64%,在外源铝存在时施用改良剂后细胞膜透性显著降低且小于 CK 处理,但不同改良剂处理间无显著差异。逆境条件可造成植物体内脯氨酸的大量积累,从图 2 还可以看出,与对照相比,腐殖酸使脯氨酸含量增加 6.96%,生物炭和生石灰使植物体内脯氨酸含量分别下降 27.04%、34.11%。添加外源铝后小白菜体内脯氨酸含量显著增加,为 105.86%。较 Al 处理,加入改良剂后脯氨酸含量分别减少 28.31%、54.56%和 65.41%,各处理间差异均达到显著水平。说明施用改良剂可以改善小白菜生长环境,降低植物遭受逆境胁迫的程度。

2.3 改良剂与外源铝对酸性土壤上小白菜铝含量的影响

如图 3 所示,与 CK 处理相比,加入改良剂可以显著降低小白菜铝含量,腐殖酸、生物炭和生石灰处

理分别减少 16.06%、59.10% 和 62.05%。Al 处理小白菜铝含量显著上升,提高了 128.65%;而加入腐殖酸、生物炭和生石灰小白菜铝含量显著低于 Al

处理,分别降低了 40.16%、61.12%、78.47%,说明施用腐殖酸、生物炭和生石灰可以减少小白菜对土壤中铝离子的吸收,降低小白菜体内的铝含量。

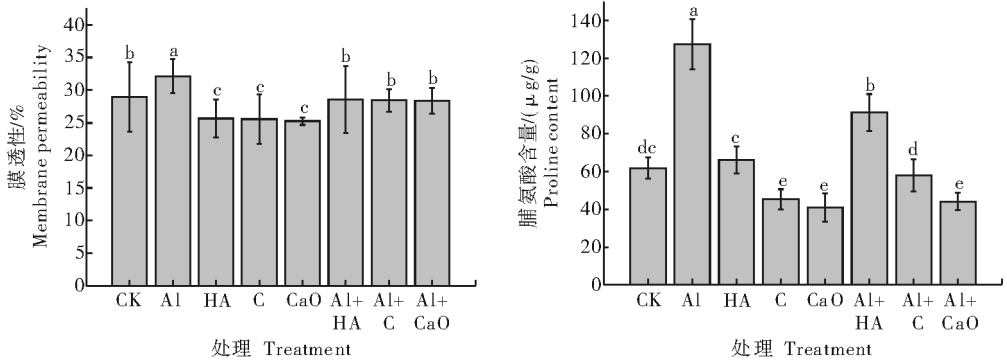


图 2 改良剂与外源铝对红壤上小白菜膜透性和脯氨酸含量的影响

Fig.2 The effect of amendment and exogenous Al on membrane permeability and proline content of pakchoi

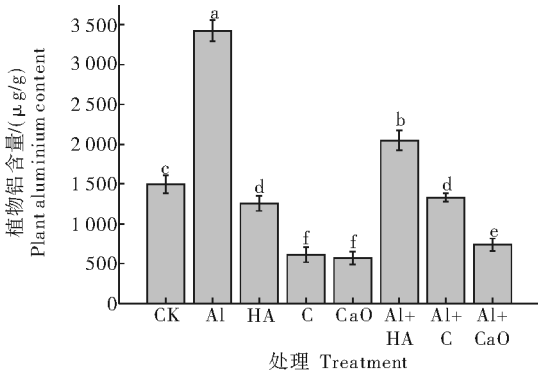


图 3 改良剂与外源铝对小白菜铝含量的影响

Fig.3 The effect of amendment and exogenous Al on Al content of pakchoi

2.4 改良剂与外源铝对酸性土壤理化性质的影响

如表 4 所示,与空白对照相比,Al 处理 pH 下

降 0.17 个单位,说明添加外源铝会使酸性红壤 pH 显著下降。HA 处理 pH 下降 0.11 个单位,C 和 CaO 处理分别增加 0.7 和 2.53 个单位;同时,铝富集下添加改良剂,Al+HA 处理 pH 降低 0.8 个单位,Al+C 和 Al+CaO 处理 pH 分别上升 0.17、2.53 个单位,说明腐殖酸不是通过改变土壤酸碱度来改善作物生长。较 CK 和 Al 处理,HA 与 Al+HA 处理土壤碱解氮、速效钾和有机质含量增加,C 与 Al+C 处理速效磷、速效钾和有机质含量上升,CaO 与 Al+CaO 处理的碱解氮、速效磷、速效钾含量均下降,3 种改良剂对土壤速效养分的增加量为生物炭>腐殖酸>生石灰。因此,改良剂和外源铝会对土壤 pH 以及碱解氮、速效磷、速效钾、有机碳含量产生综合作用而影响作物生长。

表 4 改良剂与外源铝对红壤理化性质的影响

Table 4 The physical and chemical properties of red soil under amendment and exogenous Al addition

处理 Treatment	pH	碱解氮/(mg/kg) Available nitrogen	速效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium	有机质/(g/kg) Organic matter
CK	4.05e	108.5b	17.12c	160.75d	10.89e
Al	3.88f	105.88b	14.56d	131.33e	10.53e
HA	3.94f	112.00a	14.27d	207.67c	22.47c
C	4.75c	90.10d	22.98a	251.00a	60.14a
CaO	6.58a	52.50f	10.91e	82.00a	11.97e
Al+HA	3.80g	114.19a	15.79dc	201.67c	19.55d
Al+C	4.25d	101.50c	20.40b	216.75b	43.89b
Al+CaO	6.43b	58.19e	9.82e	79.67f	10.86e

2.5 改良剂与外源铝对酸性土壤活性铝总含量的影响

由图 4 可知,CK 处理土壤活性铝总量为 3 392.63 $\mu\text{g/g}$,加入腐殖酸、生物炭和生石灰后显著下降,分别下降 10.38%、12.58%和 31.12%。Al 处理活性铝总量为 3 831.22 $\mu\text{g/g}$,与对照相比增加量(438.59 $\mu\text{g/g}$)远大于添加外源铝的量(27 $\mu\text{g/g}$),说明在酸性红壤中加入外源铝可以激发土壤本身铝的活性。此外,在铝富集土壤中添加改良剂腐殖酸、生物炭和生石灰后活性铝总量分别下降 4.11%、10.50%和 32.71%,且各处理间均达到显著水平。因此,腐殖酸、生物炭和生石灰可以显著降低红壤活性铝总量。

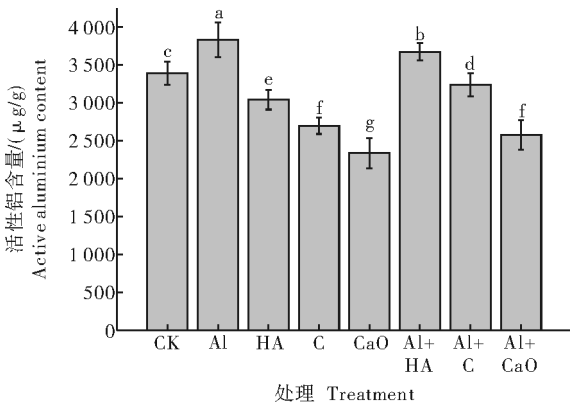


图 4 改良剂与外源铝对红壤活性铝总量的影响

Fig.4 The effect of amendment and exogenous Al on total active Al content of the red soil

2.6 改良剂与外源铝对酸性土壤不同形态活性铝含量及其比例的影响

Al^{3+} 是土壤中对植物毒害最大的活性铝形态之一,如表 5 所示,施用腐殖酸、生物炭和生石灰后红壤交换性 Al^{3+} 含量分别下降 2.37%、66.19%和 99.70%,其中生物炭和生石灰处理达到显著水平。添加外源铝后 Al^{3+} 、 $\text{Al}(\text{OH})_3^0$ 和 Al-HA 含量显著增加,交换性 Al^{3+} 含量上升 11.17%。在富铝条件下添加改良剂,交换性 Al^{3+} 和腐殖酸铝 Al-HA 含量降低,而单聚体羟基铝离子 $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ 以及胶体 $\text{Al}(\text{OH})_3^0$ 含量却有上升,其中交换性 Al^{3+} 含量分别下降 11.81%、59.63%和 87.82%。这说明改良剂与外源铝会使各形态活性铝之间发生转化,从而改变各形态活性铝的含量。

表 5 改良剂与外源铝对红壤不同形态活性铝含量的影响
Table 5 The effect of amendment and exogenous Al on the content of active Al in each form of the red soil $\mu\text{g/g}$

处理 Treatment	Al^{3+}	$\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ $\text{Al}(\text{OH})_2^+$	$\text{Al}(\text{OH})_3^0$	Al-HA
CK	338.27b	29.73e	1 626.71bc	1 425.44cb
Al	376.04a	5.36g	1 768.52a	1 881.50a
HA	330.25b	4.14g	1 655.09bc	903.69d
C	114.36d	48.61d	1 605.91c	875.16d
CaO	8.53f	123.66b	1 649.85bc	255.04f
Al+HA	331.63b	18.42f	1 748.85a	1 502.76b
Al+C	151.80c	67.09c	1 628.90bc	1 353.86c
Al+CaO	45.81e	167.15a	1 698.02ba	783.38e

交换性 Al^{3+} 是对生物毒害作用最大的铝离子,如图 5 所示,各处理 Al^{3+} 含量所占比例较低。与 CK 处理相比,施入改良剂影响 Al^{3+} 所占比例,其中腐殖酸处理 Al^{3+} 比例增大,C 处理和 CaO 处理 Al^{3+} 比例降低,但 Al^{3+} 含量均减少。与 Al 处理相比,在铝毒害土壤中加入改良剂均能降低土壤中 Al^{3+} 比例。添加外源铝腐殖酸铝 Al-HA 比例增加,施入腐殖酸、生物炭和生石灰后其比例降低。然而加入外源铝处理后胶体 $\text{Al}(\text{OH})_3^0$ 所占比例降低,施入改良剂后胶体 $\text{Al}(\text{OH})_3^0$ 所占比例增加。因此,腐殖酸、生物炭和生石灰对降低铝胁迫土壤中交换性 Al^{3+} 和腐殖酸铝 Al-HA 所占比例有一定积极影响。

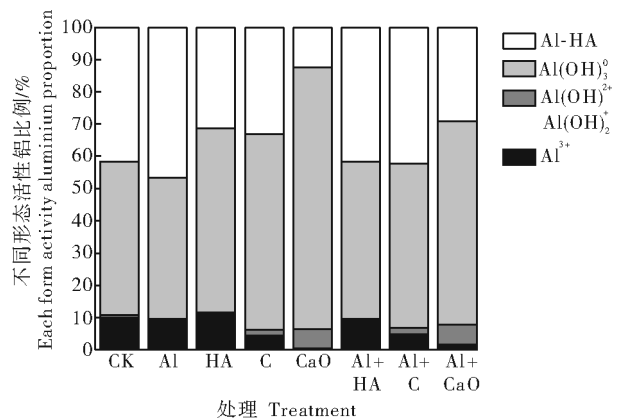


图 5 改良剂与外源铝对红壤各形态活性铝比例的影响

Fig.5 The effect of amendment and exogenous Al on the percentage of active Al of the red soil

3 讨论

3.1 不同改良剂对铝富集红壤上小白菜生长发育的影响

铝毒害是酸性土壤上限制作物生长的主要因子

之一,在铝胁迫下,植物体内的活性氧自由基的产生速度远超过其清除能力,使植物体细胞膜通透性改变以及光合能力受阻等,对植物体正常生长产生不利影响^[24]。李朝苏等^[25]研究发现,一定浓度铝溶液浸种处理可以增加荞麦种子的发芽指数和活力指数,浓度过高则会产生抑制作用。本试验结果表明,在酸性土壤中添加外源铝抑制作物的生长发育,使小白菜出苗率、株高以及干/鲜质量分别降低 28.95%、58.14%、83.33% 和 80.00%。在酸性红壤中添加腐殖酸、生物炭和生石灰后,植物的生长状况得到改善,与空白处理相比植物鲜质量分别增加了 86%、775% 和 1 014%,且植物体内铝含量分别减少 16.06%、59.10% 和 62.05%。同时,在铝富集红壤中施用腐殖酸、生物炭或生石灰后,小白菜的农艺性状得到明显的改善,植株铝含量明显降低。说明改良剂腐殖酸、生物炭和生石灰可以促进铝富集酸性红壤作物的生长,且其改良效果为生石灰 > 生物炭 > 腐殖酸。然而朱盼等^[26]在烟草上的试验表明生物炭改良效果大于生石灰,这可能是由于烟叶生长周期长于小白菜,生石灰在后期改良效果显著降低,或小白菜和烟草对生长环境要求不同等原因造成的。

植株细胞膜透性和脯氨酸含量可反映植物的生理状况,本试验在红壤中添加外源铝后小白菜膜透性和脯氨酸含量分别上升 7.64% 和 105.86%,与已有研究植株在逆境条件下细胞膜透性和脯氨酸含量均上升^[27-28]相符,在红壤和铝富集酸性土壤中施入生物炭和生石灰小白菜细胞膜透性和脯氨酸含量均下降,施入腐殖酸可降低膜透性。说明改良剂腐殖酸、生物炭和生石灰促进了酸性红壤上小白菜的生长,是由于改善了作物生理状况而缓解了胁迫作用。

3.2 不同改良剂对铝富集红壤理化性质的影响

本研究显示,施入外源 Al 后土壤 pH 显著降低,活性铝含量显著增加,活性铝含量从 3 392.63 $\mu\text{g/g}$ 增加到 3 831.22 $\mu\text{g/g}$,增加量 438.59 $\mu\text{g/g}$ 大于施加量 27 $\mu\text{g/g}$,说明添加外源 Al 可刺激红壤中固定态铝转化成活性铝,这与应介官等^[29]关于生物炭及外源 Al 对红壤活性铝含量的试验结果一致。已有研究表明,Al³⁺ 水解会导致土壤 pH 显著降低^[30],有效解释了加入外源铝土壤 pH 降低的原因。Sierra 等^[31]研究发现,土壤 pH > 5 时 Al³⁺ 含

量可忽略不计,当 pH 降低时,Al³⁺ 含量会持续增加,这可能是添加外源铝产生激发效应的原因之一。

本研究还表明,施入改良剂可以降低红壤活性铝含量,已有研究证明,改良剂通过改变土壤 pH 调节酸性土壤中活性铝含量,土壤 pH 增加使交换性 Al³⁺ 逐渐转化为羟基铝离子或形成氢氧化物沉淀从而降低铝毒害^[32]。由于改良剂的 pH 不同,改良效果也有很大差别,其中腐殖酸降低活性铝含量效果不显著,生物炭和生石灰显著降低活性铝含量,以生石灰效果最明显。然而并不是所有形态的活性铝含量均降低,交换性 Al³⁺ 和 HA-Al 含量降低,胶体 Al(OH)₃⁰ 和单聚体羟基铝离子 Al(OH)₂²⁺、Al(OH)₂⁺ 含量增加。因此,腐殖酸、生物炭和生石灰与外源铝会改变红壤中不同形态的活性铝含量。改良剂与外源铝对红壤养分含量也有很大的影响,有研究表明活性铝水解会使土壤 P、K、Ca、Mg 等养分含量减少^[33],这与本试验土壤添加外源铝后碱解氮、速效磷、速效钾和有机质含量下降的结果一致。施入的改良剂腐殖酸和生物炭含有丰富的有机碳,增加土壤中的有机质含量,且有机物中的某些官能团能与土壤中的 Al³⁺ 形成稳定的螯合物^[34],从而降低了土壤中铝胁迫对作物的危害。

综上,外源铝显著降低土壤 pH,加重红壤的酸化和铝富集现象。改良剂腐殖酸、生物炭和生石灰均可以降低土壤交换性 Al³⁺ 和腐殖酸铝 Al-HA 含量,改善小白菜的生长状况,而单聚体羟基铝离子 Al(OH)₂²⁺ 和 Al(OH)₂⁺ 含量及其所占比例上升。另外,腐殖酸、生物炭和生石灰对土壤速效养分和有机质含量也有一定影响。因此,腐殖酸、生物炭和生石灰等 3 种改良剂通过对土壤 pH、有机质、养分含量和交换性 Al³⁺ 含量等产生综合作用从而影响作物生长。

参 考 文 献

- [1] DELHAIZE E, RYAN P R. Aluminum toxicity and tolerance in plants[J]. Plant physiology, 1995, 107(2): 315-321.
- [2] 赵天龙, 解光宁, 张晓霞, 等. 酸性土壤上植物应对铝胁迫的过程与机制[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 3003-3011.
- [3] DRABEK O, BORUVKA L, MLADKOVA L, et al. Possible method of aluminium speciation in forest soils[J]. Journal of inorganic biochemistry, 2003, 97(1): 8-15.

- [4] 林郑和,陈荣冰.植物铝毒及其耐铝机制研究进展[J].中国农学通报,2009,25(13):94-98.
- [5] TANG C, ASSENG S, DIATLOFF E, et al. Modelling yield losses of aluminium-resistant and aluminium-sensitive wheat due to subsurface soil acidity: effects of rainfall, liming and nitrogen application[J]. Plant and soil, 2003, 254(2): 349-360.
- [6] 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.
- [7] CAIRES E F. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield [J]. European journal of agronomy, 2008, 28(1): 57-64.
- [8] HALING R E, SIMPSON R J, DELHAIZE E, et al. Effect of lime on root growth, morphology and the rhizosphere of cereal seedlings growing in an acid soil[J]. Plant and soil, 2010, 327(1/2): 199-212.
- [9] 梁尧,苑亚茹,韩晓增,等.化肥配施不同剂量有机肥对黑土团聚体中有机碳与腐殖酸分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1586-1594.
- [10] JANNIN L, ARKOUN M, OURREY A, et al. Microarray analysis of humic acid effects on *Brassica napus* growth: involvement of N, C and S metabolisms[J]. Plant & soil, 2012, 359(1/2): 297-319.
- [11] 王宇函,姜存仓,吕波,等.腐植酸钾对小白菜产量、生理特性及养分利用效率的影响[J].华中农业大学学报,2018,37(1):58-63.
- [12] KARAMI N, CLEMENTE R, MORENO-JIMNEZ E, et al. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass [J]. Journal of hazardous materials, 2011, 191(1/2/3): 41-48.
- [13] 张伟明,孟军,王嘉宇,等.生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J].作物学报,2013,39(8):1445-1451.
- [14] ZWIETEN L V, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant & soil, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [15] 陈温福,张伟明,孟军.农用生物炭研究进展与前景[J].中国农学科学,2013,46(16):3324-3333.
- [16] 张祥,王典,姜存仓,等.生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(8):979-984.
- [17] LIU X, ZHANG A, JI C, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data[J]. Plant & soil, 2013, 373(1/2): 583-594.
- [18] 乔光,洪怡,田田,等.生物炭对玛瑙红樱桃土壤微生物和养分的影响[J].华中农业大学学报,2017,36(3):51-56.
- [19] BILLARD V, ETIENNE P, JANNIN L, et al. Two biostimulants derived from algae or humic acid induce similar responses in the mineral content and gene expression of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Journal of plant growth regulation, 2014, 33(2): 305-316.
- [20] 池春玉,丁国华,连永权,等.低温胁迫对三种冷季型草坪草脯氨酸含量及膜透性的影响[J].中国农学通报,2007,23(1):101-104.
- [21] 孙建民,苑忠格,石志红,等.化学浸提法研究中药茯苓中活性铝的形态分布[J].分析科学学报,2008,24(1):111-113.
- [22] 鲍士旦.土壤农化分析.3版[M].北京:中国农业出版社,2000:27-80.
- [23] 庞叔薇,康德梦,王玉保,等.化学浸提法研究土壤中活性铝的溶出及形态分布[J].环境化学,1986,5(3):70-78.
- [24] QIAN L B, CHEN B L, CHEN M F. Novel alleviation mechanisms of aluminum phytotoxicity via released biosilicon from rice straw-derived biochars [J]. Scientific reports, 2016, 6: 29346. doi:10.1038/srep29346.
- [25] 李朝苏,刘鹏,徐根娣,等.铝浸种对荞麦种子萌发和幼苗生理的影响[J].生态学报,2006,26(6):2041-2047.
- [26] 朱盼,应介官,彭抒昂,等.生物炭和石灰对红壤理化性质及烟草苗期生长影响的差异[J].农业资源与环境学报,2015(6):590-595.
- [27] 熊洁,邹小云,陈伦林,等.油菜苗期耐铝基因型筛选和鉴定指标的研究[J].中国农业科学,2015,48(16):3112-3120.
- [28] 张俊环,黄卫东.葡萄幼苗在温度逆境交叉适应过程中活性氧及抗氧化酶的变化[J].园艺学报,2007,34(5):1073-1080.
- [29] 应介官,林庆毅,张梦阳,等.生物炭对铝富集酸性土壤的毒性缓解效应及潜在机制[J].中国农业科学,2016,49(23):4576-4583.
- [30] 张薇,黄建国,袁玲,等.外生菌根真菌对 Al(3+)胁迫和低钾土壤的响应[J].环境科学,2014,35(10):226-232.
- [31] SIERRA J, NOËL C, DUFOUR L, et al. Mineral nutrition and growth of tropical maize as affected by soil acidity[J]. Plant and soil, 2003, 252(2): 215-226.
- [32] QIAN L, CHEN B. Interactions of aluminum with biochars and oxidized biochars: implications for the biochar aging process[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2014, 62(2): 373-380.
- [33] QIAN L, CHEN B. Dual role of biochars as adsorbents for aluminum: the effects of oxygen-containing organic components and the scattering of silicate particles[J]. Environmental science and technology, 2013, 47(15): 8759-8768.
- [34] GAUME A, MÄCHLER F, FROSSARD E. Aluminum resistance in two cultivars of *Zea mays* L.: root exudation of organic acids and influence of phosphorus nutrition [J]. Plant and soil, 2001, 234(1): 73-81.

Differences in toxicity mitigation effects of different anendments on acidic aluminum-enriched red soil

WANG Yuhan LYU Bo ZHANG Lin JIANG Cuncang

College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Aluminum toxicity is one of the main factors limiting the growth of crops in southern acid soils. In this experiment, the differences and potential mechanisms of aluminum toxicity alleviation effects of different modifiers on acid-aluminum enriched soils were studied by adding exogenous aluminum and planting crops in red soil. Pot experiment with acid red soil, adding exogenous aluminum, and applying anendment humic acid (HA), biochar (C) and quicklime (CaO), planting pakchoi, setting 8 treatments including CK, HA (0.3% HA), C (2% C), CaO (0.3% CaO), Al (1 mmol/kg Al³⁺), Al+HA (1 mmol/kg Al³⁺+0.3% HA), Al+C (1 mmol/kg Al³⁺+2% C), Al+CaO (1 mmol/kg Al³⁺+0.3% CaO) was conducted to analyze the effects of humic acid, biochar and quicklime on different forms of active aluminum and crop growth in aluminum-rich red soil. The results showed that aluminum toxicity significantly decreased the emergence rate and fresh weight of pakchoi, and increase the aluminum content in pakchoi. The growth of pakchoi improved and the Al content reduced under amendment addition. Compared with Al treatment, the fresh weight of Al+HA, Al+C, Al+CaO treated pakchoi reduced by 86%, 775% and 1 014%, respectively. The pH of Al treatment decreased by 0.17 compared with CK treatment, the content of active aluminum significant increased, the amount of active aluminum decreased after added the amendment. The exchangeable Al³⁺ of Al treatment increased by 11.17% compared with CK treatment, but the exchangeable Al³⁺ of Al+HA, Al+C and Al+CaO treatment decreased by 11.81%, 59.63% and 87.82% compared with Al treatment. The content of dimer hydroxyl aluminum ion Al(OH)₂²⁺, Al(OH)₂⁺ increased. The exogenous aluminum significantly reduced soil pH. The content of exchangeable Al³⁺ increased, inhibiting the growth of pakchoi. Humic acid, biochar and calcareousness reduced the exchangeable Al³⁺ content. Biochar and calcareousness effectively reduced the pH of red soil and improved the growth of pakchoi. It is indicated that anendment affects crop growth by combining soil pH, nutrient content and exchangeable Al³⁺ content.

Keywords anendment; pakchoi; red soil; active aluminum; aluminum toxicity alleviation effects

(责任编辑:张志钰)