

朱舒亮,刘胜亮,李静,等.不同有机酸对含钾矿物释钾作用的影响[J].江苏农业科学,2018,46(12):241-244.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.12.058

不同有机酸对含钾矿物释钾作用的影响

朱舒亮^{1,2,3},刘胜亮^{1,2,3},李静^{1,3},杨越^{1,3},杨文英^{1,3},李建贵^{1,2,3}

(1.新疆农业大学林业研究所,新疆乌鲁木齐 830052; 2.新疆红枣工程技术研究中心,新疆乌鲁木齐 830052;

3.新疆农业大学“2612”教学科研创新团队,新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:为了研究不同有机酸对含钾矿物释钾作用的影响,采用振荡平衡培养法在施加含钾矿物的前提下,测定10种有机酸浓度分别为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg/L时对含钾矿物的解钾量,选取其中效果较好的5种有机酸进行正交试验,筛选最优浓度组合。可溶性钾含量采用火焰分光光度法测定,并用SPSS对数据进行整合比较分析。结果表明,10种有机酸振荡培养144 h后,其中大部分有机酸在0.3、0.4、0.5 mg/L时达到最佳解钾效果,但乙酸、乳酸在0.2 mg/L时解钾能力最强,表现出可溶性钾含量并不完全是随着浓度的增高而提升,不同有机酸都有其最适浓度,若过量可能会产生一定的抑制作用。由正交试验结果可知,释钾能力表现为草酸>柠檬酸>酒石酸>丙酮酸>乙酸,处理11的混合酸组合解钾效果最优,即0.10 mg/L草酸、0.10 mg/L酒石酸、0.05 mg/L乙酸、0.15 mg/L柠檬酸。

关键词:含钾矿物;有机酸;振荡平衡培养法;钾素释放;解钾效果;作用机制

中图分类号: S153 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)12-0241-04

钾是农作物生长所必需的3种基本营养元素之一^[1],钾在地壳中的克拉克值为2.59%^[2],除人为施肥影响外,土壤中的钾大部分来自含钾矿物,土壤中钾矿物主要以稳定的铝硅酸盐状态存在,不能被作物直接吸收利用。因此,研究如何使矿物中可溶性钾可以更好地释放出来,成为农田作物能吸收利用的可给态钾,有着十分重要的意义^[3]。原苏联学者亚历山大罗夫从土壤中分离到硅酸盐细菌并测定其解钾强度,培养5 d后,释放出来的钾为原硅酸盐中含量的15.9%^[4]。李元芳认为硅酸盐细菌能分解长石、云母等铝硅酸盐类的原生矿物,使土壤中难溶性的钾、磷、硅等元素转变为可溶态,可

供植物吸收利用^[5]。

依据钾对作物的有效性,速效钾含量是表述土壤供钾情况的重要指标之一^[6-7]。在植物生长发育过程中,钾元素被大量加工成钾肥应用到农业生产中。但由于化肥施肥比例不合理,导致我国土壤普遍缺钾,而土壤缺钾已成为限制作物产量和品质提高的重要因素^[8]。土壤中的钾存在可给态与不可给态,不可给态钾由于溶解性很低,无法满足一般作物的生长需要,在遗传学上称这种土壤钾素为“遗传学缺乏”^[9]。因此,研究怎样提高钾素利用率已成为国内外许多土壤学家及植物营养学家广泛关注的热点,而这也是世界农业可持续发展的研究要点。植物在生长过程中,根系向根际土壤分泌大量物质,对土壤矿质元素转化具有重要作用。有研究表明,不同植物类型或品种的根系分泌物对富钾矿石以及土壤缓效钾活化力存在显著的差异^[10-12],植物根系分泌物的主要物质是有机酸类,且根系分泌物活化土壤钾素效果明显^[13-15]。土壤中有有机酸是有机质分解过程的中间产物和植物代谢产物,其对于提高钾的有效性具有一定的促进作用^[16-17]。本试验以钾长石培养基为研究对象,通过加入不同组合有机酸,进行室内摇瓶试验培养,探讨不同种类、不同浓度有机酸释放含钾矿物中可溶性钾含量的影响,以期明确有机酸的作用机制及溶解含钾矿物提高解钾率提供科学依据。

收稿日期:2016-12-22

基金项目:国家自然科学基金(编号:31360194);国家林业公益性项目重大专项(编号:201304701);中央财政林业科技推广示范资金(编号:ZY2YKJTG2015010);新疆维吾尔自治区科技计划(编号:201431106)。

作者简介:朱舒亮(1989—),男,陕西西安人,硕士,主要从事微生物生理生态。E-mail:414340833@qq.com。

通信作者:李建贵,博士,教授,博士生导师,主要从事植物生理生态、林业经济研究。Tel:(0991)8763889;E-mail:lijiangui1971@163.com。

匹配分类[J].测绘科学技术学报,2009,26(2):128-131.

[14]孔祥兵,舒宁,陶建斌,等.一种基于多特征融合的新型光谱相似性测度[J].光谱学与光谱分析,2011,31(8):2166-2170.

[15]魏祥坡,余旭初,付琼莹,等.光谱角余弦与相关系数测度组合的光谱匹配分类方法与实验[J].地理与地理信息科学,2016,32(3):29-33.

[16]Du Y Z, Chang C, Ren H, et al. New hyperspectral discrimination measure for spectral characterization[J]. Optical Engineering, 2004, 43(8):1777-1786.

[17]Kumar M N, Seshasai M R, Prasad K V, et al. A new hybrid spectral

similarity measure for discrimination among *Vigna* species [J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(14):4041-4053.

[18]吴浩,徐元进,高冉.基于光谱相关角和光谱信息散度的高光谱蚀变信息提取[J].地理与地理信息科学,2016,32(1):44-48.

[19]朱院院,高教波,高泽东,等.基于相似性分类的高光谱主成分融合方法比较[J].光学技术,2016,42(2):97-102.

[20]焦洪赞,王少宇,彭正洪.基于条件随机场的光谱相似性匹配高光谱遥感影像聚类方法[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(6):937-943,948.

1 材料与方 法

1.1 供试有机酸

供试的草酸、酒石酸、丙酮酸、苹果酸、 α -戊二酸、乳酸、乙酸、柠檬酸、富马酸、丙酸等 10 种有机酸,均由新疆红枣工程技术研究中心提供。所有试剂均为分析纯,试验用水为蒸馏水。

1.2 培养基

钾长石培养基:蔗糖 10.0 g,碳酸钙 1.0 g,酵母膏 0.5 g,钾长石粉 1.0 g,硫酸铵 1.0 g,磷酸氢二钠 2.0 g,硫酸镁 0.5 g,蒸馏水 1 000 mL,pH 值为 7.0~7.5。

1.3 试验设计

1.3.1 不同种类不同浓度有机酸对含钾矿物的释钾作用 向 250 mL 三角瓶中加入 50 mL 钾长石培养基,在高温灭菌锅(1.0 \times 10⁵ Pa)中灭菌 30 min,冷却至室温静置 24 h。在超净工作台中,于无菌条件下分别向装有钾长石培养基的三角瓶中加入不同浓度的草酸,使培养基中的草酸浓度分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg/L。同时将酒石酸、丙酮酸、苹果酸、 α -戊二酸、乳酸、乙酸、柠檬酸、富马酸、丙酸,按照上述对草酸的处理方法加入盛有培养基的三角瓶中,同时设置未加有机酸的对照处理(CK),每个处理 3 次重复。在 180 r/min、30 $^{\circ}$ C 摇床培养 144 h。

1.3.2 速效钾的测定 取 5 mL 培养液,在 4 $^{\circ}$ C、5 000 r/min 条件下离心 15 min,取上清液,加入 2.5 mL 浓硫酸与 1 mL 过氧化氢溶液在消煮炉中消煮,待消煮液完全透明后,使用火焰光度计测定其中可溶性钾的含量,重复 3 次。

1.3.3 正交试验 经过不同种类、不同浓度有机酸对含钾矿物释钾作用的试验,筛选出解钾能力较强的 5 种有机酸(草酸、酒石酸、丙酮酸、乙酸、柠檬酸)进行正交试验,选取 4 个浓度水平,采用 L₁₆(4⁵)正交表进行正交试验,通过火焰分光光度法测定不同处理培养液中的可溶性钾含量,对有机酸溶解钾长石作用进行深入比较研究。

1.4 数据分析

试验数据使用 Excel 2003 进行整理,采用 SPSS 19.0 对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度有机酸对矿物钾释放的影响

由图 1 可知,与 CK 相比,草酸释放钾长石培养基中的可溶性钾含量(以下简称“解钾量”)增加 1.48~12.67 mg/kg,酒石酸的解钾量增加 5.38~12.58 mg/kg,丙酮酸的解钾量增加 3.75~19.98 mg/kg,苹果酸的解钾量增加 1.79~9.28 mg/kg, α -戊二酸的解钾量增加 1.31~6.88 mg/kg,乳酸的解钾量增加 1.77~5.39 mg/kg,乙酸的解钾量增加 1.48~13.67 mg/kg,柠檬酸的解钾量增加 5.07~12.88 mg/kg,富马酸的解钾量增加 4.18~9.39 mg/kg,丙酸的解钾量增加 3.18~6.39 mg/kg。比较 10 种有机酸不同浓度的解钾量,在有机酸浓度为 0.1 mg/L 时,该处理组可溶性钾含量与其他浓度处理组相比,钾含量相对较低,其中乙酸处理的可溶性钾含量最高,各处理的可溶性钾含量表现为乙酸>柠檬酸>酒石酸> α -戊二酸>丙酸>富马酸>丙酮酸>苹果酸>乳酸>草酸。当有机酸浓度为 0.2 mg/L 时,乙酸处理的可溶性钾含量最高,其他种类酸的解钾量也有微量提升,各处理的可溶性钾含量表现为乙酸>柠檬酸>酒石酸>丙酮酸>富马酸>乳酸>丙酸>草酸>苹果酸> α -戊二酸。当有机酸浓度为 0.3 mg/L 时,各酸处理的可溶性钾含量差异明显,其中丙酮酸处理的可溶性钾含量变化最明显,含量最高,各处理可溶性钾含量表现为丙酮酸>柠檬酸>酒石酸>苹果酸>草酸>富马酸>丙酸>乙酸>乳酸> α -戊二酸。当有机酸浓度为 0.4 mg/L 时,草酸、酒石酸、丙酮酸处理的可溶性钾含量接近,无明显差异,各处理的可溶性钾含量表现为丙酮酸>草酸>酒石酸>富马酸>柠檬酸>乙酸> α -戊二酸>苹果酸>丙酸>乳酸。当有机酸浓度为 0.5 mg/L 时,一部分有机酸的解钾量呈降低趋势,各处理可溶性钾含量表现为丙酮酸>草酸>酒石酸> α -戊二酸>富马酸>柠檬酸>丙酸>乳酸>苹果酸>乙酸。

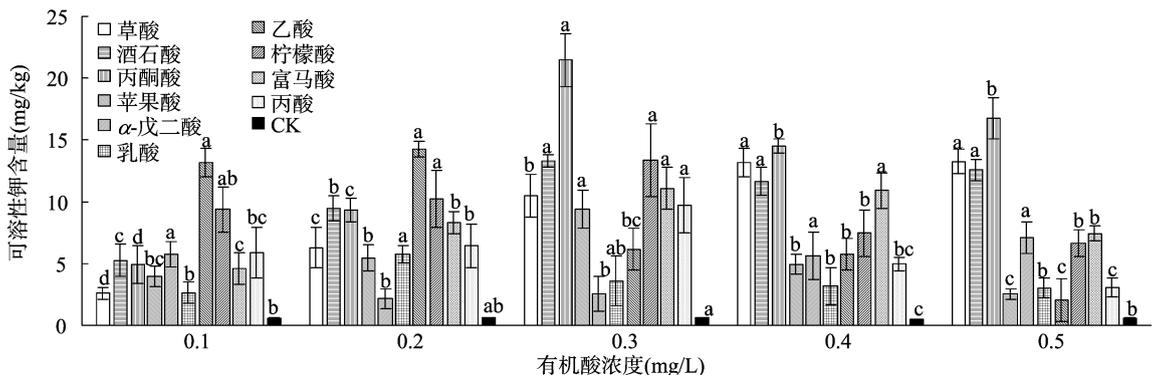


图1 不同浓度有机酸对含钾矿物的解钾量

通过对 10 种有机酸对含钾矿物释放可溶性钾含量与有机酸浓度之间的相关性进行分析,由表 1 可知,草酸、酒石酸、丙酮酸的解钾效果与浓度呈极显著正相关($P < 0.01$),这说明草酸在浓度表达上体现出随着浓度的递增,解钾的效果和能力相应提高。但酒石酸与丙酮酸随着浓度的提高,在 0.3、0.4 mg/L 时到达解钾能力顶峰后,出现解钾能力下降的现

象。说明并不是所有的有机酸的解钾能力均随着浓度的递增而提高,不同有机酸的解钾能力都会有一个最适浓度。乙酸的解钾效果与浓度呈极显著负相关($P < 0.01$),说明部分有机酸会呈现出在低浓度时有着较高的解钾效果。苹果酸、乳酸、柠檬酸、丙酸的解钾效果与浓度的相关系数为负值, α -戊二酸、富马酸的解钾效果与浓度的相关系数为正值,但

这几种酸与浓度的相关性较弱,反映出其解钾效果受浓度的影响较弱。

表1 不同种类有机酸解钾效果与浓度的相关系数

有机酸	解钾效果与浓度的相关系数
草酸	0.926 **
酒石酸	0.789 **
丙酮酸	0.693 **
苹果酸	-0.195
α-戊二酸	0.428
乳酸	-0.169
乙酸	-0.864 **
柠檬酸	-0.475
富马酸	0.453
丙酸	-0.391

注:“*”“**”分别表示在0.05、0.01水平上显著相关。

2.2 不同种类有机酸对矿物钾释放的影响

由图1可知,有机酸种类不同会对矿物中钾的释放产生强弱不一的效果,经过培养对钾长石释钾均有一定的促进作用,可有效促进钾的释放。经过持续培养144 h,其中草酸对含钾矿物释钾的作用处于较高水平,其解钾能力随着浓度增高而提升,在0.4、0.5 mg/L浓度时,解钾效果差异性不明显,并都处于草酸解钾效果最高水平。酒石酸对钾长石粉的释钾能力也和草酸基本持平,但酒石酸的解钾效果是在浓度为0.3 mg/L时达到最高水平,随后在0.4、0.5 mg/L时呈现出小幅度变幅。丙酮酸表现出的解钾量,解钾能力在这10种有机酸中效果最好、作用最大,其在浓度作用变化上与酒石酸相似,也是在浓度为0.3 mg/L时解钾效果最好,此时可溶性钾含量达20.56 mg/kg。苹果酸、乳酸与前几种有机酸相比解钾量较低,前期呈现出随浓度增高解钾能力提高的趋势,在浓度为0.4、0.5 mg/L时,其解钾量均降低,甚至出现高浓度时的解钾量低于低浓度时的解钾量的情况,其中乳酸的解钾量在10种有机酸中最低。α-戊二酸在解钾能力上表现不稳定,差异性较大,从解钾量与浓度上不能直观地看出其相关性。乙酸在解钾能力上表现较好,在浓度为0.1 mg/L时就表现出较高的解钾能力,并在浓度为0.2 mg/L时增高,但在0.3、0.4、0.5 mg/L时解钾量要低于草酸、酒石酸、丙酮酸等3种解钾能力较强的有机酸。柠檬酸在各浓度的解钾能力均较强,其解钾能力与浓度的相关性与丙酮酸、苹果酸相似,均是先随着浓度的升高解钾效果提升,在浓度为0.3 mg/L时最高,随后浓度增高解钾效果降低。富马酸与丙酸的解钾能力相比而言处于中下水平,其中富马酸在0.4 mg/L时解钾量最高,丙酸在0.3 mg/L时解钾量最高。

统计结果表明,不同浓度的有机酸在释放矿物钾方面作用大、效率高,甚至在低浓度下作用也很明显。10种有机酸中,在不同浓度下有着不同程度的解钾效果,其中草酸、酒石酸、丙酮酸、乙酸、柠檬酸的解钾效果较为明显,其处理的可溶性钾含量较高。因此,选择草酸、酒石酸、丙酮酸、乙酸、柠檬酸等5种有机酸进行后续的正交试验。

2.3 正交试验法研究5种有机酸释放含钾矿物中可溶性钾的能力

通过对10种不同种类浓度有机酸解钾能力的测定,分析试验数据结果,其中草酸、酒石酸、丙酮酸、乙酸、柠檬酸等5

种有机酸具有较强的解钾能力,因此选择这5种有机酸进行正交试验。正交试验选择浓度为0、0.05、0.10、0.15 mg/L等4个试验水平。采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表(表2)进行正交试验,以测定不同有机酸的解钾最优种类浓度组合,分析解钾能力强弱关系。

表2 正交试验的因素与水平

水平	因素				
	草酸 (mg/L)	酒石酸 (mg/L)	丙酮酸 (mg/L)	乙酸 (mg/L)	柠檬酸 (mg/L)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
3	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
4	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

由表3可知,草酸、酒石酸解钾长石的能力在浓度为0.10 mg/L时效果最好,丙酮酸、乙酸解钾长石的能力在浓度为0.05 mg/L时效果最好,柠檬酸在浓度为0.05 mg/L时效果最好。分析极差的结果来看,草酸的解钾效果最好,乙酸的解钾效果最差。通过对极差的比较,发现5种有机酸对钾长石中钾离子的释放效果表现为草酸>柠檬酸>酒石酸>丙酮酸>乙酸。其中处理11的混合酸组合表现出的解钾效果最优,即0.10 mg/L草酸、0.10 mg/L酒石酸、0.05 mg/L乙酸、0.15 mg/L柠檬酸。

表3 正交试验结果分析

试验号	草酸	酒石酸	丙酮酸	乙酸	柠檬酸	速效钾含量 (mg/kg)
1	1	1	1	1	1	0.57
2	1	2	2	2	2	5.26
3	1	3	3	3	3	8.24
4	1	4	4	4	4	12.22
5	2	1	2	3	4	3.27
6	2	2	1	4	3	7.74
7	2	3	4	1	2	19.19
8	2	4	3	2	1	5.26
9	3	1	3	4	2	15.20
10	3	2	4	3	1	10.23
11	3	3	1	2	4	19.69
12	3	4	2	1	3	15.21
13	4	1	4	2	3	13.22
14	4	2	3	1	4	7.74
15	4	3	2	4	1	12.22
16	4	4	1	3	2	18.20
k_1	6.57	8.07	11.55	10.68	7.07	
k_2	8.87	7.74	8.99	10.86	14.46	
k_3	15.08	14.84	9.11	9.99	11.10	
k_4	12.85	12.72	13.72	11.85	10.73	
R	8.51	7.10	4.73	1.86	7.39	

3 结论与讨论

鉴于我国土壤普遍缺钾,而且钾肥短缺的情况,含钾矿物中钾素释放的研究对高效利用我国钾素资源在一定程度上缓解钾素缺乏具有重要意义。本研究以含钾矿物为材料,采用恒温振荡培养法研究了有机酸作用下含钾矿物释钾的规律与效果,为含钾矿物中钾元素的高效利用提供理论依据。

通过统计数据结果分析,各种酸在不同浓度表现出的解钾效果不同,其中草酸、 α -戊二酸在浓度为0.5 mg/L时解钾效果最好,酒石酸、丙酮酸、苹果酸、柠檬酸、丙酸在浓度为0.3 mg/L时解钾效果最好,乳酸、乙酸在浓度为0.2 mg/L时解钾效果最好,富马酸在浓度为0.4 mg/L时解钾效果最好。其中草酸、酒石酸、丙酮酸、乙酸、柠檬酸的解钾能力较强。通过相关性分析可知,草酸、酒石酸、丙酮酸的解钾能力与浓度呈极显著正相关($P < 0.01$),表现出随着浓度增高,解钾能力提升的效果;而乙酸的解钾能力与浓度呈极显著负相关($P < 0.01$),表现出在低浓度有较高的解钾能力。通过对极差的大小进行比较发现,5种有机酸对钾长石中钾离子的释放效果表现为草酸 > 柠檬酸 > 酒石酸 > 丙酮酸 > 乙酸。其中处理11表现出的解钾效果最优,即0.10 mg/L草酸、0.10 mg/L酒石酸、0.05 mg/L乙酸、0.15 mg/L柠檬酸。

从研究结果可以看出,经过连续振荡培养144 h后,各酸溶液中对含钾矿物的解钾量均高于对照处理,不同有机酸的解钾能力随着浓度的变化,也呈现出不同的效果,这与王瑾等的研究结果^[18-19]一致,他们认为有机酸之所以能够促进含钾矿物中的钾素释放,其原因是由于矿物表面的晶格在有机酸溶液中被破坏,从而破坏了矿物的结构,加快矿物的溶解,使得钾素可以游离在溶液之中。试验采用的这10种有机酸对钾长石的溶解效果也表明,有机酸对含钾矿物释放的可溶性钾含量与有机酸浓度之间存在一定的相关性,但可溶性钾含量并不完全是随着有机酸浓度的升高而提升,低浓度时也会表现出较高的解钾能力与效果。

有机酸通过酸化作用可溶解和转化一些难溶性矿物,达到释放养分的效果。有机酸的酸化与络合作用均对速效钾含量的提高有一定作用,且二者为协同关系^[20]。不同浓度的有机酸对钾释放的主要作用不同,高浓度以酸化作用为主,低浓度以络合作用为主,但有机酸含量不能盲目提高,郭亚利等研究发现,部分有机酸若含量过高时,能在一定程度上抑制钾的释放效果^[21]。因此,筛选出有机酸释钾的最适浓度,具有十分重要的意义。

试验结果进一步验证了不同有机酸对钾长石粉释钾效应上的差异,这与王光华等的研究结果^[22-23]一致,他们认为有机酸的解磷、解钾效果主要受到有机酸种类与浓度的限制,每种解钾、解磷效果较强的有机酸,都存在最适浓度。因此通过正交试验,深入研究有机酸对含钾矿物释钾作用的最适浓度与组合。

有机酸可以有效促进矿物钾的分解释放,有机酸对含钾矿物的释钾是一个既缓慢又持续的综合动态过程,含钾矿物的解钾量既受有机酸种类的影响,也与其浓度关系密切,经试验比较,草酸具有较强的释钾能力,对含钾矿物钾素释放的效果要强于其他有机酸。柠檬酸、丙酮酸、酒石酸、乙酸等有机酸,主要是通过络合溶解作用活化矿物钾。因此,在下一阶段更深入的研究中,应以有机酸溶解作用为主导,更全面地研究解钾的影响与制约因素,将有可能更深入地揭示与阐明高效解钾酸的解钾机制,这一点很值得更进一步关注与探索。

参考文献:

- [1] 商照聪,刘刚,包剑. 我国钾资源开发技术进展与展望[J]. 化肥工业,2012,39(4):5-8,49.
- [2] 赵虹,党森. “结晶学与矿物学”课程教学改革研究[J]. 中国地质教育,2012,21(2):79-81.
- [3] 仇刚. 高效硅酸盐矿物分解细菌的分离筛选及其与硅酸盐矿物相互作用机制研究[D]. 南京:南京农业大学,2008:10-13.
- [4] 亚历山大罗夫. 硅酸盐细菌[M]. 叶维青,译. 北京:科学出版社,1955.
- [5] 李元芳. 硅酸盐细菌肥料的特性和作用[J]. 土壤肥料,1994(2):48-49.
- [6] 李新新. 一株红壤高效解钾菌的筛选、鉴定、发酵条件优化及促生作用的研究[D]. 南京:南京农业大学,2013:12-14.
- [7] 吕睿,李博,宋风敏,等. 解钾菌的分离、鉴定及解钾能力[J]. 江苏农业科学,2016,44(11):471-475.
- [8] 王兴祥,张桃林,鲁如坤. 施肥措施对红壤结构的影响[J]. 中国生态农业学报,2001,9(3):74-76.
- [9] 史瑞和. 推荐一本新书《土壤-植物营养学原理和施肥》[J]. 土壤,1999(3):56-57.
- [10] 崔建宇,任理,王敬国,等. 有机酸影响矿物钾释放的室内试验与数学模拟[J]. 土壤学报,2002,39(3):341-350.
- [11] 涂书新,郭智芬,孙锦荷. 富钾植物籽粒根际分泌物及其矿物释钾作用的研究[J]. 核农学报,1999,13(5):305-311.
- [12] 杨铁钊,杨志晓,林娟,等. 不同烤烟基因型根际钾营养和根系特性研究[J]. 土壤学报,2009,46(4):646-651.
- [13] 张汝民,张丹,陈宏伟,等. 梭梭幼苗根系分泌物提取方法的研究[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(3):153-157.
- [14] 高欣欣,于会泳,张继光,等. 烤烟根系分泌物的分离鉴定及对种子萌发的影响[J]. 中国烟草科学,2012,33(3):87-91.
- [15] 李文云,王立娟,袁启凤,等. 不同产地牛肉红朱橘果实可溶性糖和有机酸含量分析[J]. 江苏农业科学,2014,42(1):255-258.
- [16] 沈宏,杨存义,范小威,等. 大豆根系分泌物和根细胞壁对难溶性磷的活化[J]. 生态环境,2004,13(4):633-635.
- [17] 化党领,杨秋云,刘世亮,等. 不同有机酸对不同成熟度烟叶内在化学成分的影响[J]. 江苏农业科学,2011(1):113-115.
- [18] 王瑾. 几种主要含钾矿物的钾素释放特征研究[D]. 武汉:华中农业大学,2012:70-71.
- [19] 王瑾,李小坤,鲁剑巍,等. 不同酸提取条件下几种含钾矿物中钾释放动力学研究[J]. 中国农业科学,2012,45(22):4643-4650.
- [20] 何冰,薛刚,张小全,等. 有机酸对土壤钾素活化过程的化学分析[J]. 土壤,2015,47(1):74-79.
- [21] 郭亚利,李明海,吴洪田,等. 烤烟根系分泌物对烤烟幼苗生长和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(3):458-463.
- [22] 王光华,周德瑞,杨谦,等. 低分子量有机酸对磷矿粉的释磷效应[J]. 农业环境科学学报,2004,23(1):80-84.
- [23] 张英,芦光新,谢永丽,等. 溶磷菌分泌有机酸与溶磷能力相关性研究[J]. 草地学报,2015,23(5):1033-1038.