

李学平,刘萍,李甲亮,等. 盐碱化草坪土壤耐盐解磷真菌的筛选及解磷能力研究[J]. 江苏农业科学,2015,43(7):368-371.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.07.125

盐碱化草坪土壤耐盐解磷真菌的筛选及解磷能力研究

李学平,刘萍,李甲亮,吴海楠

(滨州学院资源环境系,山东滨州 256600)

摘要:采集草坪根际盐碱化土壤进行菌种筛选,并研究培养条件对菌株解磷效果的影响。试验结果表明,真菌菌株 FL0908 发酵液中的有效磷浓度为 310.23 mg/L,真菌解磷圈直径与菌落直径比值(D/d)达到 1.96。菌株 FL0908 在所供 4 种碳源条件下均能生长,不同碳源生长差异显著,最适碳源为葡萄糖,而在乳糖培养基上生长最差;对于所供 4 种氮源,在酵母浸膏上生长过于迅速,在亚硝酸钠条件下几乎不生长,最适氮源为酵母浸膏,硝酸钾次之;对于所供 4 种温度,真菌均可生长,最适温度为 30 ℃;在所供的 4 种 pH 值条件下可正常生长,最适 pH 值为 6。对于试验中发酵液条件的优化组合,最适解磷条件为:温度 35 ℃,pH 值 7,碳氮比 35:1,转速 130 r/min。

关键词:解磷真菌;生物学特性;盐碱土;根际

中图分类号: S182 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)07-0368-03

磷肥作为作物必需的营养物质对农业效益的提高具有重大作用,但是施入土壤后由于土壤的固定作用,大部分磷与土壤中的 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 结合,形成难溶性磷酸盐^[1],大大降低了肥料的有效性。在土壤性质、作物类型、磷肥种类和用量等一系列因素的影响下,每年施入的磷有 75%~90% 积累在土壤中成为难溶形态的磷^[2],当季利用率一般为 10%~25%^[3];因此,如何提高磷肥利用率一直是研究人员关注的重要问题。解磷微生物是土壤中能将难溶性磷转化为植物能够吸收利用的可溶性磷的一类特殊功能微生物类群^[4]。土壤中解磷微生物主要包括细菌、真菌和放线菌。关于解磷细菌的研究较多,也较深入^[5-6]。关于解磷真菌方面的研究相对较少,但因为其具有解磷能力强的特点,一直也是研究的热点^[7]。对不同种类解磷微生物溶磷效果的研究发现,细菌、酵母、霉菌接种在不同磷源上时,表现出的溶磷能力不同^[8-12]。解磷真菌在数量和种类上都少于解磷细菌,但其解磷能力远远高于解磷细菌,而且遗传性状更加稳定^[13]。因此,研究解磷真菌的解磷特性以及生物学特性,对促进植物生长发育以及解磷真菌在农学上的应用有重要作用。本试验采集草坪根际土壤,对解磷菌进行筛选并研究培养条件对菌株解磷效果的影响,同时对发酵液条件优化组合进行了研究,探讨解磷真菌的最适生长环境以及解磷的最适合条件。

1 材料与方法

1.1 供试样品

采集内陆盐碱地草坪根际土壤,采用抖土法将收集的土样放入密封袋内立刻带回实验室冷藏,备用。

收稿日期:2014-09-09

基金项目:国家级大学生创新训练计划(编号:201310449124);山东省自然科学基金联合专项(编号:ZR2012CL05);山东省自然科学基金(编号:ZR2013EEL001)。

作者简介:李学平(1978—),女,山东临沂人,博士,副教授,主要从事陆地环境微生物研究。E-mail:lixueping2008@163.com。

1.2 培养基配方

1.2.1 基础培养基 菌种初筛用的是有机磷固体培养基和无机磷固体培养基。

(1)有机磷固体培养基配方:葡萄糖 10 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 g, NaCl 0.3 g, KCl 0.3 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.003 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g, CaCO_3 5 g, 卵磷脂 0.2 g, 琼脂 15~20 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 值 7.0~7.5。(2)无机磷固体培养基配方:葡萄糖 10 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 g, NaCl 0.3 g, KCl 0.3 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.003 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 5 g, 琼脂 15~20 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 值 7.0~7.5。

1.2.2 保存培养基 菌种保存时用到的培养基为斜面培养基,其配方为:葡萄糖 15 g, NaNO_3 1 g, K_2HPO_4 0.5 g, KCl 0.25 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.25 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.005 g, 琼脂 8 g, 蒸馏水 500 mL, 自然 pH 值。

1.2.3 复筛培养基 菌种复培(纯化)时用的培养基为有机磷液体培养基和无机磷液体培养基。(1)有机磷液体培养基:葡萄糖 10 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 g, NaCl 0.3 g, KCl 0.3 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.003 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g, CaCO_3 5 g, 卵磷脂 0.2 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 值 7.0~7.5。(2)无机磷液体培养基:葡萄糖 10 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 g, NaCl 0.3 g, KCl 0.3 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.003 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 5 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 值 7.0~7.5。

1.2.4 活化培养基 经过观察,获知纯化所得的菌种为真菌,所以活化时用到的培养基为 PDA 培养基,其配方为:葡萄糖 20 g, 马铃薯(去皮)200 g, 琼脂 15 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 值自然。配制方法是将马铃薯去皮,切成小块,于锅中加水 1 000 mL,煮沸 30 min,用双层纱布过滤,取其滤液,之后加入葡萄糖和琼脂,小火加热并用玻璃棒不断搅拌,至琼脂完全溶解,并加水补足 1 000 mL。

1.2.5 发酵培养基 发酵条件优化组合采用的培养基为无机培养基和有机培养基。(1)有机培养基配方:葡萄糖 10 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 g, NaCl 0.3 g, KCl 0.3 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

0.003 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g, CaCO_3 5 g, 卵磷脂 0.2 g, 琼脂 15~20 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 值 7.0~7.5。(2) 无机培养基配方: 葡萄糖 10 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 g, NaCl 0.3 g, KCl 0.3 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.003 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g, $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$ 5 g, 琼脂 15~20 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 值 7.0~7.5。

以上培养基制作完成之后均在高压灭菌锅中, 于 121 °C、0.103 MPa 条件下灭菌 20 min。

1.2.6 发酵条件优化组合 本试验中发酵条件优化组合采用的是 4 因子(温度、pH 值、碳氮比、转速)3 水平的正交试验(表 1), 根据试验结果, 综合分析确定菌株生长的最适条件。

表 1 解磷真菌发酵条件正交试验设计

| 序号 | 温度(°C) | pH 值 | 碳氮比 | 转速(r/min) |
|----|--------|------|------|--------------|
| 1 | 25 | 7 | 30:1 | 100 |
| 2 | 25 | 8 | 20:1 | 150 |
| 3 | 25 | 9 | 5:1 | 100-150-100* |
| 4 | 30 | 7 | 20:1 | 100-150-100* |
| 5 | 30 | 8 | 5:1 | 100 |
| 6 | 30 | 9 | 30:1 | 150 |
| 7 | 35 | 7 | 5:1 | 150 |
| 8 | 35 | 8 | 30:1 | 100-150-100* |
| 9 | 35 | 9 | 20:1 | 100 |

注: * 表示摇床设置转速为 0~70 h 为 100 r/min, 70~160 h 为 150 r/min, 160~190 h 为 100 r/min。

1.3 菌株筛选

1.3.1 初筛 按照培养基配方与配量分别称取各药品, 取少于总量的水于烧杯中, 将各培养基成分(琼脂除外)逐一加入水中待溶; 将玻璃杯放在石棉网上文火加热, 并不断搅拌, 使各药品快速溶解, 然后补充水分至所需配制培养基的量; 用 1 mol/L 的 NaOH 调节 pH 值至 7.0~7.5; 将配制好的培养基分装在锥形瓶内, 加上棉塞包装灭菌。高压灭菌后倒平板, 次日, 将采集的土壤过筛磨细, 称取 10 g 样品, 进行梯度稀释至 1×10^{-7} 、 1×10^{-8} 、 1×10^{-9} , 分别滴加菌液于相应编号的平板表面, 每个梯度做 3 个重复, 用涂布器涂布均匀, 20~30 min 后倒置, 并放于 28 °C 恒温箱中培养。每天观察平板, 并记录菌落出现的日期、菌落解磷能力出现日期、菌落直径 d 、解磷圈出现日期及直径 D 。培养 7 d 后, 得到解磷能力比较强的菌株进行纯化培养, 将纯化培养几代的菌株进行菌种保存。

1.3.2 复筛 采用液体发酵培养法, 将解磷微生物培养在难溶性磷液体培养基上, 按照配方配制液体培养基进行高压灭菌, 在超净工作台上, 按照无菌接种法, 接种纯化后的解磷真菌于发酵液中, 置于摇床中, 在 30 °C、120 r/min 转速条件下培养 7 d, 每天观察发酵液的变化, 并记录菌丝球的出现日期、菌丝球颜色、目测其大小。发酵结束后, 进行发酵液有效磷测定。

1.3.3 生物学测定 本次试验采用察氏培养基进行试验, 其配方如下: 碳源 30 g, NaNO_3 2 g, K_2HPO_4 1 g, KCl 0.5 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g, 琼脂 18 g, 蒸馏水 1 000 mL, 自然 pH 值。

2 结果与分析

2.1 解磷真菌菌株筛选

通过菌种初筛和复筛, 得到真菌菌株 FL0908 发酵液中的

有效磷浓度为 310.23 mg/L。真菌解磷圈直径与菌落直径比值(D/d)随时间延长而增大, 菌株 FL0908 在 4 d 增幅最大, 在生长到 5 d 时, 解磷圈直径与菌落直径比值(D/d)趋于稳定, 菌株 FL0908 的 D/d 达到最大值 1.96(表 2)。

表 2 真菌菌株 FL0908 解磷圈直径与菌落直径比值(D/d)

| 时间 | D/d |
|----|-------|
| 1 | 0 |
| 2 | 0 |
| 3 | 1.04 |
| 4 | 1.52 |
| 5 | 1.96 |
| 6 | 1.82 |
| 7 | 1.66 |

2.2 发酵培养性状

通过观察结果(表 3)显示, 菌株 FL0908 的上清液较为透明, 粗略判断菌株 FL0908 的解磷能力较强。

表 3 真菌菌株 FL0908 在发酵条件下的性状

| 特征 | 性状 |
|-----|--------------|
| 颜色 | 白色 |
| 形状 | 球状 |
| 直径 | 1.0~2.0 mm |
| 黏稠度 | 有固体黏于瓶壁, 难刮下 |
| 上清液 | 白色或淡黄 |

2.3 培养条件对解磷能力的影响

2.3.1 不同碳源对真菌生长的影响 真菌菌株 FL0908 在供试的 4 种碳源营养条件下均能生长, 生长趋势基本一致, 但是对葡萄糖的利用最好, 对乳糖的利用最差(图 1)。不同碳源不仅对真菌菌株 FL0908 的菌落直径影响较大, 对菌丝体及菌落形态同样产生较为显著的影响。在葡萄糖培养基上, 菌丝体较为粗壮, 菌落浓密, 在培养基背面产生较明显的黑色次生代谢物; 在蔗糖和乳糖培养基上生长出的菌丝比较稀疏, 颜色亦较浅。

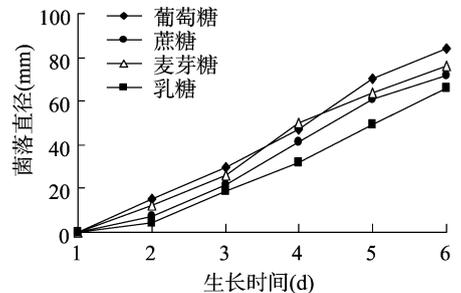


图 1 不同碳源对真菌菌株 FL0908 生长的影响

2.3.2 不同氮源对真菌生长的影响 不同氮源对真菌菌株 FL0908 生长的影响较大(图 2)。真菌菌株 FL0908 在 NaNO_2 上基本不生长, 在其他不同氮源培养基上均能生长。其中在酵母浸膏上生长过于迅速, 在 KNO_3 和 NaNO_3 上能正常生长。从整个过程来看, 真菌菌株 FL0908 在酵母浸膏培养基上生长最好, 在 NaNO_2 培养基上生长最差。不同氮源不仅对真菌菌株 FL0908 的菌落直径影响较大, 对其菌丝体及菌落形态同样产生较为显著的影响。真菌菌株 FL0908 在酵母浸膏和 KNO_3 培养基上生长出比较浓密的菌丝; 在 NaNO_2 培养基上菌落颜色比较淡, 菌落外围形成白色的生长圈, 而且菌丝变为黑色所需时间更长。

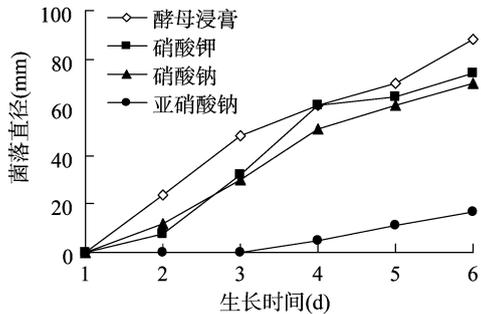


图2 不同氮源对真菌菌株 FL0908 生长的影响

2.3.3 不同温度对真菌生长的影响 真菌菌株 FL0908 在供试的 4 个不同温度条件下均能生长,但在不同温度条件下的生长状况差异较显著。在培养 3 d 内,真菌菌株 FL0908 在 35 ℃ 条件下生长最快,在 20 ℃ 条件下生长最差,在培养 3 d 后,35 ℃ 条件下的菌落生长速率减慢;生长到 4 d 后,在 30 ℃ 条件下生长最好,在 20 ℃ 条件下生长最差(图 3)。不同温度对真菌菌株 FL0908 的菌丝体及菌落形态影响不显著,在温度为 25、30、35 ℃ 条件下菌丝都比较浓密,在 20 ℃ 条件下菌落颜色比较淡。

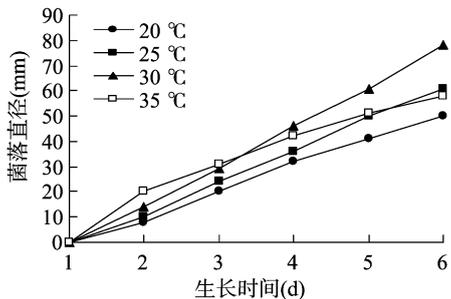


图3 不同温度对真菌菌株 FL0908 生长的影响

2.3.4 不同 pH 值对真菌生长的影响 真菌菌株 FL0908 在供试的 4 种 pH 值条件下均能生长,在培养 3 d 内,在 pH 值为 6 时生长最快,菌落直径达到 28 mm;生长到 4 d 时,pH 值为 5 时菌落生长速率最快;综合整个过程来看,在 pH 值为 6 时生长最好,在 pH 值为 8 时生长最差(图 4)。pH 值为 5、6、7 这 3 种酸碱度下真菌菌株 FL0908 的菌落形态基本无显著差异,菌落浓密;pH 值为 8 时生长最差,颜色暗淡,菌落稀疏。

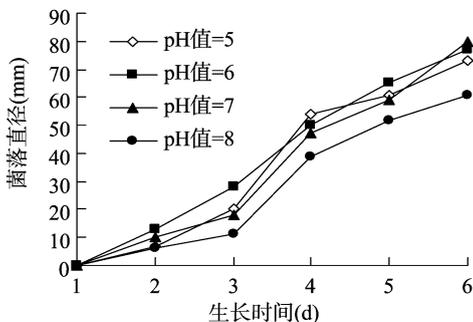


图4 不同 pH 值对真菌菌株 FL0908 生长的影响

2.4 发酵条件研究

菌株 FL0908 不同试验组发酵液有效磷含量差异较大(表 4)。酸碱度的极差最大,是影响发酵液有效磷含量的关键性因子,碳氮比极差最小,对发酵液有效磷含量影响较小。根据各

试验因子的平均数可以看出:因素 A 选择水平 3,因素 B 选择水平 2,因素 C 选择水平 1,因素 D 选择水平 2,为最优组合,即温度为 35 ℃,pH 值为 7,碳氮比为 35 : 1,转速为 130 r/min。

表 4 菌株 FL0908 不同试验组发酵液有效磷含量

| 试验组 | A: 温度 (°C) | B: 酸碱度 | C: 碳氮比 | D: 转速 (r/min) | 有效磷含量 (mg/L) |
|-------|------------|--------|--------|-----------------|--------------|
| 1 | 25 | 6 | 35 : 1 | 100 | 270.180 |
| 2 | 25 | 7 | 20 : 1 | 130 | 322.420 |
| 3 | 25 | 8 | 5 : 1 | 100 - 130 - 100 | 155.170 |
| 4 | 30 | 6 | 20 : 1 | 100 - 130 - 100 | 254.310 |
| 5 | 30 | 7 | 5 : 1 | 100 | 316.260 |
| 6 | 30 | 8 | 35 : 1 | 130 | 197.190 |
| 7 | 35 | 6 | 5 : 1 | 130 | 307.710 |
| 8 | 35 | 7 | 35 : 1 | 100 - 130 - 100 | 341.180 |
| 9 | 35 | 8 | 20 : 1 | 100 | 206.560 |
| k_1 | 166.17 | 184.93 | 179.68 | 176.22 | |
| k_2 | 170.61 | 217.75 | 174.06 | 183.85 | |
| k_3 | 190.10 | 124.20 | 173.14 | 166.81 | |
| R | 23.93 | 93.55 | 6.54 | 17.04 | |

3 结论

筛选获得 1 株解磷特性比较好的真菌菌株 FL0908,对其解磷能力进行研究,真菌解磷圈直径与菌落直径比值 (D/d) 达到 1.96。

真菌菌株 FL0908 在供试的 4 种碳源营养条件下均能生长,不同碳源条件下差异显著,最适碳源为葡萄糖,而在乳糖培养基上生长最差;对于所供 4 种氮源,在酵母浸膏上生长过于迅速,在亚硝酸钠条件下几乎不生长,最适氮源为酵母浸膏,硝酸钾次之。

对于所供 4 种温度,真菌均可生长,菌株 FL0908 的最适温度为 30 ℃;在所供的 4 种 pH 值条件下可正常生长,最适酸碱度为 pH 值为 6。

对于试验中发酵液条件的优化组合,真菌菌株 FL0908 最适解磷条件为:温度 35 ℃,pH 值 7,碳氮比 35 : 1,转速 130 r/min。

参考文献:

- [1] 张宝贵,李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报,1998,35(1):104-111.
- [2] 来璐,郝明德,彭令发. 土壤磷素研究进展[J]. 水土保持研究,2003,10(1):65-67.
- [3] 刘建玲,张凤华. 土壤磷素化学行为及影响因素研究进展[J]. 河北农业大学学报,2000,23(3):36-45.
- [4] 林启美,赵小蓉,孙焱鑫,等. 4 种不同生态系统的土壤解磷细菌数量及种群分布[J]. 土壤与环境,2000,9(1):34-37.
- [5] 刘长霞,谭天伟,翟洪杰. 盐碱条件对真菌解磷能力的影响[J]. 微生物学通报,2003,30(5):69-72.
- [6] Rivas R, Peix A, Mateos P F, et al. Biodiversity of populations of phosphate solubilizing *Rhizobia* that do not dilates chickpea in different Spanish soils[J]. Plant and Soil,2006,287(1/2):23-33.
- [7] Son H J, Park G T, Cha M S, et al. Solubilization of insoluble inorganic phosphates by a novel salt- and pH-tolerant *Pantoea agglomerans* R-42 isolated from soybean rhizosphere[J]. Bioresource Technology,2006,97(2):204-210.
- [8] 钟传青,黄为一. 不同种类解磷微生物的溶磷效果及其磷酸酶活

杨可明,史钢强,魏华锋,等.铜离子、铅离子胁迫的玉米冠层微分光谱与污染效应[J].江苏农业科学,2015,43(7):371-374.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.07.126

铜离子、铅离子胁迫的玉米冠层微分光谱与污染效应

杨可明,史钢强,魏华锋,孙阳阳,刘飞

[中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京100083]

摘要:通过设置玉米在不同浓度重金属铜、铅处理下的污染试验,测定玉米冠层在不同浓度重金属铜、铅污染下的高光谱反射率及其对应玉米叶片中的叶绿素、铜含量,分析玉米叶片中的叶绿素含量与土壤中重金属铜、铅浓度的关系,受不同浓度重金属铜、铅污染的冠层光谱的一阶、二阶、三阶、四阶微分光谱及其所对应的微分光谱角的区别,以及微分光谱及其所对应的微分光谱角与叶片中重金属铜含量的相关性。结果表明,玉米叶片中的叶绿素含量与土壤中 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 含量呈负相关;微分光谱波段位置的微分值和微分光谱角值可明显分辨受不同浓度重金属铜、铅的污染,微分光谱波段位置的微分值和微分光谱角值与叶片中重金属铜含量有显著相关性。

关键词:玉米冠层;微分光谱;铜;铅;污染效应

中图分类号:Q945.78;S513.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2015)07-0371-04

铜、铅是非常重要的2种重金属元素,在人类生产中有着广泛应用。然而,当土壤中的重金属元素含量超过一定的浓度后,就会影响植物生长、污染食物链,进而危害人类健康,因此重金属污染监测技术一直是环境与安全等学科研究的热点问题。使用传统常规的化学分析方法进行重金属污染监测具有测量范围小、费用高、等待时间长、监测用工多等缺点,而高光谱遥感的植物光谱监测技术具有视野宽、测量信息广、监测速度快、对地面植被无破坏、能够实现实时动态监测等诸多优点^[1-2]。

基于高光谱遥感的重金属污染监测可以应用植被光谱特征提取模型^[3-4]、反射率面积^[5]、红边蓝移^[6]、归一化植被指数^[7]、光谱角^[4]、微分光谱^[8]等理论方法,其中微分光谱具有减弱大气效应的优点,更能反映植被光谱的本质特征。刘厚田等运用水稻350~740 nm波段的一阶、二阶微分分析了土壤中过量铜对水稻叶片光谱反射特性的影响^[9];吴长山等利用导数光谱数据对叶绿素密度进行估计并取得一定的效果^[10];王秀珍等研究了333~1 056 nm水稻微分光谱并得出微分光谱在消除土壤背景信息方面的影响和对混合光谱分解方面更加有效^[8,11];王维等利用一阶微分模型与反射率模型、倒数对数模型精度的对比,得出一阶微分高光谱反演模型具

有较好的快速估算土壤中重金属铜含量潜力的结论^[12]。微分光谱在高光谱分析中非常有效,精度也相对较高,但之前微分光谱的研究主要关于土壤和水稻,对我国广泛种植的玉米在重金属污染方面的研究甚少,并且应用波段区间不全,未对微分光谱充分研究。因此,本研究进行不同浓度铜、铅污染的玉米盆栽试验,将微分光谱应用在受铜、铅污染的玉米冠层光谱上,充分应用350~2 500 nm之间的微分光谱,并将微分光谱与光谱角结合,研究重金属铜、铅对玉米的污染,以期通过监测玉米光谱监测重金属污染提供技术支持。

1 材料与与方法

1.1 材料与仪器

试验对象为中糯1号玉米,其铜、铅重金属胁迫的分析纯试剂分别为 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 。

光谱测量等试验仪器包括:光谱范围为350~2 500 nm的SVC HR-1024I高性能地物光谱仪;SPAD-502叶绿素含量测定仪;WFX-120原子吸收分光光度计。

1.2 试验方法

1.2.1 植物培养 选取中糯1号玉米种子作为试验种子进行培育,试验采用不透水、有底漏的花盆进行培育。2014年5月6日对玉米种子进行催芽;5月8日将玉米种子分别种在含有 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 的盆栽土壤中;5月9日出苗后浇灌营养液 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 KNO_3 。试验分别设置0、250、500 $\mu\text{g/g}$ 铜、铅的3个污染梯度,每个浓度均设置3组平行试验(铜、铅共用0 $\mu\text{g/g}$ 污染试验),共15盆盆栽。在培育期玉米每天进行换气通风,定期浇水。

收稿日期:2014-12-08

基金项目:国家自然科学基金(编号:41271436)。

作者简介:杨可明(1969—),男,安徽含山人,博士,教授,主要从事高光谱遥感、矿山地理信息等方面的研究。Tel:(010)62339319; E-mail:ykm69@163.com。

通信作者:史钢强,硕士,主要从事高光谱遥感在重金属监测中的应用等方面的研究。E-mail:gangqiang3344@163.com。

性的变化[J].土壤学报,2005,42(2):286-294.

[9]王莉晶,高晓蓉,吕军,等.解磷真菌C2'的分离鉴定及其在土壤中实际解磷效果的研究[J].土壤通报,2009,40(4):771-775.

[10]赵小蓉,林启美,李保国.溶磷菌对4种难溶性磷酸盐溶解能力的初步研究[J].微生物学报,2002,42(2):236-241.

[11]张巍,冯玉杰,胡纯国,等.耐盐碱解磷菌的分离鉴定及解磷

能力研究[J].土壤通报,2009,40(3):572-575.

[12]韩玉竹,赵建军,曾兵,等.根际解磷菌的分离及解磷能力测定[J].草地学报,2011,19(5):766-770.

[13]Kucey R N. Phosphate solubilizing bacteria and fungi in various cultivated and virgin Alberta soils, Canadian[J]. Journal of Soil Science,1983,63:671-678.