

程 龙,杨可明,王晓峰,等. 铅胁迫下玉米污染程度的 ED-SCAtan $_{\pi/2}$ 快速判别方法[J]. 江苏农业科学,2018,46(12):238-241.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.12.057

铅胁迫下玉米污染程度的 ED-SCAtan $_{\pi/2}$ 快速判别方法

程 龙,杨可明,王晓峰,张 伟,孙彤彤

[中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083]

摘要:通过设计不同浓度铅(Pb)胁迫梯度下玉米生长试验,并在测量了不同浓度铅离子(Pb $^{2+}$)污染的玉米叶片光谱及其叶中 Pb $^{2+}$ 含量的基础上,研究玉米 Pb $^{2+}$ 污染程度的快速判别方法。虽然重金属污染下玉米叶片光谱信息存在微弱差异,但健康的与不同程度污染的玉米叶片光谱仍具有极高相似度,常规的光谱相似性测度方法难以区分污染后叶片光谱微弱差异及其污染程度,因此,提出了结合欧氏距离和光谱相关角正切转换的 ED-SCAtan $_{\pi/2}$ 方法,用于快速判别玉米 Pb $^{2+}$ 污染程度。结果表明,ED-SCAtan $_{\pi/2}$ 方法可以在辨别光谱整体形状相似性的前提下,增强对光谱局部特征差异性的分辨能力。通过与常规的光谱相关系数、光谱角、光谱相关角等光谱相似性度量方法应用结果比较,证明 ED-SCAtan $_{\pi/2}$ 方法能够更有效地响应不同 Pb $^{2+}$ 污染程度的玉米光谱间差异,能快速达到判别不同污染程度的效果。同时该方法也具有减小判别玉米污染程度的误码率以及消除光谱相似度量时的互干扰能力。

关键词:光谱分析;盆栽玉米;铅污染;污染程度;判别方法

中图分类号:X87 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)12-0238-03

近年来,重金属污染对环境的影响越来越严重,特别是重金属污染对农作物的危害已成为当今日益突出的一个社会问题,当铅离子(Pb $^{2+}$)等重金属离子被作物吸收后,不仅影响粮食产量和品质,而且也因污染食物链而严重危害动物和人类健康。铅(Pb)是植物体内的非必需元素,当被植物吸收后会对植物产生一定的毒害作用,轻则影响光合系统和一些光合酶的活性以及叶绿素的合成等,使植物光合作用降低,生长发育受到一定的抑制;重则破坏叶绿体结构等使植物死亡^[1-2]。研究表明,当 Pb $^{2+}$ 进入植物体内时,植物有机体与外界环境界面的质膜首先受到毒害;当 Pb $^{2+}$ 进入植物细胞后影响细胞内一系列生理生化过程,使新陈代谢紊乱^[3-4]。因此,如何控制和预测重金属对植被的污染是当今社会的研究热点。传统的植被重金属污染监测方法主要是通过点样测量与化学分析等,但这些常规方法具有成本高、费时费力、监测范围有限以及对植被有破坏作用等缺点。近年来,随着遥感技术的快速发展,特别是高光谱遥感具有光谱信息丰富、地物理化性质反演能力强、能实时动态进行大面积监测与不损害植被本体等优点,使高光谱遥感技术在监测食品安全、植被健康、环境污染等方面越来越得到广泛的应用^[5]。

地物光谱具有形状和幅度 2 个特性^[6],不同地物的光谱形状和幅度反映了不同地物特征及其相互间光谱差异,通常采用光谱相似性测度或光谱匹配识别等方法来区分不同地物性质,如欧氏距离(euclidistance,简称 ED)、光谱角制图(spectral angle mapper,简称 SAM)、光谱相关角(spectral

correlation angle,简称 SCA)、光谱相关系数(spectral correlation coefficient,简称 SCC)、波谱特征拟合、光谱信息散度、混合调制匹配滤波等^[7-12];也有学者基于以上方法的不同组合进行光谱相似性测量或信息识别,如闻兵工等建立光谱信息熵、兰氏距离和相关系数相结合的测度方法^[13];孔祥兵等构建光谱角余弦和 ED 相结合的测度方法^[14];魏祥坡等提出光谱角余弦-相关系数的测度方法^[15];Du 等提出结合光谱信息散度和光谱角余弦的测度方法^[16];Kumar 等提出光谱信息离散度和 SCC 的测度方法^[17];吴浩等提出基于光谱相关角和光谱信息散度的测度方法^[18];朱院院等提出基于相似性分类的主成分融合方法^[19];焦洪赞等利用光谱相似性测度改进传统的条件随机场模型的测度准则等^[20]。以上方法对光谱在整体幅度和形状上具有较大差异性的不同地物具有较好区分效果,但对光谱在整体幅度和形状上有极高相似度的同种地物区分能力较低,尤其是光谱幅度和形状存在局部变化或差异时区分的敏感度就更低。比如,受到重金属污染后植被光谱会发生畸变,这些变异特征在光谱曲线上都有所体现,然而与健康的植被光谱相比在曲线形态上仍具有极高相似度,所以采用常规的光谱相似性测度及其组合方法等,就难以将植物受重金属污染后光谱变化的畸异性弱差信息区分开。本研究将基于重金属 Pb $^{2+}$ 胁迫下玉米盆栽试验及玉米叶片光谱测量等数据,并结合 ED、正切函数(tan)和 SCA 等相关理论,拟构建一种 ED-SCAtan $_{\pi/2}$ 方法,用于测度植物重金属污染光谱的变异信息响应下污染程度的快速判别,并通过与多种常规方法的应用结果比较,验证 ED-SCAtan $_{\pi/2}$ 方法的高效性,以达到植被重金属污染的监测效果。

1 理论与方法

1.1 光谱相关角

光谱相关角(SCA)可用于测度 2 条光谱曲线的相似性。设存在波段数为 L 的 2 条光谱信号 $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_L)$

收稿日期:2017-04-02

基金项目:国家自然科学基金(编号:41271436);中央高校基本科研业务费专项资金(编号:2009QD02)。

作者简介:程 龙(1991—),男,安徽宿松人,硕士研究生,主要从事高光谱遥感研究。E-mail:1396834136@qq.com。

通信作者:杨可明,博士,教授,主要从事高光谱遥感、矿山地理与形变信息等研究。E-mail:ykm69@163.com。

和 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_L)$, 则 X, Y 的光谱相关系数 (SCC) 为:

$$SCC(X, Y) = \frac{(X - \bar{X}, Y - \bar{Y})}{\|X - \bar{X}\|^2 \cdot \|Y - \bar{Y}\|^2} \quad (1)$$

式中: \bar{X}, \bar{Y} 分别为光谱 X, Y 的平均反射率值。由于光谱信息是离散数据, 所以式(1)也可表示为:

$$SCC(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^L (x_i - \bar{X}) \cdot (y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^L (x_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^L (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中: x_i, y_i 分别为 X, Y 第 i 波段的光谱反射率。SCC 的计算结果在 $-1 \sim 1$ 之间, 反映了 X 和 Y 的线性相关程度。因此可以通过下式得到 X, Y 之间的 SCA:

$$SCA(X, Y) = \cos^{-1} \left[\frac{SCC(X, Y) + 1}{2} \right] \quad (3)$$

式中: SCA 的计算结果介于 $0 \sim \pi/2$ 之间。

1.2 欧氏距离

欧氏距离 (ED) 主要用于衡量信号的相似程度。设存在波段数为 L 的 2 条光谱信号 $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_L)$ 和 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_L)$, 则 X, Y 之间的 ED 计算式为:

$$ED(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^L (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

式中: x_i, y_i 分别为第 i 波段的光谱反射率。ED 值越小误码率越高, 且距离越近越容易相互干扰。

1.3 相似光谱间弱差信息区分方法

考虑到光谱整体形态和局部特征差异性, 在结合欧氏距离 (ED) 和光谱相关角 (SCA) 方法的基础上, 利用正切函数可实现光谱局部性信息放大的特点, 通过构建相应区分方法, 以达到光谱相似性测度与较高相似性光谱间弱差信息区分的目的, 并具有重金属污染光谱变化响应信息的辨别能力。

1.3.1 ED 与 SCA 正切法 ED 的作用是测量光谱相似性, 通过结合 SCA 的正切计算结果可有助于扩大相似光谱的弱差信息。因此, 可构建 ED 与 SCA 正切方法 (简称 ED - SCAtan), 用于计算 X, Y 光谱相似性程度的差异, 即:

$$ED - SCAtan(X, Y) = ED(X, Y) \tan[SCA(X, Y)] \quad (5)$$

1.3.2 改进的 ED 与 SCA 正切法 由正切函数的性质可知, 正切函数当输入角度为 $\pi/4$ 时, 其结果值为 1; 而当输入角度值大于 $\pi/4$ 时, 其结果值随着角度的增加而迅速增大 (图 1), 因此可利用正切函数的这一特性, 将 SCA 的夹角范围变换到 $\pi/4 \sim \pi/2$ 之间, 从而实现当 SCA 有细微变化时, 输出结果值能够有较大的反应, 即表现出光谱曲线局部变化时较强的差异敏感性。为此, 可构建改进的 ED 与 SCA 正切方法 (简称 ED - SCAtan _{$\pi/2$}) 用于更有效地提取相似光谱间弱差信息, ED - SCAtan _{$\pi/2$} 方法如式(6)所示。

$$ED - SCAtan_{\pi/2}(X, Y) = ED(X, Y) \tan \left[\frac{SCA(X, Y) + \pi/2}{2} \right] \quad (6)$$

2 胁迫试验与数据采集

2.1 材料与设备

试验对象为 Pb^{2+} 胁迫生长下的中糯 1 号盆栽玉米。数据采集设备主要有光谱范围为 $350 \sim 2500$ nm 的 SVC HR - 10241 高性能地物光谱仪以及 Perkin Elmer、Elan DCR - e 型

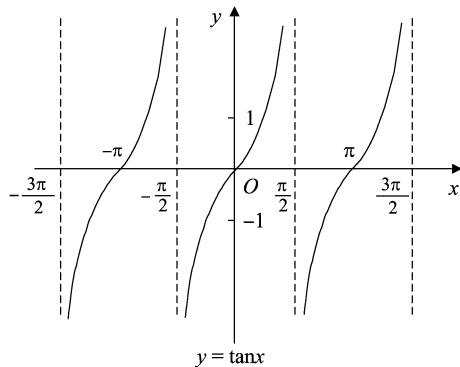


图1 正切函数示意

等离子体质谱分析仪。

2.2 玉米培养

培育玉米时采用有底漏花盆, 胁迫试验设置 0 (空白对照试验)、250、500 $\mu\text{g/g}$ 的 3 种 $Pb(\text{NO}_3)_2$ 浓度的污染梯度, 每个浓度设置 3 组平行盆栽, 共 9 盆。于 2014 年 5 月 6 日进行玉米种子催芽, 5 月 8 日在含有不同 $Pb(\text{NO}_3)_2$ 浓度的盆栽土壤中种植玉米种子, 并在不同浓度 Pb^{2+} 胁迫的花盆上分别标注 $Pb(\text{CK})$ 、 $Pb(250)$ 、 $Pb(500)$ 。玉米出苗后在每盆中添加等量的适量 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 KNO_3 营养液。在培育棚内保持良好通风并定期进行浇灌。

2.3 叶片光谱采集

运用 SVC HR - 10241 地物光谱仪和功率为 50 W 的卤素灯光源, 在室内对不同 Pb^{2+} 浓度胁迫下玉米叶片的光谱进行测量, 采集光谱时采用垂直于叶片表面 40 cm 的 4° 视场角探头, 所采集的光谱反射系数经专用平面白板进行标准化。分别测量每种 Pb^{2+} 浓度胁迫下玉米植株的老、中、新 3 类叶片光谱数据, 同种 Pb^{2+} 浓度胁迫下的玉米叶片分别测量 9 组, 共采集 27 组光谱数据。

2.4 叶片中 Pb^{2+} 含量测定

以上试验完成后, 再对各种叶片样本进行冲洗、烘干、粉碎并分装保存, 依据 GB/T 14506.30—2010《硅酸盐岩石化学分析方法》第 30 部分: 44 个元素量测定方法, 经高纯硝酸、高氯酸消化处理后, 于 2015 年 1 月 14 日用 Perkin Elmer、Elan DRC - e 型等离子体质谱分析仪, 在测定室温度为 20°C 、相对湿度为 30% 等相同条件下, 设置 3 组平行试验分别测定各种玉米叶片的 Pb^{2+} 含量, 最后取 3 组平均值作为测定结果 (表 1)。

表 1 不同 Pb^{2+} 浓度胁迫下玉米叶片光谱间的 ED - SCAtan _{$\pi/2$} 值

胁迫浓度梯度	叶片中 Pb^{2+} 含量 ($\mu\text{g/g}$)	ED - SCAtan _{$\pi/2$} 值
Pb(CK)	3.16	0
Pb(250)	13.32	9.450 4
Pb(500)	18.12	22.119 3

3 玉米叶片铅离子污染程度分析

3.1 ED - SCAtan _{$\pi/2$} 法光谱测度

同一种植物的光谱曲线整体和局部特征都极为相似, 但是植被的光谱特征与植被的发育、健康状况以及生长条件密切相关。通过计算同一胁迫浓度下所测 9 条光谱数据的平均

值,最后得到 Pb(CK)、Pb(250)、Pb(500)3 种 Pb^{2+} 胁迫梯度的 3 条均值光谱(图 2),其中 Pb(CK)为对照光谱,是无 Pb^{2+} 胁迫污染的叶片光谱。由图 2 可知,不同 Pb^{2+} 浓度胁迫下玉米叶片的 3 条光谱曲线形状相似性很高,所计算的光谱相似性相关系数均达到了 0.999 以上,因此,传统的光谱相似性测度方法很难区分各 Pb^{2+} 浓度胁迫的叶片污染光谱与对照光谱之间的细微差异。但采用 ED-SCAtan _{$\pi/2$} 方法,能够很好地增强对光谱整体和局部特征差异的区分能力。ED-SCAtan _{$\pi/2$} 方法的计算步骤:分别计算 Pb(250)、Pb(500)胁迫的叶片污染光谱与 Pb(CK)对照光谱间的欧氏距离(ED)、光谱相关角(SCA)、SCA 的正切值 tan(SCA);再根据式(6)计算 ED-SCAtan _{$\pi/2$} 值(表 1)。由表 1 可知,ED-SCAtan _{$\pi/2$} 方法既能对光谱的细微差异做出较大的响应,也可达到光谱变异信息分辨的理想效果。

3.2 不同方法的监测效果对比分析

同时基于 SA、SCA、SCC、ED-SCAtan、ED-SCAtan _{$\pi/2$} 几种方法计算了 Pb(250)、Pb(500)胁迫的叶片污染光谱与 Pb(CK)对照光谱间测度结果(表 2)。通过对比分析表 2 中各计算结果可以看出,SA、SCA 值在 0.01 左右,SCC 值在 0.999 左右,所以得出 SA、SCA、SCC 方法并不能明显地将污染光谱与对照光谱区分开来;ED-SCAtan 方法具有一定的区分效果,但区分精度不高;而 ED-SCAtan _{$\pi/2$} 方法因 Pb^{2+} 浓度胁迫

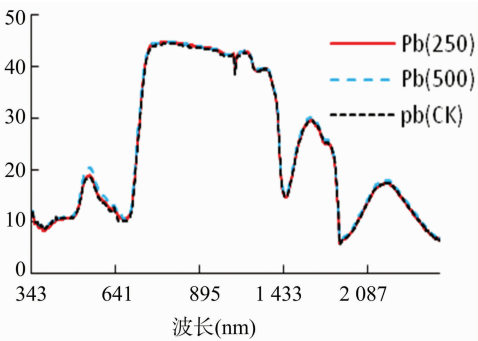


图2 不同浓度 Pb^{2+} 胁迫下的玉米叶片光谱曲线

的程度不同得出的计算值变化特别明显,能够有效响应各种胁迫梯度下污染光谱与对照光谱间的差异,从而达到了不同污染程度的快速高效判别效果,可以有效地识别污染光谱。

在重金属胁迫污染后,玉米叶片光谱会发生一定的畸异性变化。因此,基于表 2 可以分析玉米叶片中 Pb^{2+} 含量和 ED-SCAtan _{$\pi/2$} 值的相关性,以及判别不同 Pb^{2+} 胁迫浓度梯度下玉米叶片光谱的变化差异和污染程度。由表 2 可知,对于不同的 Pb^{2+} 胁迫梯度,玉米叶片中所含 Pb^{2+} 含量与 ED-SCAtan _{$\pi/2$} 方法测度的光谱差异值呈现明显的正相关。结果表明,ED-SCAtan _{$\pi/2$} 值越大, Pb^{2+} 胁迫浓度越大,玉米受重金属铅污染越严重。

表 2 SCC、SA、SCA、ED-SCAtan、ED-SCAtan _{$\pi/2$} 方法光谱相似性测度结果

Pb^{2+} 胁迫浓度	叶片中 Pb^{2+} 含量 ($\mu g/g$)	SA 值	SCA 值	SCC 值	ED-SCAtan 值	ED-SCAtan _{$\pi/2$} 值
Pb(CK)	3.16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pb(250)	13.32	0.009 0	0.012 1	0.999 9	0.113 7	9.450 4
Pb(500)	18.12	0.019 0	0.021 9	0.999 5	0.483 1	22.119 3

4 结论

本研究结合欧氏距离(ED)、光谱相关角(SCA)和正切法转换所构建的 ED-SCAtan _{$\pi/2$} 方法,从宏观上通过 ED 和 SCA 比较 2 条光谱曲线在整体幅度特征上的相似程度,再结合约束 SCA 值范围至 $\pi/4 \sim \pi/2$ 时的正切计算从微观上反映 2 条光谱曲线在光谱局部特征上的变化响应,从而实现 SCC 达到 0.999 时相似光谱间污染信息差异的有效判别。试验分析得出,不同浓度 Pb^{2+} 胁迫梯度及其玉米叶片中 Pb^{2+} 含量都与 ED-SCAtan _{$\pi/2$} 值呈正相关,而且玉米受 Pb^{2+} 胁迫程度越大,ED-SCAtan _{$\pi/2$} 值越大,也即光谱差异和污染程度越大。因此,通过 ED-SCAtan _{$\pi/2$} 值可以区分玉米重金属 Pb^{2+} 污染程度并估计玉米叶片中 Pb^{2+} 含量。而且 ED-SCAtan _{$\pi/2$} 方法能够减小如 ED、SA、SCC 等方法判别光谱相似性时存在的误码率,也能消除光谱相似性的相互干扰。

参考文献:

[1]张英慧,袁东亚,赵志鹏,等. 重金属铅污染对动植物的危害综述[J]. 安徽农学通报,2011,17(2):55-56.
[2]张宝龙,陈美静,辛士刚,等. 铅胁迫对植物光合作用影响的研究进展[J]. 安徽农业科学,2014(12):3468-3470.
[3]王志勇,廖 丽,袁学军. 重金属铅对草坪植物的毒害研究进展

[J]. 草原与草坪,2010,30(2):8-15.
[4]江行玉,赵可夫. 铅污染下芦苇体内铅的分布和铅胁迫相关蛋白[J]. 植物生理与分子生物学学报,2002,28(3):169-174.
[5]白雪琪,张晓丽,张 凝,等. 基于高光谱遥感的油松毛虫危害程度监测模型[J]. 北京林业大学学报,2016,38(11):16-22.
[6]张俊哲,朱文泉,郑周涛,等. 高光谱数据的相似性测度对比研究[J]. 测绘科学,2013,38(6):33-36.
[7]Zhang X Y, Li P J. Lithological mapping from hyperspectral data by improved use of spectral angle mapper[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2014, 31: 95-109.
[8]阎继宁,周可法,王金林,等. 基于 SAM 与 SVM 的高光谱遥感蚀变信息提取[J]. 计算机工程与应用,2013,49(19):141-146.
[9]刘万军,杨秀红,曲海成,等. 基于光谱信息散度与光谱角匹配的高光谱解混算法[J]. 计算机应用,2015,35(3):844-848.
[10]安 斌,陈书海,严卫东. SAM 法在多光谱图像分类中的应用[J]. 中国体视学与图像分析,2005,10(1):55-60.
[11]Du B, Zhang Y X, Zhang L P, et al. A hypothesis independent subpixel target detector for hyperspectral images [J]. Signal Processing, 2015, 110: 244-249.
[12]Zhang E, Zhang X, Yang S, et al. Improving hyperspectral image classification using spectral information divergence [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 11(1): 249-253.
[13]闻兵工,冯伍法,刘 伟,等. 基于光谱曲线整体相似性测度的

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。但由于化肥配施比例不合理,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.