

基于不同变换形式的干旱区土壤盐分 高光谱特征反演

李娟^{1,2,3}, 陈超^{1,2}, 王昭^{1,2}

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075;

2. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 国土资源部退化及未利用土地整治重点实验室, 西安 710075)

摘要: 对于干旱区土壤盐渍化的高光谱特征进行研究, 分析并阐明高光谱精度的影响因子及变换形式, 这对定量测定土壤盐碱程度具有重要意义。以陕西定边地区盐碱土壤为研究对象, 通过分析区域土样的高光谱数据和室内测定的电导率与全盐含量数据, 研究了同一耕作、施肥和灌溉措施下土壤电导率和全盐量的关系, 并比较了电导率和全盐量两者的相关关系, 分析两者与不同光谱指标(光谱反射率、反射率倒数、反射率对数、反射率一阶微分及反射率对数一阶微分)的相关性以及二者高光谱反演的精度。结果表明:(1) 电导率(x)与含盐量(y)之间存在正相关关系且 $R^2 = 0.96$, 达到显著水平;(2) 电导率与光谱反射率之间的相关性要优于全盐量, 在土壤盐渍化的敏感波段表现尤为突出, 遴选敏感光谱波段为 350~1 000 nm;(3) 以电导率构建的偏最小二乘回归模型的决定系数和均方根差优于全盐量。研究表明该区域的土壤高光谱信息对土壤电导率的响应较全盐量敏感, 以电导率为监测指标的高光谱反演精度明显要高于全盐量。该结果可为提高土壤盐渍化高光谱监测精度提供科学支撑。

关键词: 电导率; 全盐量; 高光谱; 反演精度; 土壤

中图分类号: TP701; S127

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)01-0197-05

Inversion of High Spectral Characteristics of Soil Salt in Arid Area Based on Different Transform Forms

LI Juan^{1,2,3}, CHEN Chao^{1,2}, WANG Zhao^{1,2}

(1. Shaanxi Province Land Engineering Construction Group, Xi'an 710075, China; 2. College of

Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Key Laboratory of

Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Land and Resources, Xi'an 710075, China)

Abstract: Studying on the high spectral features of soil salinization in arid areas, analyzing and illuminating the impact factors and transform model of the precision of high spectral is of great significance to the prediction of the degree of soil salinization. The study was conducted in the saline-alkali soil in Dingbian of Shaanxi Province. Hyperspectral data of soils were obtained. The total salt content (S_t) and electrical conductivity ($EC_{1:5}$) of soil were measured with a soil : solution ratio of 1 : 5 ($EC_{1:5}$). Relationships between S_t and $EC_{1:5}$ were studied under the same tillage pattern, fertilization and irrigation. Correlations between hyperspectral indices and S_t and $EC_{1:5}$ were analyzed. The inversion accuracy of S_t using hyperspectral technique was compared with that of $EC_{1:5}$. The results showed that the significant positive relationship was found between S_t and $EC_{1:5}$ ($R^2 = 0.96$). The correlation between $EC_{1:5}$ and continuum removal was better than S_t , especially in the sensitive bands (λ between 350 nm and 1 000 nm). The coefficient and mean square root of the partial least squares regression model which was determined by $EC_{1:5}$ were better than those determined by S_t . Therefore, the responses of high spectral information to S_t were more sensitive than those of high spectral information to $EC_{1:5}$. Accuracy of S_t predicted by high spectral was higher than $EC_{1:5}$. The results of this study can provide a theoretical basis for improving hyperspectral remote sensing monitoring accuracy of soil salinization.

Keywords: electrical conductivity; soil salt content; hyperspectral; inversion accuracy; soil

土壤盐渍化可造成土壤板结、肥力衰退、作物生产力下降、生态环境恶化,是制约粮食安全、农业发展与生态持续改善的主要因素之一^[1-3]。对盐渍化土壤进行合理开发利用、改良、治理,要求能够快速、准确、动态地获取大面积盐渍化土壤的盐分信息。传统土壤盐渍化的监测采用定点采样测定方法,耗时长、破坏性及代表性较差,而且对财力也会造成一定的损失,并且无法快捷地获得动态数据。高光谱遥感凭借其波段多且连续、信息丰富、定量反演精度高等显著优点,很好地克服了传统人工地面监测方法的不足,已成为土壤盐渍化监测领域的一种先进手段^[4-5]。

构建土壤盐分高光谱定量反演模型是土壤盐渍化高光谱遥感监测的重要内容之一。已有大量研究对不同地区的盐渍化土壤进行了盐分高光谱定量反演^[6]。何挺等^[7-9]以吉林省西部的长岭县为研究区,采用神经网络构建了盐渍土盐分高光谱预测模型,决定系数达到 0.90;还有研究^[10-12]以黄河三角洲东部的永安镇为研究区,利用野外实测的高光谱数据建立的神经网络预测模型的预测精度为 62.5%。这些研究高光谱遥感监测土壤盐渍化状况的研究可为后续研究者提供参考,但目前针对土壤盐分所建立的高光谱预测模型,都是基于某一特定区域数据所建,而不同区域的成土母质、土壤含盐量、盐分离子组成状况等因素存在一定的差异,导致某一特定地区所建立盐分高光谱预测模型很难推广到其他地区。本研究主要是对耕作、灌溉条件等一致的土壤盐渍化通过定量测定后,与光谱拟合,利用偏最小二乘回归法进行建模与定量反演,这对预测盐碱地盐分含量及盐碱化程度可提供理论依据,对指导盐碱地治理及种植具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以陕西省定边县为研究区,该区位于毛乌素沙地南缘,是黄土高原与内蒙古鄂尔多斯荒漠草原过渡地带。典型的温带半干旱大陆性季风气候,春季多风,夏季干旱,秋季阴雨,冬季严寒,日照充足,年均气温 7.9℃,平均降雨量 316.9 mm,主要集中在 7—9 月三个月;平均蒸发量 2 490.9 mm,研究区域地势总体平缓开阔,地下水位较高,土壤盐渍化严重。

1.2 测定项目与方法

(1) 土壤光谱测定。以研究区域中心为起点,沿东、南、西、北四个方向采样,每个方向的样点分布于一条直线上,样点之间的距离为 60 m 左右,共计取样点 120 个。选择晴朗无风天气,利用美国 ASD 公

司生产的 FieldSpec 4 型地物光谱仪(波长范围为 350~2 500 nm 光谱,采样间隔 1.5 nm,光谱分辨率为 3.5 nm。采用 ASD 光谱仪标准配置 7.5°视场角)在 10:30—13:30 测定所选地表植被和粗糙度相当的土壤点进行光谱反射率测定。测量时传感器探头垂直向下,距离地面垂直高度约 15 cm 左右。光谱采样每 10 个为一组,每次测定两组,以其平均值作为该取样点土壤光谱反射值。为减少大气变化影响,在每组测量前后都及时进行标准白板校正。

(2) 土壤样品采集。在采集光谱曲线的土壤点采集表层土壤,每个土样采集重量为 1 kg 左右,共采集土样 80 个,土样带回实验室后,清除小石块及作物残留物等杂质,于实验室自然风干。风干后的样品经研磨过 2 mm 筛,用于盐分含量和电导率的测定。

(3) 土壤盐分参数盐测定。测定土样的全盐量和电导率,测定方法参照《土壤农业化学分析方法》^[4]。土壤电导率采用水土比为 5:1,利用雷磁电导率仪直接进行测定。全盐量采用水浴烘干法进行测定。本次采集 80 个土壤样品的电导率和含盐量数据特征见表 1。

表 1 土样电导率和全盐量数据特征

测定项目	平均值	最大值	最小值	标准 偏差	变异 系数
电导率/(mS·cm ⁻¹)	1.31	3.02	0.2	0.76	0.58
含盐量/(g·kg ⁻¹)	8.56	12.66	4.68	2.29	0.27

1.3 数据处理

(1) 高光谱数据的处理运用 ViewSpecPro 软件进行,首先加载显示样点的光谱曲线(10 条),判断并剔除离群异常值,取剩余曲线的算术平均值作为该样点的高光谱特征值。土壤光谱反射率变化格式分别为反射率、反射率的倒数、反射率的对数、反射率的一阶微分和反射率倒数的一阶微分,字母分别表示为 R 、 $1/R$ 、 $\lg R$ 、 $(\lg R)'$ 和 $(1/\lg R)'$ 。

(2) 去噪处理。由于高光谱仪不同波段间能量响应上的差异性,采集的光谱曲线存在高频噪声,表现为光谱曲线出现许多细小毛刺,因此,需要对光谱曲线进行平滑处理。常用的光谱平滑方法有静态平均法、移动平均法、傅里叶级数近似等,本论文采用 9 点加权移动平均法对光谱反射率数据进行平滑去噪处理,根据距离中心点的距离远近对每个点赋予不同的权值,离中心点越近,权值越高^[7-8]。

$$R'_i = 0.04R_{i-4} + 0.08R_{i-3} + 0.12R_{i-2} + 0.16R_{i-1} + 0.2R_i + 0.16R_{i+1} + 0.12R_{i+2} + 0.08R_{i+3} + 0.04R_{i+4}$$

式中: R'_i 为该样本经平滑处理后的光谱反射率值,各

项系数为以 i 点为中心点的 9 个点不同的权值。

(3) 模型精度检验。利用偏最小二乘回归进行分析,以决定系数(Determination coefficient, R^2)评价土壤参数与原始光谱反射率特征光谱参量间的拟合效果。以实测值与模型预测值均方根误差(Root mean square error, RMSE)对模型验证精度进行评价。

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - y'_i)^2}{\sum (\bar{y} - y_i)^2}$$

式中: y_i 表示实测值; y'_i 表示模型预测值; \bar{y} 表示实测值算数平均值。在相同条件下,模型的決定系数越大,表明自变量和因变量拟合效果越好。

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - y)^2 \right]^{1/2}$$

式中: x 表示模型拟合值; y 表示田间观测值。

采用 Microsoft Excel 2010 对数据、图表进行处理,采用 SPSS(PASW Statistics 18)统计分析软件对数据进行统计分析,并使用 Duncan 新复极差法(SSR)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分参数相关性分析

土壤的电导率和含盐量均可从不同方面反映土壤盐渍化程度,电导率反映的是土壤中盐基离子或分子的数量,含盐量反映的是土壤中盐基离子或分子的质量^[13-15]。图1为不同取样点电导率与含盐量的相关性情况,电导率(x)与含盐量(y)之间存在正相关关系 $y = 2.49x + 5.84$,且相关性较高, $R^2 = 0.96$,达到显著水平,这与以前的研究结果^[12-16]一致,即自然土壤的电导率和含盐量之间具有较好的相关性,电导率测定比较方便快捷,可根据两者之间的线性关系,计算土壤含盐量,而彭杰等^[13]研究电导率和含盐量不一定存在较好相关性,这主要由于对于耕作土壤由于耕作、灌溉及管理因素不同引起土壤盐分组成的差异性,从而导致电导率和含盐量相关性减弱,即针对自然或者管理措施一致性的土壤,可利用电导率数据对含盐量数据进行快捷高效的反演研究。

2.2 土壤光谱特征与盐分参数相关性分析

部分样点数据经过 ViewSpecPro 软件加载运行后,对异常数据点进行剔除,对重复点进行算数平均后得出 350~2 500 nm 间土样光谱特点,各土壤样品的电导率和全盐含量与光谱反射率的相关系数如图2所示。通过图2可看出,各样品的电导率和全盐与反射率的相关系数表现趋势一致,呈现峰值和峰谷,并且在 1 800~2 100 nm 和 2 300~2 500 nm 水汽带出现密集波动,该区域不被作为评价区域。各光谱与

电导率之间相关系数的取值范围为 0.60~0.80;与全盐含量相关系数的取值范围为 0.54~0.74。在整个 350~2 500 nm 波段,土壤指标与光谱反射率拟合特征相关性不显著,在 350~1 000 nm 相关系数变化较大,相关性较好,故选取特征波段,对光谱特征的对数、倒数、一阶微分和对数一阶微分进行变换,选取敏感波段及系数进行遴选。

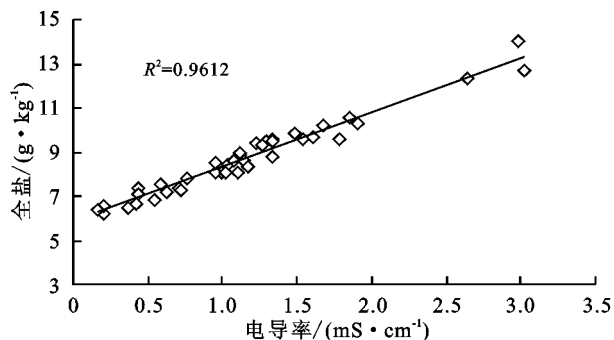


图1 土壤电导率和全盐的相关性分析

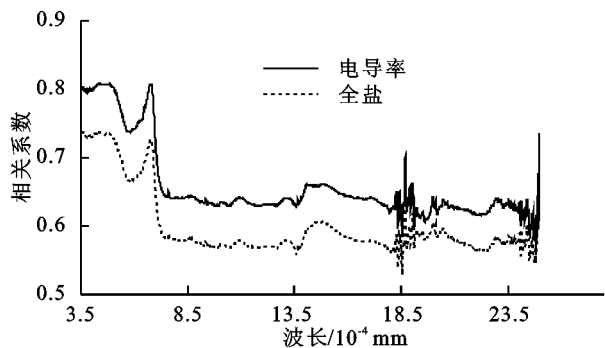


图2 光谱反射率与电导率和全盐含量相关系数分析

2.3 电导率与光谱变换特征精度分析

选取各土壤样品电导率数值在 350~1 000 nm 波段的反射率进行反演精度拟合分析,本部分的数据采取与多元逐步线性回归建模时相同的预处理。确定回归所用成分的个数是影响偏最小二乘回归模型性能的关键步骤。简单的方法是直接根据提取成分对目标变量方差的解释程度进行判断,与常见的主成分分析成分个数确定方法类似,但这种选择方法往往有失客观,不易得到最优预测模型。因此需要寻找一种更为客观和可靠的方法来进行成分个数的选择。为了避免“过拟合”现象,本研究通过逐一剔除交叉验证 R^2 的方法来优选引入主成分的个数,以利于模型的泛化。图3取主成分个数与建模决定系数之间的关系并且验证其反演精度。

光谱特征参量类型数据经过变换后,其在向量空间中的模式发生改变,对于后续的建立模型影响较大。本研究对反射率光谱的 4 种变换形式(倒数、对数、倒数的一阶微分、对数的一阶微分)分别建立了与土壤电导率之间的 PLSR 模型。4 种变换形式通过

PLSR 建立的电导率预测模型的评价指标见表 2。针对本研究的土壤样品光谱数据,所有变换形式中倒数的一阶微分变换对于提高模型预测性能最为显著,检验 R^2 达到 0.922 3, RMSE 达到 0.185 8,比原始光谱有比较大的提高,预测精度提高且准确率比较高;倒数变换下的效果最差,其建模和验证模型的 R^2 最低,说明该模型的预测精度变化幅度最大,效果最差。

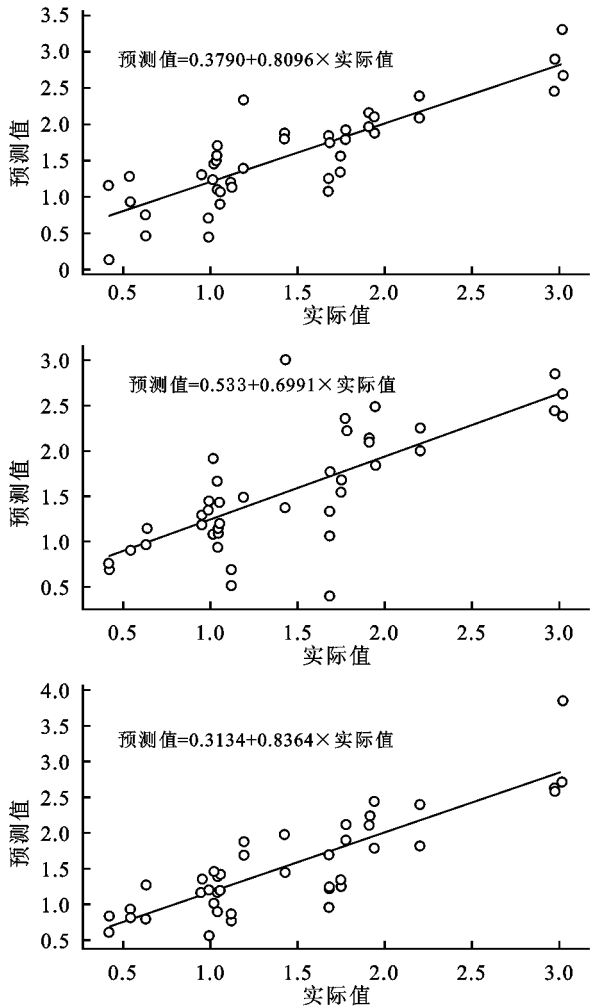


图 3 土壤电导率预测值与实测值比较

表 2 不同导数变换形式与土壤电导率的偏最小二乘回归分析结果

光谱特征 参量类型	拟合模型		验证模型	
	决定系数	均方	决定系数	均方
	R^2	根误差	R^2	根误差
R	0.8311ab	0.2612b	0.6831b	0.3621b
$1/R$	0.5753c	0.3432a	0.5831c	0.3012c
$\lg R$	0.8917b	0.2158ab	0.7182a	0.3587bc
$(\lg R)'$	0.9177a	0.1908c	0.5581c	0.4401a
$(1/\lg R)'$	0.9223a	0.1858c	0.7245a	0.3647b

2.4 全盐量与光谱变换特征精度分析

全盐量的测定是定量描述土壤盐渍化程度的重要指标,但是对其的测定比较费时和费力,如果能

较好地预测该指标的数量,对快速分析土壤盐分含量具有积极的促进作用。通过对土壤样品 350~1 000 nm 波段的光谱反射率在 4 种变换方式下,利用偏最小二乘回归对其进行分析,利用建模处理,分析拟合模型和预测模型的区别,利用 R^2 和 RMSE 检验和评价模型的精确度。不同变换形式下,土壤全盐含量预测值和实测值的关系见图 4,整体拟合模型的精确度较土壤电导率较小,且表现也不尽相同。这主要是由于土壤样品的差异性和选择变换模式的灵敏度而决定的。

光谱的 4 种变换形式(倒数、对数、倒数的一阶微分、对数的一阶微分)分别建立了与土壤全盐含量之间的 PLSR 模型。4 种变换形式通过 PLSR 建立的电导率含量预测模型的评价指标见表 3。光谱反射率的一阶微分和其对数一阶微分建模拟合模型精度较其他变换形式的建模较好, R^2 取值为 0.90~0.92,且与其他处理间差异显著 ($p<0.05$),但是验证模型则综合考虑 R^2 和 RMSE,以光谱反射率和其对数一阶微分变换模式最佳,精度较高,其预测值(y)与实测值(x)之间的关系为 $y=2.34+0.76x$;用偏最小二乘法进行土壤全盐含量高光谱模型研究结果表明,采用不同的光谱预处理方法,运用 PLSR 建模所得模型的预测效果均较好,说明采用 PLSR 方法建立的模型具有一定的稳定性和可靠性,且在全盐量预测中主要以对数一阶微分建模为主,预测效果最佳。

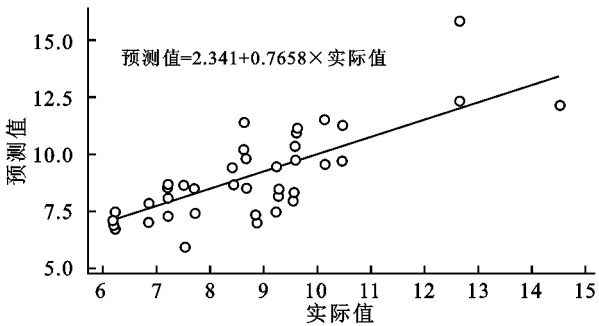


图 4 土壤全盐含量预测值与实测值比较

表 3 不同导数变换形式与土壤全盐含量的偏最小二乘回归分析结果

光谱特征 参量类型	拟合模型		验证模型	
	决定系数	均方根误差	决定系数	均方根误差
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
R	0.8426b	0.3259b	0.6479a	1.0677b
$1/R$	0.5534c	0.4910a	0.4784bc	0.9669ab
$\lg R$	0.8705ab	0.1693c	0.6189a	1.1726b
$(\lg R)'$	0.9216a	0.1359c	0.5414b	1.2011a
$(1/\lg R)'$	0.9032a	0.2893ab	0.6095a	1.2447a

3 结论与讨论

通过采集干旱地盐碱地土壤耕作层 80 个土壤样品,并分别测定土壤盐分参数即电导率和全盐含量,分析土壤样品盐分参数的相关性,并且对土壤盐分参数即全盐量和电导率与土壤光谱特征之间的关系进行了统计分析,遴选了 340~1 000 nm 土壤光谱的反射率,并且选择光谱 4 种变换方式,对不同变换方式下土壤全盐量与电导率的高光谱定量反演精度进行了对比、分析和筛选。

(1) 通过研究土壤样品电导率和含盐量,两者之间存在显著的正相关关系, $R^2=0.96$,且相关性较高,达到显著水平,这主要是由于该取样区域比较集中,且该区域的农田管理方法如耕作、种植及灌溉等措施较一致,这与李晓明^[11]等研究结果一致,但是与彭杰等^[16-19]研究结果不相同,这主要是土样选择区域的土地利用形式不一样而造成的。如水稻田土壤轻度盐渍化存在,由于耕作、灌溉等措施与玉米、小麦的截然不同,对其种植模式下土壤全盐量与电导率不存在必然的正相关关系,不能利用电导率数据来反演全盐量数据。

(2) 土壤盐分参数与土壤高光谱反射率的相关性曲线的表现趋势一致,敏感及特征波段所在位置相似。土壤盐分参数电导率与光谱数据的相关性显著高于全盐量。

(3) 利用偏最小二乘回归模型,以土壤样品电导率和全盐量建模时,其建模集和预测集的决定系数均大于以全盐量所建模型对应的决定系数;同时全盐量所建模型的均方根差则大于电导率所建模型的该指标。

参考文献:

- [1] 王遵亲,祝寿全,俞仁培,等. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [2] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报,2008,45(5):837-845.
- [3] Metternicht G I, Zinck J A. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints[J]. Remote Sensing of

Environment, 2003,85(1):1-20.

- [4] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000:183-188.
- [5] 丁建丽,伍漫春,刘海霞,等. 基于综合高光谱指数的区域土壤盐渍化监测研究[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(7):1918-1922.
- [6] 史舟,王乾龙,彭杰,等. 中国主要土壤高光谱反射特性分类与有机质光谱预测模型[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(5):978-988.
- [7] 何挺,王静,林宗坚,等. 土壤有机质光谱特征研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2006(11):975-979.
- [8] 何挺,王静,林宗坚,等. 土壤氧化铁光谱特征研究[J]. 地理与地理信息科学,2006,22(2):30-34.
- [9] 陈增文. 基于高光谱的土壤有机碳含量估算研究[D]. 福州:福建师范大学,2009.
- [10] 陈鹏飞,刘良云,王纪华,等. 近红外光谱技术实时测定土壤中总氮及磷含量的初步研究[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(2):295-298.
- [11] 李晓明,王曙光,韩霖昌. 基于 PLSR 的陕北土壤盐分高光谱反演[J]. 国土资源遥感,2014,26(3):113-116.
- [12] 张晓光,黄标,季峻峰,等. 基于可见近红外高光谱的东北盐渍土盐分定量模型研究[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(8):2075-2079.
- [13] 彭杰,王家强,向红英,等. 土壤含盐量与电导率的高光谱反演精度对比研究[J]. 2014,34(2):510-514.
- [14] 刘焕军,张柏,王宗明,等. 基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价[J]. 红外与毫米波学报,2008,27(2):138-142.
- [15] Dehaan R L, Taylor G R. A remote-sensing method of mapping soils and surficial lags from a deeply weathered and region, near Cobar, NSW, Australia [J]. Geochemistry Exploration Environment Analysis, 2004,4(2):99-112.
- [16] 王静,何挺,李玉环. 基于高光谱遥感技术的土地质量信息挖掘研究[J]. 遥感学报,2005,9(4):438-445.
- [17] 程街亮. 土壤高光谱遥感信息提取与二向反射模型研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [18] 程朋根,吴剑,李大军,等. 土壤有机质高光谱遥感和地统计定量预测[J]. 农业工程学报,2009,25(3):142-147.
- [19] 彭杰,刘焕军,史舟,等. 盐渍化土壤光谱特征的区域异质性及盐分反演[J]. 农业工程学报,2014,30(17):167-174.