

采用高光谱指数的龟裂碱土盐碱化信息提取与分析

关红¹, 贾科利^{1,2}, 张至楠¹

(1. 宁夏大学资源环境学院, 宁夏银川 750021;
2. 宁夏沙漠信息智能感知重点实验室, 宁夏银川 750021)

摘要: 以宁夏平罗县为研究对象, 将 Unispec-SC 便携式光谱仪测得的盐渍化光谱数据和实验室测得的土壤含盐量数据作为基础数据源。运用高光谱数据处理方法, 分析不同盐渍化地区植被的光谱特征曲线; 对实测植被、土壤光谱曲线进行对数、均方根和一阶微分等变换, 筛选与土壤含盐量相关性最好的变换形式和特征波段构造盐分指数 SI 及多种植被指数, 利用多元非线性回归分析建立土壤盐渍化遥感监测模型。结果表明: 土壤、植被光谱一阶微分变换与土壤含盐量响应敏感; 协同盐分指数 SI 和植被指数 MSAVI 构造的土壤盐渍化指数模型, 模拟值和实测值相关系数达到 0.758 9, 模拟效果很好, 实现快速提取该区域的土壤盐渍化信息。

关键词: 光谱特征波段; 盐分指数; 植被指数; 土壤盐渍化

中图分类号: P751.1; P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4153-06

Analysis and extraction of takyr solonetz salinization information based on hyperspectral indices

Guan Hong¹, Jia Keli^{1,2}, Zhang Zhinan¹

(1. College of Resource and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;
2. Ningxia Key Laboratory of Intelligent Sensing for Desert Information, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In the present study, Pingluo of Ningxia Province in China was taken as the study area, and spectral data obtained by Unispec-SC, the value of soil salt content measured by experiment were taken as the basic data. Hyper-spectral data processing method was used to analyze spectral characteristics of different levels of salinization area vegetation. Spectral data were transformed in 16 different approaches, including logarithm, root mean squares, and first order differentiation. Correlation analysis was carried out between the obtained spectra and soil salinity. The most sensitive bands was selected, soil index and vegetation index were built. Nonlinear regression was employed to establish soil salinization remote sensing monitoring model. The results show that by comparing various spectral transformations, the first order differential of soil spectral was the most sensitive to soil salinization degrees. The model was based on the spectral index, including SI and MSAVI, and it could monitor soil salinization accurately. The correlation between simulated values and measured values was 0.758 9. The soil salinization could be achieved rapidly in the area.

Key words: spectral characteristics band; salt index; vegetation index; soil salinization

收稿日期: 2014-04-05; 修订日期: 2014-05-03

基金项目: 宁夏自然科学基金(NZ13014)

作者简介: 关红(1990-), 女, 硕士生, 主要从事土壤遥感方面的研究。Email: guanhong0426@163.com

导师简介: 贾科利(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事遥感和 GIS 应用方面的研究。Email: jiakeli@163.com

0 引言

土壤盐渍化是干旱、半干旱地区农业发展主要的障碍因子,不但造成生态环境恶化、农作物产量下降,而且对生态环境和生物圈构成了严重的威胁^[1]。土壤盐渍化通常存在较强的空间异质性,因此遥感技术在监测方面具有重要的应用价值。

遥感利用土壤的电磁波谱,能够快速获取广泛、多波段、多时相的土壤信息。伴随着遥感数据分辨率的提高,数据源的丰富,不同类型的数据已成功应用到土壤盐渍化的动态监测。尤其是高光谱数据,能够获取纳米级连续的光谱信息,反映地物的细微特征。近年来,国内外学者利用光谱技术定量半定量地研究土壤盐渍化及土壤特性的报道较多。姚远等以实测的土壤光谱数据与盐分数据建立建立盐分指数,并且与 TM 影像结合提取土壤盐渍化信息,与传统的多光谱影像提取相比其反演精度和检测水平明显提高^[2];张芳等利用实测反射率和影像反射率值对土壤碱化进行了预测对比,结果表明,以实测反射率值为基础数据构建的模型对 pH 的预测精度较高^[3]。贾科利等利用植被冠层的植被指数对龟裂碱土盐碱化信息进行预测,结果表明水稻冠层植被指数可以准确的预测龟裂碱土的碱化程度^[4]。然而大部分学者仅考虑裸土光谱信息,较少综合考虑植被信息对盐渍化土壤光谱的间接影响。土壤盐碱成分过多,会导致植被作物脱水,甚至死亡,所以,在盐渍化地区,植被覆盖度可以作为一个很好的盐渍化程度间接指标。

根据前人的研究成果,以野外原位光谱测量数据和土壤含盐量为基础,分析不同盐渍化程度地区植被光谱特征曲线,利用红边特征、绿峰特征^[5]和导数光谱等研究不同盐渍化程度下植被的光谱特征;根据相关系数确定土壤盐渍化的特征波段,建立盐分指数及植被指数,协调两者构建盐渍化的多元非线性估测模型,提取盐渍化信息。通过实测数据对模型进行验证,为高精度盐渍化信息提取提供更加有效的方法。

1 材料与方 法

1.1 研究地概括

试验地地处宁夏回族自治区平罗县西大滩(E 106°24'20", N 38°50'28"),多年平均降雨量约为

150~203 mm,而年均蒸发量为 1 709.0 mm,蒸降比为 10 左右。该地区位于宁夏贺兰山东麓洪积扇和平原之间,因地形低洼、气候相对干旱、地下水位较高导致该地区土壤盐渍化严重,其中大部分是龟裂碱土。龟裂碱土俗称白僵土,具有较高的碱度,是在荒漠草原条件下经过盐土脱盐和水蚀风蚀作用下形成的碱化土壤,土壤理化性质较差。

1.2 数据采集

光谱测定时间为 2013 年 9 月,对不同盐渍化程度的裸土、植被进行了光谱测定,盐渍化程度较低的地表被水稻、苜蓿、枸杞等植被覆盖,盐渍化程度较高多为撂荒地,主要以盐蒿、冰草等杂草覆盖。光谱测定采用美国 Unispec-SC 便携式光谱仪,波段为 310~1 130 nm,在天气晴朗,无风无云、10:00~14:00 之间进行,测定时光谱仪探头设置在距离地物 0.15 m 处,使仪器视场角减小,降低土壤光谱和植被光谱的噪音影响;仪器垂直向下,每次观测前进行标准白板校正。实验最终获取数据采集单元 84 个(植被样本 42 个、土壤样本 42 个)。

测定土壤光谱的同时采集 0~20 cm 的土壤样品,用电导仪测定土壤样品电导率和土壤 pH 值,建立可溶性全盐含量与电导率的线性关系,计算土壤含盐量。根据王遵守等土壤盐渍化分级方法,及野外实测采集样点分布情况,确定此次研究的土壤盐渍化分级标准。非盐化土壤(<2 g/kg),轻度盐化土(2~3 g/kg),中度盐化土(3~5 g/kg),重度盐化土(≥ 10 g/kg),单位 g/kg。

1.3 预测模型的建立与验证

将 42 个样本(植被及土壤光谱)分两部分,随机选取 30 个样本用于建模,12 个样本数据用于验证模型的性能。将拟合度系数 R² 作为回归模型拟合度的重要指标,R² 越大,回归的规律性越强、效果越好;将趋势面拟合度 F (估测模型中土壤含盐量的总离差平方和回归平方和的比值)检验作为趋势面整体的显著性检验。模型的模拟值和测量值之间的相关系数越大,模拟值和测量值之间的偏差越小,一致性越好,精度越可靠。

2 结果与分析

2.1 光谱数据分析

2.1.1 原始光谱

为保证地物测量的真实性,在每一个采样点取

3 次平均值作为该点的光谱反射值。采用 Savitzky-Golay 滤波 (基于最小二乘拟合的多项式低通平滑滤波)方法对光谱曲线进行平滑去噪处理。由图 1 可知, 植被在蓝光和红光有强烈的吸收, 在绿光波段有小的反射峰, 近红外波段呈现高反射等显著的特点, 光谱曲线具有明显的波峰波谷, 整体上不同盐渍化程度地区植被的光谱特征曲线形态上趋于一致, 但随着盐渍化程度加大, 植被光谱在可见光波段呈升高趋势, 在近红外波段反而降低, 但并不呈现规律变化。重度盐渍化土壤上覆被植被冠层的光谱反射曲线最平缓。

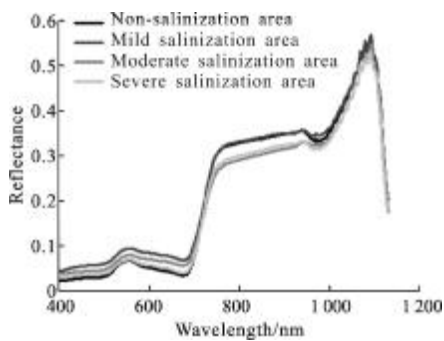


图 1 不同盐渍化程度植被的光谱特征曲线
Fig.1 Vegetation spectral characteristic curves for different salinization degrees

2.1.2 一阶导数光谱

光谱的微分技术可以迅速地确定光谱转折点及最大、最小反射率的波长位置。能够消除背景、光照因素的影响, 尤其在植被稀疏、混合光谱成分多的地区, 是一种消除背景、提取光谱特征的好方法^[6]。相对植被的光谱曲线, 土壤的光谱曲线变化平缓, 其导数值很小, 而植被则完全不同, 由于叶绿素强烈吸收红光的作用, 在 670~800 nm 附近呈现急剧上升的状态, 且导数值较大, 而土壤在这范围内导数接近为 0, 利用这一特点, 可以消除土壤背景信号对植被光谱的影响。光谱一阶微分定义及计算详见参考文献[7]。图 2 为在红边参数范围内, 植被一阶微分变换反射率。

由图 2 可知, 对 680~780 nm 光谱范围内, 植被一阶导数光谱呈现明显的“双峰”现象, “主峰”集中在 730 nm 附近, “次峰”集中在 760 nm 附近, 主峰波长小于次峰波长。随着盐渍化程度的增加, 植被冠层覆盖度下降, 土壤背景的影响增加, 双峰现象越来越不明显; 随着盐渍化程度增加, 红边参数位置(即一阶导数最大值对应波长)逐渐左移, 呈现“蓝移”; 红

边参数的幅值(一阶导数最大值)逐渐下降; 红边参数峰值面积 (680~780 nm 之间的一阶导数光谱包围的面积)逐渐减少。

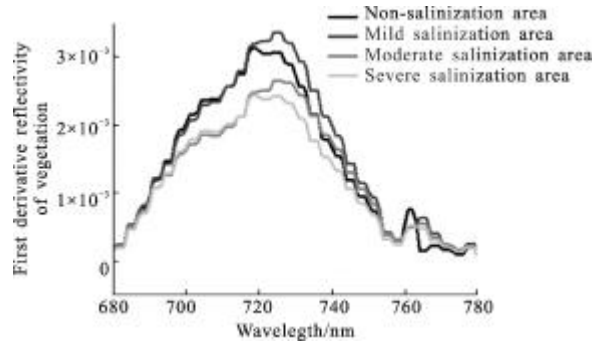


图 2 植被的一阶光谱变换反射率
Fig.2 First derivative reflectivity of vegetation

2.1.3 相关性分析及特征波段的确定

为了更好地分析植被覆盖区土壤、植被光谱数据和土壤含盐量之间的相关关系, 筛选对土壤盐分反应更加敏感的光谱特征波段, 此实验对土壤(植被)光谱反射率分别进行对数、对数倒数、均方根及一阶微分等变换并进行同步分析。将土壤(植被)原始反射率、反射率一阶微分变换、对数变换、对数一阶微分变换、对数倒数变换、对数倒数一阶微分变换、均方根变换、均方根一阶微分变换作为光谱指标。

通过光谱指标与土壤含盐量进行相关性分析, 计算土壤和植被光谱特征曲线上每个波段与实测土壤含盐量的相关系数 r , 如公式(1)所示:

$$r_j = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{ij} - \bar{R}_j)(SC_i - \bar{SC})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{ij} - \bar{R}_j)^2 \sum_{i=1}^n (SC_i - \bar{SC})^2}} \quad (1)$$

式中: r_j 为实验室测得的土壤含盐量和光谱指标的相关系数; j 为波段号; R_{ij} 为第 i 个土壤采样单元第 j 波段的反射率值(及其变换形式的值); \bar{R}_j 为 n 个土壤采样单元在 j 波段的平均值; SC_i 为第 i 个土壤样本的盐分含量; \bar{SC} 为土壤样本含盐量的平均值; n 为土壤采样个数, 实验中 n 为 30。相关结果见图 3。

相关系数是根据要素之间的样本值计算出来的, 它随着样本数的多少或取样方式不同而不同, 因此只有通过检验, 才能知道它的可信度。从图 3 分析可知, 所有类型的光谱反射率进行微分变换后, 与土壤含盐量之间的相关性明显提高。根据相关性最大

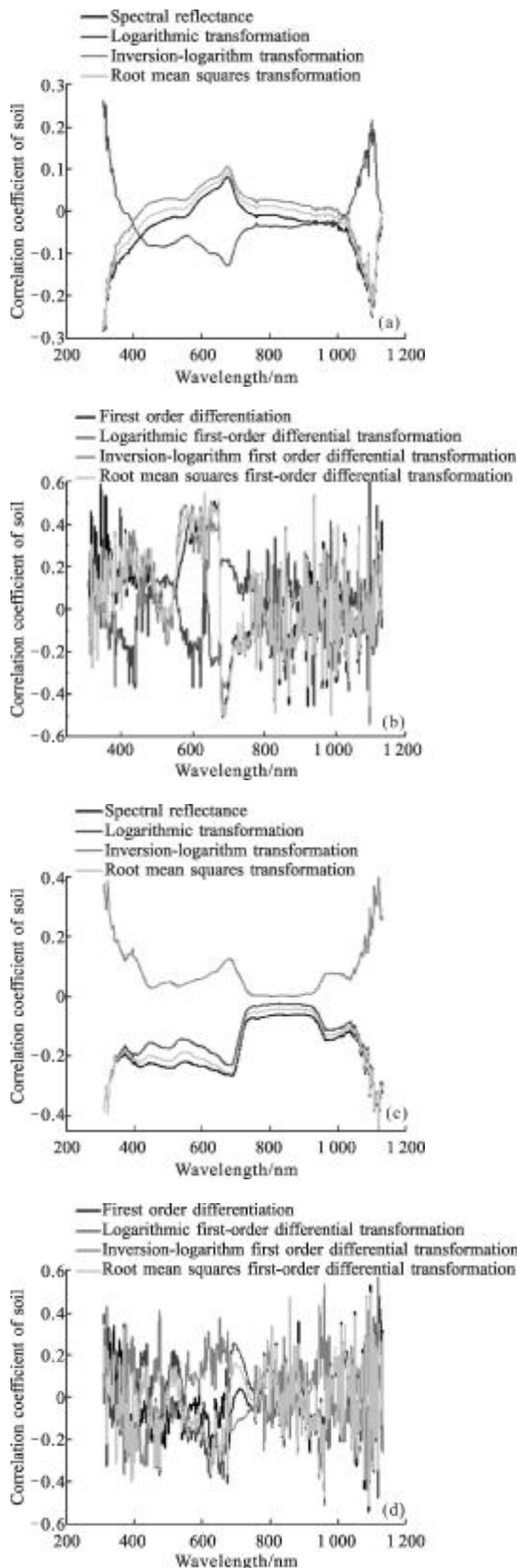


图 3 光谱指标与土壤含盐量的相关系数

Fig.3 Correlation coefficients between spectral indices and soil salinity

原则确定特征波段,因此只考虑一阶微分光谱与土壤含盐量的相关系数。土壤一阶微分反射率在 450 nm、685 nm 相关系数较高;植被一阶微分反射率在 960 nm 和 1 094 nm 相关系数较高,且通过了 0.01 显著性水平检验,选择以上波段作为土壤含盐量的特征波段。

2.2 土壤盐分模型的建立与验证

2.2.1 光谱指数的计算

土壤盐分指数可以反映土壤盐分的分布状况,利用与土壤含盐量相关性最大的特征波段构建高光谱土壤盐分指数在盐渍化提取和检测等方面均有较大优势^[8-9],构建盐分指数 SI 与实测土壤含盐量的相关系数 R 为 -0.587,通过了 0.01 水平显著性检验,可以用来反演土壤含盐量。

$$SI = \sqrt{R_{450}^2 + R_{685}^2} \quad (2)$$

盐渍化程度的主要危害性表现在影响植物的生长,植物的生长遭到破坏,可以通过植被指数的变化识别盐渍化的程度,实验主要选择 5 个常用植被指数,依次是简单的比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)、差值植被指数(DVI)以及基于土壤线的植被指数:土壤调整植被指数(SAVI)、改进土壤调整植被指数(MSAVI)、优化土壤调整植被指数(OSAVI)等。

通过选取的特征波段计算 5 种植被指数,同时与土壤含盐量进行相关分析,结果见表 1。由表可知,MSAVI 的相关系数最大,因此,实验以此为基础建立最优土壤盐渍化指数模型。

表 1 植被指数与土壤含盐量的相关系数

Tab.1 Correlation coefficients between spectral vegetation index and soil salt content

Vegetation indices equation	R ²
$NDVI = (R_{1118} - R_{682}) / (R_{1118} + R_{682})$	-0.56 ^①
$SAVI = (1 + 0.5) \times (R_{1118} - R_{682}) / (R_{1118} + R_{682})$	0.57 ^①
$RVI = R_{1118} / R_{682}$	-0.07
$MSAVI = 0.5 \times [2R_{1118} + 1 - \sqrt{(2R_{1118} + 1)^2 - 8(R_{1118} - R_{682})}]$	-0.59 ^①
$OSAVI = (1 + 0.16) \times (R_{1118} - R_{682}) / (R_{1118} + R_{682} + 0.16)$	0.56 ^①
$DVI = R_{1118} - R_{682}$	0.57 ^①

① 在 0.01 水平上显著相关(n=30)。

2.2.2 基于综合光谱指数的土壤盐渍化遥感监测模型的建立

回归分析是一种广泛应用的定量分析方法,它用于分析事物之间的统计关系,有助于准确了解变量与其他多个变量的影响程度,以土壤含盐量为因变量,盐分指数和植被指数作为自变量,进行多元非线性回归(趋势面分析),结果表明:土壤含盐量和两指数之间具有良好的非线性关系,建立的模型中 R^2 为 0.747, F 为 6.3。通过了 0.01 水平显著性检验。

$$y=15\ 330\ 091.35x_1^2-275.215x_2^2-33\ 646.03x_1x_2+310.54$$

式中: x_1 为盐分指数; x_2 为植被指数。

2.2.3 模型验证

以未参与建模的 12 个土壤样本单元为准真值,对反演模型进行检验,由图 4 可以看出,建模样本基本上聚集在对角线附近,为 0.7589,剔出个别异常点外,模拟值和实测值的一致性较好,因此文中建立的模型是有效的,且通过了检验,可以用来预测土壤全盐含量。

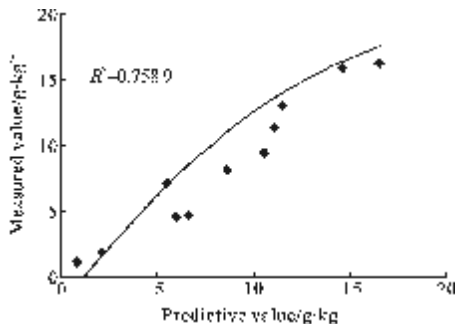


图 4 模型预测值与实测值分布散点图

Fig.4 Correlation coefficient of measured soil salinity and predicted value

3 结论与建议

3.1 结论

综上所述,可以得出以下结论:

(1) 不同盐渍化地区植被光谱特征曲线形态上趋于一致,但随着盐渍化程度加大,植被光谱在可见光波段反射率增大,近红外波段反射率减小。

(2) 在 680~780 nm(红边参数范围)随着盐渍化程度的增加土壤背景对植被光谱的影响逐渐增大。

(3) 变换后的土壤和植被光谱,其中倒数、对数、一阶微分变换的光谱反射率与实验室测得的土壤含盐量相关性最好。选择相关性最好的特征波段 450 nm、

685 nm 构建盐分指数模型及选择 960 nm 和 1094 nm 构建植被指数模型,结果表明:两者和土壤含盐量的相关性较高,因此,协同两指数构建区域的土壤盐渍化遥感监测模型,经验证,模拟效果很好,可以用来快速提取该区域的土壤盐渍化信息,为今后土壤盐渍化监测提供一种新的手段。

3.2 建议

该模型构建了表征地表盐渍化土壤信息的植被指数-盐分指数特征空间,建立了具有明确物理意义的土壤盐渍化遥感模型。且能避免传统光谱数据带来的滞后性问题,在不同尺度上均能定量监测土壤盐渍化。但土壤光谱中包含的信息相对复杂,野外原位土壤样本存在较大的差异等因素,都会影响模型的精度,因此,在下一阶段将继续研究不同盐渍化程度及覆盖程度之间的光谱差异性,揭示不同覆被冠层光谱对盐渍土壤的影响。

参考文献:

- [1] Weng Yongling, Gong Peng. A review on remote sensing technique for Sali-affected soils [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 3: 369-375. (in Chinese)
翁永玲, 宫鹏. 土壤盐渍化遥感应用研究进展 [J]. *地理科学*, 2006, 3: 369-375.
- [2] Yao Yuan, Ding Jianli, Ardak-Kelimu, et al. Research on remote sensing monitoring of soil salinization based on measured hyperspectral and EM38 data [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(7): 1917-1921. (in Chinese)
姚远, 丁建丽, 阿尔达-克里木, 等. 基于实测高光谱和电磁感应数据的区域土壤盐渍化遥感监测研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(7): 1917-1921.
- [3] Zhang Fang, Xiong Heigang, Luan Fuming, et al. Characteristics of field-measured spectral response to alkalization soil [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(1): 55-60. (in Chinese)
张芳, 熊黑钢, 栾福明, 等. 土壤碱化的实测光谱响应特征 [J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(1): 55-60.
- [4] Jia Keli, Zhang Junhua. Prediction of the salinity information of Takyr Solonchaks based on the spectral characteristics of rice Canopy Indexes [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(2): 281-285. (in Chinese)
贾科利, 张俊华. 基于水稻冠层植被指数的龟裂碱土盐碱化信息预测研究 [J]. *土壤通报*, 2012, 43(2): 281-285.
- [5] Qiong Yurong, Jia Zhenhong, Yu Jiong, et al. Application of

- BP-ANN to classification of hyperspectral grassland in desert [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(12): 225-228. (in Chinese)
- 钱育蓉, 贾振红, 于炯, 等. BP-ANN 在荒漠草地高光谱分类研究中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(12): 225-228.
- [6] Yang Kai, Shen Weishou, Liu Bo, et al. Research on spectral reflectance characteristics for Naqu typical grassland [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(1): 40-45. (in Chinese)
- 杨凯, 沈渭寿, 刘波, 等. 那曲典型草地植被光谱特征分析 [J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(1): 40-45.
- [7] Qian Yurong, Yang Feng, Li Jianlong, et al. Estimation of photosynthetic pigment of *Festuca arundinacea* using hyperspectral data [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18 (4): 94-102. (in Chinese)
- 钱育蓉, 杨峰, 李建龙, 等. 利用高光谱数据快速估算高羊茅牧草光合色素的研究 [J]. *草业学报*, 2009, 18(4): 94-102.
- [8] Li Ziyang, Qian Yonggang, Shen Qingfeng, et al. Leaf area index retrieval from remotely sensed hyper spectral data [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (3): 944-949. (in Chinese)
- 李子扬, 钱永刚, 申庆丰, 等. 基于高光谱数据的叶面积指数遥感反演[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 944-949.
- [9] Lei Lei, Tiyp T, Ding Jiangli, et al. Soil salinization information extraction by using hyperspectral data of HJ-1A HIS: A case study in the Oasis of Ugan and Kuqa, Xinjiang, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(4): 1104-1109. (in Chinese)
- 雷磊, 塔西普拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 基于 HJ-1A 高光谱影响的盐渍化土壤信息提取--以渭干河-库车河绿洲为例[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(4): 1104-1109.