

# 玛纳斯河流域土壤盐渍化现状 及其与光谱关系研究

李娜 吴玲\* 王绍明 夏军 朱宏伟

(石河子大学 生命科学学院 新疆 石河子 832003)

**摘要:**以玛纳斯河流域为研究对象,选择冲积洪积扇、冲积平原和三角洲3种主要地貌类型为研究区域,利用便携式光谱仪测量土壤光谱反射率,结合土壤盐分因子数据进行统计分析,探讨玛纳斯河流域土壤盐渍化现状特征及其与土壤光谱之间的关系。结果表明:研究区土壤盐分组成具有明显的地域性特点;在少数光谱波段,3种地貌类型的含盐量及占优势的盐离子均与光谱反射率呈显著相关,在此基础上,建立多元线性回归模型,为玛纳斯河流域地物光谱数据库的建立及土壤盐渍化的遥感监测提供科学依据。

**关键词:**玛纳斯河流域;土壤盐渍化;盐离子;光谱

中图分类号:S156.4 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2011)06-1242-06

## Analysis on Relationships between Soil Salinization and Spectra in Manas River Valley

LI Na, WU Ling\*, WANG Shao-ming, XIA Jun, ZHU Hong-wei

(College of Life Science, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** Taking Manas River Valley as an example, three landform types of alluvial proluvial fan, alluvial plain and delta were selected for the study targets, portable spectrometer was used to measure the soil spectral reflectance, combined with the statistical data of soil salinity, the soil salinity status characteristics and the relationship between soil spectrum in Manas River Basin were approached. The results showed that: in the studied region the composition of soil salinity has obvious regional characteristics; in a small number of spectral bands, the salt content and the dominant salt-ions of the three landform types are significantly correlated with the spectral reflectance. On this foundation, multiple linear regression model is established, thus providing a scientific basis for the establishment of spectral database and remote sensing monitoring of soil salinization in Mans River Valley.

**Key words:** Manas River Valley; soil salinization; saltion; spectra

土壤盐渍化现象通常发生在气候干旱、土壤水分蒸发强度大、地下水位高且含有较多可溶性盐类的干旱、半干旱地区,目前已成为全球重要的环境和社会经济问题之一<sup>[1]</sup>。而遥感这种高新技术能够在不受地面条件限制的情况下,大范围的获取对地观测数据,且获取信息时间短、精度高,现已被广泛应用于土壤盐渍化的动态监测中。

收稿日期:2011-09-01 修回日期:2011-10-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(973项目)(2009CB825101)、石河子大学自然科学研究与技术创新项目(ZRXX2010YB10)和石河子大学研究生创新基金项目(YJCX2010-Z05)

作者简介:李娜(1986—),女,硕士生,主要从事植物生态研究,E-mail:ln8607@163.com;\* 通讯作者:吴玲,副教授,E-mail:lingw@shzu.edu.cn。

在土壤盐渍化遥感监测研究中,土壤的光谱特征是盐渍化土壤识别与分类的基础,其依据是不同盐渍化土壤的光谱特征具有明显的差异性<sup>[2-3]</sup>。因此,探讨土壤因子与光谱特征之间的关系已成为土壤遥感监测中的一个重要环节。如 Etienne Muller 等<sup>[4]</sup>于 2000 年建立了土壤光谱特征与土壤含水量的关系模型; Metternicht 等<sup>[5]</sup>从表层土壤结构、颜色、植被多个方面分析了土壤盐碱化遥感监测的影响因素; 刘焕军等<sup>[6]</sup>运用统计学方法分析了松嫩平原主要土壤参数与土壤光谱反射率的关系,并得到土壤有机质高光谱预测模型; 马诺等<sup>[2]</sup>以焉耆盆地部分地区为研究区域,分析了盐渍化土壤的光谱特征; 王树东等<sup>[7]</sup>研究探讨了塔里木河流域几种典型地物的光谱数据及其变化规律; 孙宁等<sup>[8]</sup>以青海高寒区的 4 种主要土壤类型为观测对象,分析了有机质和氧化铁共同影响下土壤光谱特征的变化规律。

玛纳斯河流域位于 85°01′~86°32′E, 43°27′~45°21′N。地处新疆天山北麓准噶尔盆地南缘,流域面积  $3.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,地势南高北低,属典型山盆系统结构。全流域从东到西由塔西河、玛纳斯河、宁家河、金沟河、巴音沟河等五条较大的河流构成。该区地处亚欧内陆腹地,年平均降水量 110~200 mm,且分布不均,年平均蒸发量 1 500~2 100 mm,蒸发量远大于降水量。年平均气温 4.7~5.7 °C,属于典型的温带大陆性干旱气候<sup>[9-10]</sup>。

近些年来,随着经济的迅速发展,人口数量的急剧增加,人类大范围的开发利用土地,由此产生的次生盐渍化现象越来越明显,严重制约着干旱区绿洲农业的发展,对于土壤盐渍化的研究已成为干旱区生态环境研究治理的重要方面。本文以玛纳斯河流域为研究对象,根据玛纳斯河流域地形地势的不同,自上游至下游依次选取冲积扇、冲积平原、干三角洲 3 种主要地貌类型为样带,结合野外采集的光谱数据和室内测定的土壤理化因子特征,以探讨土壤盐渍化现状与光谱数据之间的关系,为该地区土壤盐渍化遥感动态监测提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 样地介绍

本研究分别以冲积扇、冲积平原、干三角洲 3 种主要地貌类型为样带,各样带位于玛纳斯河流域具体区域如图 1 所示,各样地基本概况见表 1。

### 1.2 光谱数据采集

利用美国 ASD 公司开发的 ASD 便携式野外高光谱仪,其有效光谱范围为 350~2 500 nm,光谱扫描最快速率为 0.1 s。于 2010 年 8—9 月进行光谱数据采集,因为此时生物量最大,且土壤正值秋季反盐期,光谱特征明显,有利于盐渍化光谱信息的提取<sup>[11-12]</sup>。为了减少光照、太阳高度角等因素对地物反射率的影响,光谱采集时选择晴朗无云的天气,测定时间为北京时间 12:00—14:00。光谱测量时,高光谱仪上 1.4 m 的光纤式探头始终与地面保持垂直,高度在 1 m 左右,各采样点采集光谱之前都要进行白板校正,且确保光谱采集时土壤表层无植被遮挡光线。每个样带各选取 30 个样点,呈 S 形取样。土样采集布点时,尽量使得采样点能覆盖整个样地,结合 GPS 定位工具,以典型性和均匀性为基础,每个采样点采集 5 个表层土壤光谱数据,取其平均值作为该采样点的光谱数据指标,尽可能减小同一样地中各采样点之间的差异。同时记录各样带的基本概况。光谱波段在 400~900 nm 已经包括了遥感常用的可见光和近红外波段,且实测数据在此波段也较好,因此,本文在数据分析时,重点分析了此波段间的光谱数据特征。

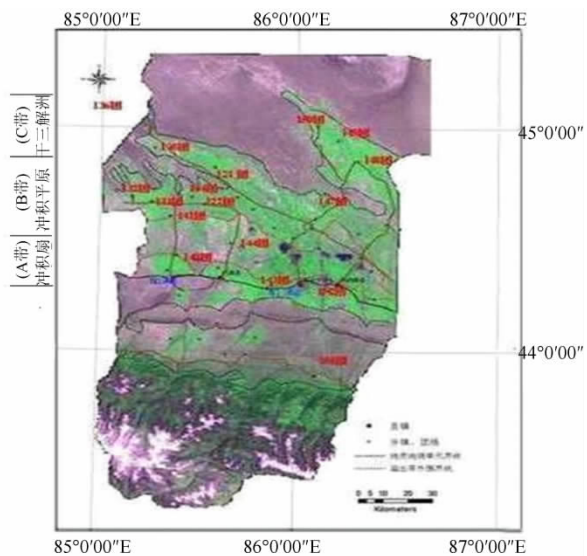


图 1 玛纳斯河流域示意图

Fig. 1 The figure of Manas River Valley

表 1 不同地貌样带基本情况

Tab.1 Survey of samples in different physiognomy

样带编号 Sample No.	地貌 Physiognomy	涵盖乡镇 Cover town	海拔/m Elevation	植被类型 Vegetation types	地表特征 Surface features
A	冲积扇	141 团、142 团	400	芦苇( <i>Phragmites australis</i> )	地表盐霜
		143 团、144 团		花花柴( <i>Karelinia caspica</i> ) 猪毛菜( <i>Salsola</i> spp.)	
B	冲积平原	121 团、122 团、132 团	340	盐穗木( <i>Halostachys caspica</i> )	地表盐结皮
		133 团、134 团、147 团		骆驼刺( <i>Alhagi sparsifolia</i> ) 琵琶柴( <i>Reaumuria soongorica</i> )	
C	干三角洲	136 团、148 团	300	白刺( <i>Nitraria</i> spp.) 碱蓬( <i>Suaeda</i> spp.)	地表盐斑

1.3 土壤样品采集

待采样点光谱数据采集动作完成后,进行土壤样品采集。取 0~10 cm 表层土壤,将土样带回实验室备用。

1.4 土壤样品理化性质测定

将土样风干,碾碎,过 1 mm 筛。然后按  $m(\text{土}):m(\text{水})=1:5$  制备待测液,浸提后,分别用电导仪(上海精科, DJ-320)和 pH 计(上海精科, PHS-3C),测定土壤电导率和 pH 值。 $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  采用双指示剂中和法滴定;  $\text{Cl}^-$  采用  $\text{AgNO}_3$  滴定法测定;  $\text{SO}_4^{2-}$  采用 EDTA 间接滴定法测定;  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  采用 EDTA 络合滴定法测定;  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  采用火焰光度计测定。

1.5 数据处理

运用 Excel 2007 对土壤各特征指标及光谱数据进行统计分析并绘图;利用 SPSS 16.0 软件分析各土壤盐分因子与光谱特征之间的相关性,并做最优回归模型。

2 结果与分析

2.1 土壤盐渍化类型分析

根据新疆盐渍土等级划分标准<sup>[13]</sup>和  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  的当量比<sup>[14]</sup>对玛纳斯河流域 3 种地貌的盐渍土进行归类(表 2)。可以看出,位于冲积洪积扇扇缘的 A 地势带,属于重度硫酸盐化土;位于冲积平原的地势 B 带属于中度硫酸盐—氯化物盐化土;位于干三角洲的地势 C 带属于中度氯化物盐化土。即玛纳斯河流域从中上游至下游地带,盐渍化程度逐渐降低,土壤盐分组成也逐渐由硫酸盐向氯化物盐过渡。

表 2 3 种地貌土壤的盐渍化程度

Tab.2 The soil salinization degree of three landscape types

样带 Sample	含盐量/% Salt content	盐化程度 Salinization degrees	$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 当量比	盐渍化类型 Salinization types
A	1.51	重度盐化土	0.18	硫酸盐
B	0.84	中度盐化土	1.17	硫酸盐—氯化物
C	0.61	中偏轻度盐化土	3.04	氯化物

一般而言,用变异系数(CV)值来反映随机变量的离散程度,也就是土壤特性空间变异性的。变异系数分为 3 等:  $\text{CV} \leq 10\%$  为弱变异性,  $10\% < \text{CV} < 100\%$  为中等变异性,  $\text{CV} \geq 100\%$  为强变异性。由表 3 可知,3 种地貌土壤的 pH 变异系数均为弱变异性,而就可溶性盐离子而言,样带 A 的可溶性盐离子中  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  属强变异性,其余为中等变异性;样带 B 中  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  属强变异性,其余为中等变异性;样带 C 中  $\text{CO}_3^{2-}$  属强变异性,其余为中等变异性。

从可溶性盐离子含量上进行比较,3 种地貌土壤内的离子含量存在一定的差异。样带 A 土壤的优

势阴、阳离子分别是  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ ; 样带 B 土壤的优势阴离子是  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  阳离子主要是  $\text{Na}^+$ , 其次是  $\text{Mg}^{2+}$ ; 样带 C 土壤的优势阴、阳离子分别是  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 。

表 3 3 种地貌土壤各项指标统计特征参数

Tab.3 Statistical parameter of soil characteristic value of three landscape types

样带 Sample plots	统计值 Statistical values	pH	含盐量/% Salt content	$\text{Na}^+$ / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{K}^+$ / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{Ca}^{2+}$ / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{Mg}^{2+}$ / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{Cl}^-$ / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{SO}_4^{2-}$ / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{HCO}_3^-$ / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{CO}_3^{2-}$ / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
A	最小值/%	8.08	1.27	0.38	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00
	最大值/%	9.50	1.70	8.19	0.27	0.12	1.17	0.46	1.65	0.08	0.01
	均值/%	9.10	1.51	2.02	0.07	0.04	0.05	0.07	0.39	0.03	0.01
	标准差 S. D	0.25	3.70	1.66	0.05	0.03	0.21	0.09	0.36	0.01	0.00
	变异系数 CV/%	2.75	23.02	82.18	71.43	75.00	140.00	128.57	92.31	33.33	177.33
B	最小值/%	8.02	0.68	0.26	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.02	0.00
	最大值/%	8.88	0.92	2.03	0.07	0.11	0.27	0.21	0.14	0.04	0.01
	均值/%	8.47	0.84	0.99	0.04	0.05	0.10	0.07	0.06	0.03	0.00
	标准差 S. D	0.28	4.34	0.60	0.02	0.04	0.08	0.06	0.04	0.00	0.02
	变异系数 CV/%	3.3	29.58	60.60	50.00	80.00	125.00	85.71	66.67	12.00	220.01
C	最小值/%	7.85	0.41	0.38	0.05	0.00	0.01	0.02	0.01	0.03	0.00
	最大值/%	9.23	0.73	1.91	0.27	0.18	0.05	0.11	0.04	0.07	0.05
	均值/%	8.58	0.61	1.05	0.08	0.05	0.03	0.06	0.02	0.05	0.01
	标准差 S. D	0.39	4.45	0.44	0.05	0.04	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02
	变异系数 CV/%	4.55	39.59	41.90	62.50	80.00	33.33	66.67	50.04	40.00	200.0

### 2.2 玛纳斯河流域光谱特征分析

2.2.1 典型地物光谱 根据野外实测光谱数据作出不同地物光谱曲线图(图2),可以看出,不同地物的光谱数值是不同的。盐渍土、水体与沙漠的光谱曲线变化均是平滑缓慢,盐渍土的光谱值最高,其次是水体和沙漠。

2.2.2 盐渍化土壤的光谱曲线 由图3可以看出,玛纳斯河流域不同地貌类型土壤光谱特征不尽相同。三条光谱曲线变化均平滑缓慢,其中样带A光谱数值最高,其次是样带B和样带C。结合玛纳斯河流域土壤盐渍化的特征分析,可知,冲积扇扇缘A带多属于重度盐渍化区域,土壤表层有白色盐霜,地表光滑发白,其土壤光谱反射率大于其他样带。而冲积平原B带和干三角洲C带分别属于中度盐渍化和中偏轻度盐渍化区域,地表局部有盐结皮或盐斑,土壤光谱反射率略低。

### 2.3 土壤因子与光谱特征值关系的分析

#### 2.3.1 Pearson 相关分析 对土壤盐

分因子与 400~900 nm 的光谱反射率做相关性分析,即对 3 个样带中 90 个表层土壤样品的 10 个盐分因子(含盐量、pH、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$ ) 分别与 50 个光谱波段(410 nm、420 nm、430 nm...880 nm、890 nm) 进行两两相关分析,10 个盐分因子与 50 个光谱波段之间的相关性

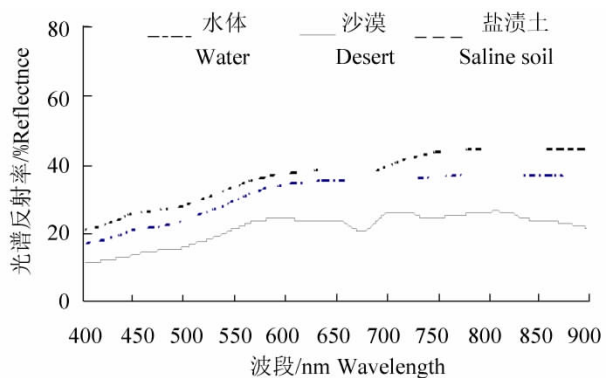


图 2 典型地物光谱特征

Fig.2 The curve of spectral response to typical object

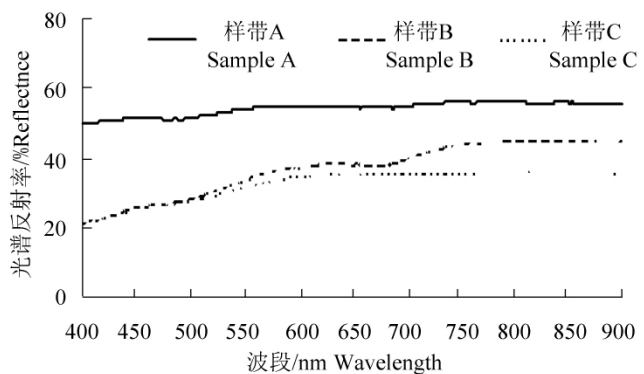


图 3 不同盐渍化土壤光谱曲线图

Fig.3 The curve of spectral response to different salinity soil

(Pearson 相关系数) 分析结果如下:

样带 A: 在光谱波段为 570 580 700 ~ 780 800 ~ 890 nm 时, 含盐量与土壤光谱反射率之间呈显著相关; 在光谱波段为 400 ~ 480 700 ~ 760 nm 时,  $SO_4^{2-}$  与光谱反射率之间呈显著相关; 在光谱波段为 540 ~ 580 620 ~ 650 720 ~ 760 nm 时,  $Ca^{2+}$  与光谱反射率之间呈显著相关; 在光谱波段为 420 ~ 450 470 480 510 600 nm 时,  $Mg^{2+}$  与光谱反射率之间呈显著相关; 而 pH、其他可溶性盐离子与光谱反射率均无显著相关。

样带 B: 在光谱波段为 480 ~ 510 660 ~ 790 nm 时, 含盐量与光谱反射率之间相关性显著; 在光谱波段为 760 ~ 890 nm 时,  $Cl^-$  与光谱反射率之间显著相关; 在光谱波段为 530 ~ 560 800 ~ 890 nm 时,  $SO_4^{2-}$  与光谱反射率之间显著相关; pH、其他可溶性盐离子与光谱反射率均无显著相关。

样带 C: 在光谱波段为 440 ~ 480 510 ~ 560 720 ~ 770 nm 时, 含盐量与光谱反射率之间呈显著相关; 在光谱波段为 400 ~ 490 520 ~ 590 nm 时,  $Cl^-$  与光谱反射率显著相关; pH、其他可溶性盐离子与光谱反射率均无显著相关。

2.3.2 多元线性回归分析 选用  $Mg^{2+}$  作为因变量, 将与之显著相关的光谱波段作为自变量, 利用 SPSS 16.0 进行多元线性回归分析, 得出各变量偏回归系数及其检验结果见表 4。

表 4 各变量偏回归系数及其检验

Tab. 4 Partial regression coefficient of each variable and test

模型 Model	为标准化系数		标准化系数		t	P
	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients			
	系数 b	系数标准误差 Std. error	系数 Beta			
Constant	-0.041	0.012			-3.477	0.003
420 nm	0.003	0.002	2.385		1.991	0.061
430 nm	-0.003	0.002	-1.944		-1.225	0.042
440 nm	0.002	0.002	1.283		0.951 0	0.356
450 nm	0.003	0.002	2.086		1.674	0.111
470 nm	-0.004	0.002	-2.431		-2.277	0.035
480 nm	0.001	0.001	-0.297		-0.350 0	0.037
510 nm	0.001	0.002	0.416		0.305 0	0.367
600 nm	-0.001	0.000	-0.659		-2.651	0.016

根据表 4 可建立多元回归方程:

$$Y = -0.041 + 0.003X_{420nm} - 0.003X_{430nm} + 0.002X_{440nm} + 0.003X_{450nm} - 0.004X_{470nm} + 0.001X_{480nm} + 0.001X_{510nm} - 0.001X_{600nm} \quad (1)$$

式中 Y 表示  $Mg^{2+}$  含量;  $X_{420nm}$  表示波长 420 nm 光谱反射率; 下同。从表 4 中可以看出, 偏回归系数 430 470 480 600 nm 相应的显著性概率  $P < 0.05$ , 而其他偏回归系数相应的显著性概率均大于 0.05, 说明该回归方程不是最优方程。

用逐步回归法对上述多元回归方程进行优化, 得到最优回归模型:

$$Y = -0.062 - 0.06X_{470nm} + 0.06X_{480nm} + 0.01X_{600nm} \quad (2)$$

采用同样的方法对其他与光谱波段显著相关的盐分因子进行分析, 得出最优多元线性回归模型见表 5。

### 3 结 论

(1) 玛纳斯河流域自上游至下游的冲积洪积扇扇缘、冲积平原、干三角洲等地貌土壤盐渍化类型演变趋势为: 硫酸盐型 → 硫酸盐 - 氯化物型 → 氯化物型。土壤盐分因子含量的统计分析表明,  $CO_3^{2-}$  属强变异性, pH 属弱变异性, 含盐量及其余可溶性盐离子均属中度变异性。这一结果反映了影响该区域盐分变化的因素较为复杂, 且土壤盐分的组成具有明显的地域性特点, 地形地貌也是影响该地区土壤积盐强度及类型变化的因素之一<sup>[15-16]</sup>。

表5 多元线性回归模型  
Tab.5 Multiple linear regression model

样带 Sample	土壤因子 Soil factors	回归方程 Regression equation	$R^2$
A	Salt content / %	$Y = -15.412 + 0.187X_{700nm} - 0.425X_{780nm} + 0.237X_{800nm} + 0.477X_{820nm} + 0.161X_{890nm}$	0.924*
	$SO_4^{2-} / (g \cdot kg^{-1})$	$Y = -0.754 + 0.57X_{410nm} + 0.17X_{420nm} - 0.27X_{460nm} - 0.18X_{730nm}$	0.879*
	$Ca^{2+} / (g \cdot kg^{-1})$	$Y = 0.218 - 0.03X_{570nm} + 0.01X_{580nm} - 0.04X_{760nm}$	0.851*
B	Salt content / %	$Y = -13.697 + 0.031X_{500nm} - 1.906X_{690nm} + 6.049X_{710nm}$	0.912*
	$SO_4^{2-} / (g \cdot kg^{-1})$	$Y = -1.273 - 0.017X_{540nm} + 0.021X_{800nm} + 0.034X_{890nm}$	0.872*
	$Cl^- / (g \cdot kg^{-1})$	$Y = -1.467 + 0.011X_{770nm} + 0.039X_{890nm}$	0.867*
C	Salt content / %	$Y = -13.177 + 1.069X_{440nm} - 0.459X_{530nm} + 0.712X_{720nm}$	0.908*
	$Cl^- / (g \cdot kg^{-1})$	$Y = -0.007 + 0.04X_{400nm} - 0.01X_{570nm}$	0.878*

决定系数肩标\* 表示  $P < 0.05$ 。\* Correlation is significant at the 0.05 level.

(2) 就光谱反射率而言, 不同地物的光谱反射率不同。盐渍土的光谱反射率在波长 400 ~ 900 nm 范围内普遍高于水体和沙漠, 因为盐渍土表层覆有盐霜或盐结皮, 且盐分均为白色晶体, 使得地表光滑而发白, 其光谱反射率大于其他地物, 其中重度盐渍土的光谱反射率最高。由于土壤中所含盐分的多少能够影响土壤光谱的总亮度, 所以土壤盐分含量越高, 盐渍化程度越重, 光谱反射能力也就越强<sup>[17-18]</sup>。

(3) 对光谱反射率及土壤因子做相关性分析, 可知, 在少数光谱波段, 3种地貌的含盐量及各地貌中占优势的盐离子均与光谱反射率显著相关, 其余土壤因子与光谱反射率的相关性不显著。并在此基础上建立多元回归模型, 为玛纳斯河流域地物光谱数据库的建立及土壤盐渍化的遥感监测奠定基础。

#### 参考文献:

- [1] 翁永玲, 宫鹏. 土壤盐渍化遥感应用研究进展 [J]. 地理科学, 2006, 36(3): 369-375.
- [2] 马诺, 杨辽, 李均力. 焉耆盆地土壤盐渍化的光谱特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 114-117.
- [3] 屈永华, 段小亮, 高鸿永等. 内蒙古河套灌区土壤盐分光谱定量分析研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(5): 1362-1366.
- [4] Etienne Muller, Henri Decamps. Modeling soil moisture reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2000(76): 173-180.
- [5] Metternicht G I, Zinck J A. Remote Sensing of soil salinity potentials and constrains [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(1): 1-5.
- [6] 刘焕军, 张柏, 刘志明等. 松嫩平原主要土壤光谱特征分析 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(4): 440-445.
- [7] 王树东, 肖正清, 包安明等. 塔里木河流域中下游典型地物光谱变化规律 [J]. 北京师范大学学报, 2007, 43(6): 673-677.
- [8] 孙宁, 常庆瑞. 青海高寒区土壤光谱特性研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 80-83.
- [9] 刘坤, 郑旭荣, 谢云. 玛纳斯河流域农业节水潜力分析 [J]. 石河子大学学报, 2005, 23(2): 237-239.
- [10] 樊自立, 马英杰, 马映军. 中国西部地区的盐渍土及其改良利用 [J]. 干旱区研究, 2001, 18(3): 1-6.
- [11] Fouad A K. Soil salinity detection using satellite remote sensing [R]. Netherlands: Thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, 2003.
- [12] 黄恩兴. 土壤盐渍化遥感应用研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(13): 6849-6850.
- [13] 罗家雄. 新疆垦区盐碱地改良 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1985: 1-56.
- [14] 许志坤. 新疆盐碱性土的改良 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1979: 34-41.
- [15] Lesch S M, Strauss D J, Rhoades J D. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: ( I ): Statistical prediction models: A comparison of multiple linear regression and cokriging [J]. Water Resources Research, 1995, 31(3): 373-386.
- [16] 刘庆生, 刘高焕, 励惠国. 辽河三角洲土壤盐渍化现状及特征分析 [J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 190-196.
- [17] Rao B R M, Ravisankar T, Dwivedi R S, et al. Spectral behavior of salt-affected soils [J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(12): 2125-2136.
- [18] 张飞, 丁建丽, 塔西甫拉提. 特依拜. 渭干河-库车河三角洲绿洲盐渍化地物光谱数据分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(12): 2921-2926.