

滨海盐土土壤水分的高光谱参数及估测模型

李 晨¹ 张国伟² 周治国¹ 赵文青¹ 孟亚利¹ 陈兵林¹ 王友华^{1*}

(¹南京农业大学/农业部作物生理生态与生产管理重点实验室/江苏省现代作物生产协同创新中心, 南京 210095; ²江苏省农业科学院经济作物研究所, 南京 210014)

摘 要 基于滨海盐土 5 个试验点的土壤含水量和室内土壤表面高光谱反射率, 综合分析了 350~2500 nm 波段范围内土壤含水量与土壤光谱之间的关系, 并基于比值光谱指数(RSI)、归一化光谱指数(NDSI)和差值光谱指数(DI)确定了光谱参数, 进而构建土壤含水量估测定量模型。结果表明: 滨海盐土原始光谱反射率与土壤含水量呈显著负相关关系, 且最大负相关出现在 1930 nm($r=0.86$)附近。对 RSI、NDSI 和 DI 的直线回归方程、幂函数回归方程进行对比, 以 RSI(R_{1407}, R_{1459})为自变量构建的土壤含水量指数函数线性回归方程决定系数最大(0.780), 标准误差小(0.016), 拟合方程为 $y=0.00001e^{9.72053x}$ 。估测模型能够更好地监测滨海盐土土壤水分状况。基于 RSI(R_{1407}, R_{1459})构建的模型可实现对江苏省滨海盐土土壤水分的精确监测。

关键词 滨海盐土; 高光谱参数; 土壤水分; 高光谱遥感

Hyperspectral parameters and prediction model of soil moisture in coastal saline. LI Chen¹, ZHANG Guo-wei², ZHOU Zhi-guo¹, ZHAO Wen-qing¹, MENG Ya-li¹, CHEN Bing-lin¹, WANG You-hua¹ (¹Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Management/Jiangsu Province Modern Crop Production Collaborative Innovation Center, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ²Institute of Industrial Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China).

Abstract: Based on the data of soil moisture content and indoor soil surface spectral reflectance from five sampling sites of coastal saline soil, this paper analyzed the relationship between soil moisture content and soil spectrum in wavelength 350–2500 nm. We determined spectral parameters under ratio spectral index (RSI), normalized difference spectral index (NDSI) and difference spectral index (DI), and established the quantitative model of soil moisture content. The results showed significant negative correlation between spectral reflectance and soil moisture content, and the maximum negative correlation was near 1930 nm ($r=0.86$). By comparison of the regression equation of RSI, NDSI and DI, it was found that the regression equation of exponential function ($y=0.00001e^{9.72053x}$) built by soil moisture content based on RSI (R_{1407}, R_{1459}) presented the maximum R^2 (0.780) and the minimum SE (0.016). The established model based on RSI (R_{1407}, R_{1459}) could be used to monitor soil moisture content accurately in Jiangsu coastal saline soils.

Key words: coastal saline soils; hyperspectral parameters; soil moisture content; hyperspectral remote sensing.

中国是世界上盐碱地面积最大的国家之一, 仅滨海盐碱地面积就达 $5 \times 10^6 \text{ km}^2$ [1], 开发利用这部分土地对我国农业生产具有重大意义 [2]。土壤水分

是作物获取水分的直接来源, 土壤水分状况又直接影响作物的产量和品质形成。传统土壤水分的测定方法时效性较差, 不能满足现代化农业的需求。因此, 滨海盐碱地农业生产亟需一种高效快速的土壤水分监测方法, 高光谱遥感监测技术随之应用。

高光谱遥感技术具有分辨率高、波段范围广且连续等特点, 能够精细表达土壤成分信息。前人研究

本文由江苏省水利科技攻关项目(2011073, 2012020, 2013038)资助
This work was supported by the Jiangsu Water Conservancy Scientific Tackle Project (2011073, 2012020, 2013038).

2015-05-28 Received, 2015-12-03 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: w_youhua@njau.edu.cn

表明,土壤水分的增加导致光谱反射率和光谱反射率基础高度的降低^[3-5],并且在可见光区和近红外区的特定波段出现强度不同的强吸收带^[6],因此可以通过分析土壤光谱特定波段的变化,实现对土壤水分的快速、实时监测.这对于规避盐土的不良影响和指导作物的水分运筹均具有十分重要的意义.

研究表明,土壤水分对土壤光谱的影响大于土壤类型^[5];土壤含水量与土壤光谱之间存在临界值(通常大于田间持水量),低于临界值含水量时土壤光谱反射率随土壤湿度的增加而降低,当超过临界值时随土壤水分的增加而增加^[7];Hummel等^[8]利用近红外光谱传感器构建了关于土壤表层和亚表层的土壤含水量预测模型;朱永豪等^[9]在410~1100 nm波段内根据相关性最大的波长反射率建立了二次曲线方程;刘焕军等^[10]针对黑土土壤构建了水分估测模型方程.上述关于土壤光谱信息量化土壤水分的结论不尽一致,原因在于光谱信息分析技术和土壤类型的不同.在高光谱信息提取方法中,光谱指数的研究^[11-12]被用于消除背景噪音和提高估测模型能力,但由于信息提取技术和统计软件的限制,高光谱信息未被充分挖掘.目前国内外研究多集中在土壤水分的光谱特性和单一波段相关性模型的研究,针对滨海盐土特殊的土壤光谱特性利用 MATLAB编程采用逐波段分析技术估测土壤水分状况的研究鲜有报道.

本研究以江苏省滨海盐土为研究对象,研究土壤含水量和土壤光谱之间的关系,探讨土壤光谱的变换形式,系统分析了350~2500 nm波段内3种不同光谱指数,确定土壤水分响应程度较高的敏感波段和模型最佳关键光谱参数,构建适合盐碱地土壤的水分估测定量模型,为高光谱遥感卫星大面积快速获取滨海盐土土壤水分信息提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验于2014年在江苏省滨海试验田进行.该地位于长江三角洲北翼,东临黄海,滩涂面积较大,盐碱地分布较广,属于北亚热带气候向南暖温带气候过渡的地带,且海洋性暖湿季风气候明显,年平均气温在13.9~14.5℃,年降水量在980~1100 mm,土壤类型以盐土和潮土为主.研究区共设5个试验地点,分别为草庙镇华丰农场(33°08′22.028″N、120°42′45.609″E)、海通镇农科院试验田(33°50′28.950″N、120°22′31.822″E)、金海农场(32°59′36.000″N、120°49′50.400″E)、新洋农场试验田(33°32′16.484″N、120°26′21.768″E)、大丰稻麦原种场试验田(33°24′19.800″N、120°35′6.500″E).采样点基础土壤信息见表1.

1.2 土样采集和土壤表层光谱获取

基于棋盘式取样法,从5个试验点分4次采集0~20 cm表层土壤,室内单个样本土壤均匀混合后待测.取样时间选在沿海土壤水分变化较大的6—10月,分别为6月13日、7月11日、8月5日、9月30日.每次取样个数除大丰试验点为10份外,其余试验点每次均取样6份,5个取样点可用样本量见表2,全年样本总量为124份.

采用美国ASD公司生产的FieldSpec Pro FR 2500高光谱辐射仪测定土壤光谱反射率,波段范围为350~2500 nm,其中,350~1050 nm光谱采样间隔为1.4 nm,光谱分辨率为3 nm,1050~2500 nm光谱采样间隔为2 nm,光谱分辨率为10 nm,输出波段数为2151.

土壤光谱的获取是在土样采集当天人工控制光照条件下暗室中进行,黑布作为背景,鲜土装满直径9.5 cm、深1.5 cm的玻璃皿并使其表面平整一致,将仪器配套的1000 W卤素灯用三脚架固定,成60°角照射,光谱仪探头视角场为5°,距离土样5 cm.样本测量过程中,及时进行反射率为1的白板校正,每个土样测定点更换3次,每次高光谱辐射仪默认设定扫描3次,共9个重复,取平均值作为该样本光谱反射率^[13-14].

表1 采样点的土壤基本信息
Table 1 Basic information of the sampling soil

采样点 Sampling site	电导率 Electrical conductivity (dS·m ⁻¹)	全盐含量 Total salt content (‰)	Na ⁺ (cmol·kg ⁻¹)	Cl ⁻ (cmol·kg ⁻¹)	pH	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)
华丰 Huafeng	0.12	1.0	8.5	18.5	7.6	8.43	1.17
海通 Haitong	0.28	1.2	11.3	22.9	7.9	8.55	1.13
金海 Jinhai	0.51	1.8	13.1	25.2	7.9	9.04	1.10
新洋 Xinyang	0.99	2.4	15.6	30.1	8.0	8.05	1.18
大丰 Dafeng	1.20	3.1	18.3	39.0	8.3	7.91	1.23

1.3 土壤含水量的测定

利用烘干法测定土壤含水量,土壤含水量=(鲜土质量-烘干土质量)/烘干土质量×100%.表2为不同采样点样本土壤含水量的统计特征.

1.4 数据处理

将试验测定的光谱数据经 ViewSpePro 转换成光谱反射率,五点平滑法处理后作为原始光谱反射率.利用 MATLAB 求光谱反射率与土壤含水量的相关系数,Origin 9.0 作图展示.6 种光谱变换形式分别为光谱的对数(lgR)、一阶微分(R′)、倒数的对数的一阶微分[lg(1/R)]′、对数的倒数(1/lgR)、倒数的对数[lg(1/R)]、倒数(1/R),变换方法处理过程在 Excel 中完成.

估测模型的建立:5 个取样点的样本数据分为两部分,大丰稻麦原种场试验田数据用于检验模型(样本量为 40),其余数据用于构建模型(样本量为 84).光谱指数选用比值光谱指数(RSI)、归一化光谱指数(NDSI)和差值光谱指数(DI)^[15],公式如下:

$$RSI(R_1,R_2)=R_1/R_2 \tag{1}$$

$$NDSI(R_1,R_2)=(R_1+R_2)/(R_1-R_2) \tag{2}$$

$$DI(R_1,R_2)=R_1-R_2 \tag{3}$$

式中:R₁和 R₂分别表示光谱波段中两个任意波长的光谱反射率.

基于光谱指数分析土壤光谱与土壤水分的关系,利用 MATLAB 2014b 求算两者的决定系数并用等高线图展示^[12],确定敏感波段和最佳光谱指数波长组合,在 SPSS 中建立监测模型方程式.

根据检验样本的土壤含水量预测值与实测值进行对比,利用决定系数(R²)、根均方差(RMSE)和斜率(Slope)综合评价模型精确度,并由 Orgin 9.0 绘制出 1:1 直线关系等高线图直观表达.其中,RMSE 的表达式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (Y_j - X_j)^2} \tag{4}$$

表 2 不同采样点土壤含水量的统计特征
Table 2 Statistical characteristics of soil moisture content in different sampling sites

采样点 Sampling site	样本个数 Sample size	最大值 Maximum (%)	最小值 Minimum (%)	平均值 Mean (%)	标准差 SD
华丰 Huafeng	20	28.7	18.8	23.8	0.0293
海通 Haitong	24	26.3	18.2	22.3	0.0226
金海 Jinhai	20	29.1	17.6	23.3	0.0338
新洋 Xinyang	20	29.6	18.8	24.8	0.0354
大丰 Dafeng	40	25.6	17.6	21.9	0.0172

式中:Y_j和 X_j分别为预测值和实测值;M 为样本量.

1.5 高光谱数据的预处理

为了更好地挖掘滨海盐土光谱信息,在预处理中借助光谱反射率的 6 种变换方法进行对比.原始光谱反射率(R)和 6 种变换形式的相关系数(图 1)绝对值的最大值分别为 0.856、0.850、0.743、0.853、0.854、0.850、0.838,说明 6 种变换方法的相关系数均较高,但与 R 的相关系数相比,相关性均没有提高,反而使得 R′、[lg(1/R)]′变换形式下与土壤水分的相关性变得不稳定.因此,数据处理时采用原始光谱反射率.

2 结果与分析

2.1 滨海盐土土壤光谱特征及其与土壤水分的相关性

由图 2 可知,不同含水量下滨海盐土的土壤光谱特征曲线大致相似,相同波长下的光谱反射率有所不同,在 350~2500 nm 波段内反射率随着土壤含水量的降低而增加.土壤光谱曲线特征总体上在 350~1350 nm 波段内光谱反射率呈单调递增趋势;在 1440 和 1930 nm 出现两个峰谷;1550~1850 nm 波段内相对稳定并出现 350~2500 nm 波段内反射率的最大值;2150~2500 nm 波段内大致呈单调递减趋势.

由图 1 可知,滨海盐土土壤光谱反射率与土壤水分呈显著负相关关系,敏感的波段范围分别在 1393~1530 nm、1861~2345 nm(r>0.6),且最大负相关出现 1930 nm(r=-0.86)附近.结合图 1 和图 2 可知,位于土壤光谱反射率的 2 个峰谷(1440、1930 nm)附近的相关系数出现两个峰值,峰值位于 1441 和 1930 nm,表明该波段区域对滨海盐土水分反应较为敏感.

2.2 滨海盐土土壤光谱反射率与土壤含水量的定量关系

选择原始光谱反射率,在 MATLAB 中分别建立 350~2500 nm 波段范围内任意比值光谱指数(RSI)、归一化光谱指数(NDSI)和差值光谱指数(DI)与土壤含水量的直线函数关系,确定敏感波段区域和决定系数最大的敏感波长组合,并用等高线图进行展示(图 3).

2.2.1 滨海盐土土壤含水量的最佳比值光谱指数及定量监测模型的构建 由图 3 可知,土壤光谱反射率在比值光谱指数下确定的土壤含水量的敏感区域位于近红外长波区域,坐标(X、Y)分别为1165~

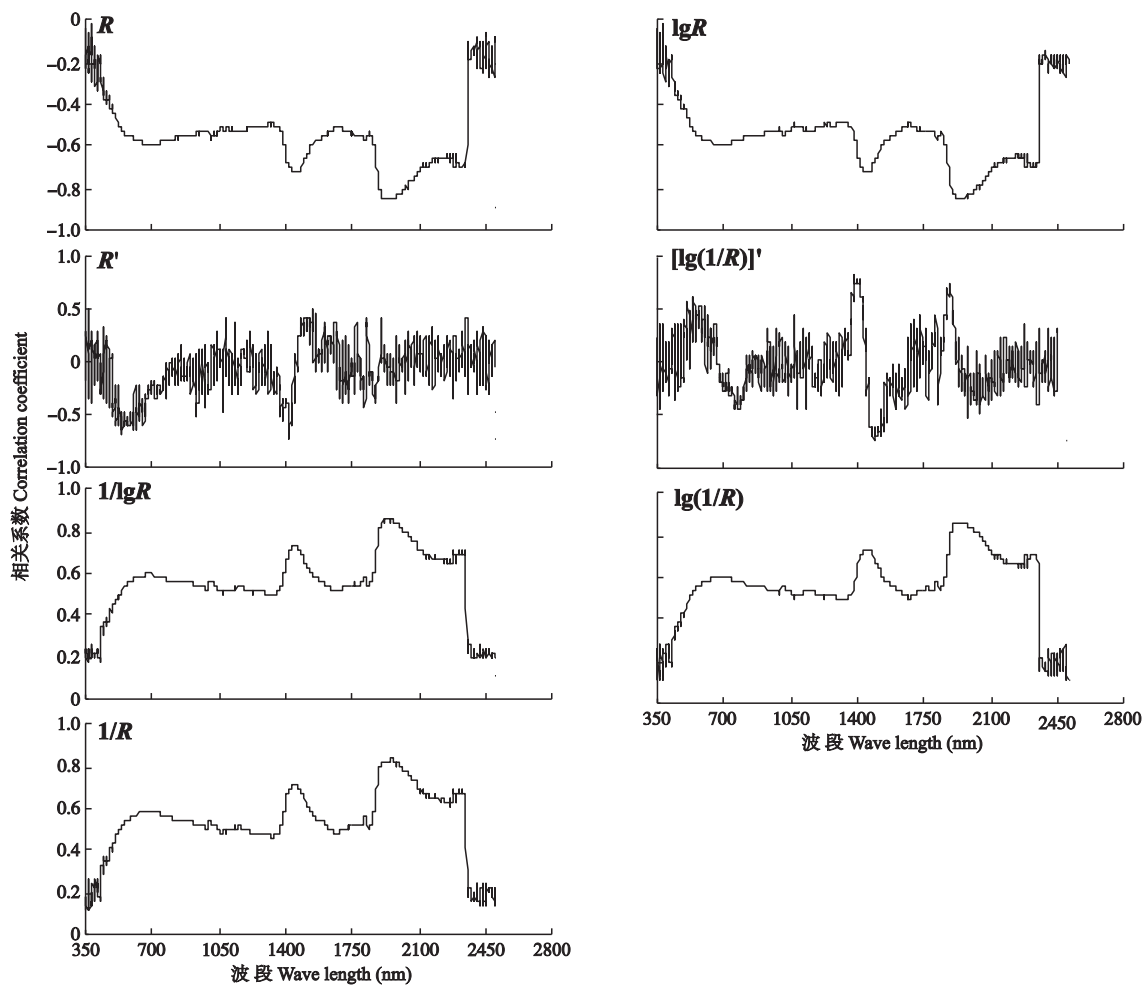


图 1 不同光谱变换形式下土壤含水量和光谱反射率的相关系数

Fig.1 Correlation coefficient between soil moisture content and soil spectral reflectance under different spectral transformations.

R : 原始光谱反射率 Original spectral reflectance; $\lg R$: 反射率的对数变换 Logarithmic transformation of reflectance; R' : 反射率的一阶微分变换 First order differential transformation of reflectance; $[\lg(1/R)]'$: 反射率倒数的对数的一阶微分变换 First order differential transformation for logarithm of the reciprocal of reflectance; $1/\lg R$: 反射率对数的倒数变换 Reciprocal transformation of the logarithm of reflectance; $\lg(1/R)$: 反射率倒数的对数变换 Logarithmic transformation of reciprocal reflectance; $1/R$: 反射率的倒数变换 Reciprocal transformation of reflectance.

1420 nm、1415 ~ 1505 nm、1415 ~ 1505 nm、1165 ~ 1420 nm ($R^2>0.7$).

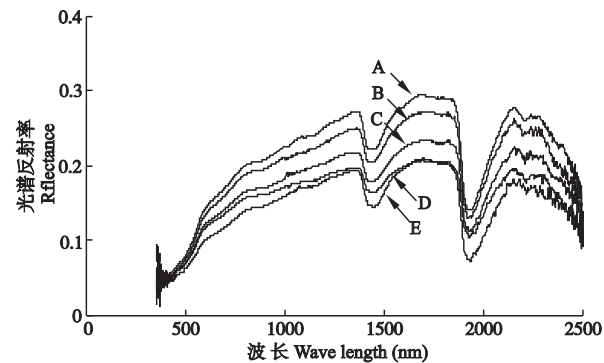


图 2 不同土壤含水量的光谱反射率曲线

Fig.2 Curves of spectral reflectance of different soil moisture content.

A: 18.8%; B: 19.9%; C: 20.9%; D: 23.5%; E: 28.0%.

基于土壤含水量的敏感光谱区域范围,确定土壤光谱在比值光谱指数下的最佳波长组合 $RSI(R_{1407}, R_{1459})$, 根据最佳波长组合基于 RSI 与土壤含水量拟合的直线函数和指数函数进行对比(表 3),发现以 $RSI(R_{1407}, R_{1459})$ 为自变量构建的土壤含水量指数函数线性回归方程的决定系数较大(0.780),标准误差较小(0.016),可以用来监测土壤的水分状况.

2.2.2 滨海盐土土壤含水量的最佳归一化光谱指数及定量监测模型的构建 由图 3 可知,土壤光谱反射率在归一化光谱指数下确定的土壤含水量的敏感区域位于近红外长波区域,坐标(X 、 Y)分别为: 1165~1420 nm、1415 ~ 1505 nm、1445 ~ 1485 nm、1505~1710 nm、1830~1885 nm、1955~2060 nm ($R^2>0.6$).

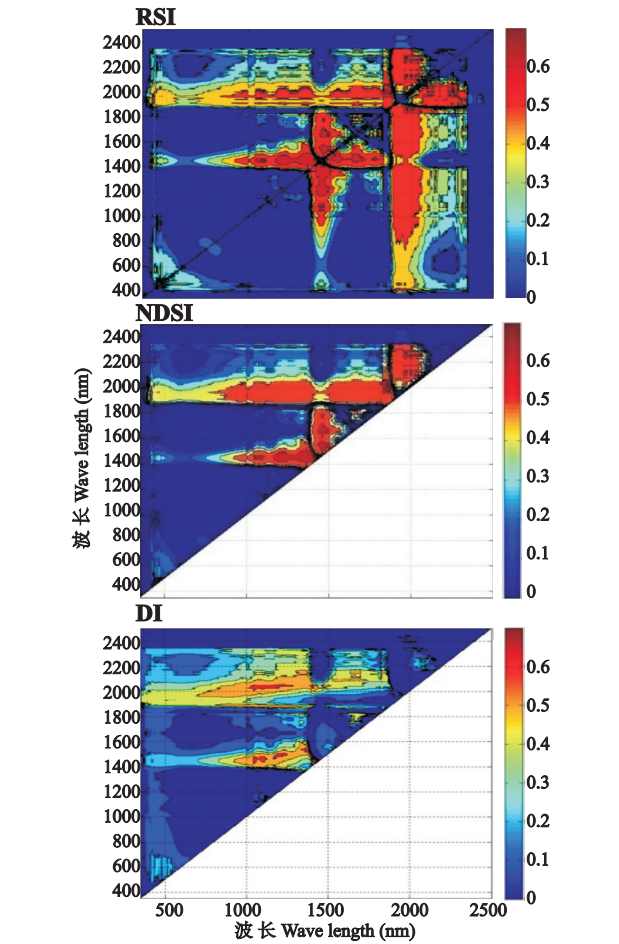


图 3 基于光谱指数与土壤含水量的直线关系等高线图
Fig.3 Counter maps of coefficients of determination for linear relationship between spectral index and soil moisture content.
RSI: 比值光谱指数 Ratio spectral index; NDSI: 归一化光谱指数 Normalized difference spectral index; DI: 差值光谱指数 Difference spectral index. 下同 The same below.

基于土壤含水量的敏感光谱区域范围,确定土壤光谱在归一化光谱指数下的最佳波长组合 NDSI(R_{1407}, R_{1459}).根据最佳波长组合基于 NDSI 与土壤含水量拟合的直线函数和指数函数进行对比(表 3),发现以 NDSI(R_{1407}, R_{1459})为自变量构建的土壤含水量指数函数线性回归方程的决定系数较大(0.750),标准误较小(0.020),可以用来监测盐碱地土壤的水分状况.

2.2.3 滨海盐土土壤含水量的最佳差值光谱指数及定量监测模型的构建 由图 3 可知,土壤光谱反射率在差值光谱指数下确定的土壤含水量的敏感区域位于近红外长波区域,坐标(X,Y)分别为:1040~1125 nm、1425~1475 nm、1170~1250 nm、1475~1460 nm、1350~1425 nm、1425~1550 nm、1000~1300 nm、2020~2050 nm($R^2>0.6$).

基于土壤含水量的敏感光谱区域范围,确定土

壤光谱在差值光谱指数下的最佳波长组合 DI(R_{1407}, R_{1464}).根据最佳波长组合基于 DI 与土壤含水量拟合的直线函数和指数函数进行对比(表 3),发现以 DI(R_{1407}, R_{1464})为自变量构建的土壤含水量指数函数线性回归方程的决定系数较大(0.742),标准误较小(0.021),可以用来监测盐碱地土壤的水分状况.

综合对比,以 RSI(R_{1407}, R_{1459})为自变量构建的土壤含水量指数函数回归方程的决定系数最大(0.780),标准误最小(0.016),能够更好地监测土壤水分状况.

2.3 盐碱地土壤含水量估测模型的检验

为了检验 RSI(R_{1407}, R_{1459})模型方程的预测效果,利用 2014 年大丰稻麦原种场的数据($n=40$)对最佳 RSI、NDSI、DI 下定量模型预测值与土壤含水量实测值进行对比检验(表 4),并由 1:1 关系图进行展示(图 4).经对比发现,以 RSI(R_{1407}, R_{1459})的决定系数($R^2=0.859$)较高、根均方差(RMSE=0.0097)最小、斜率(1.034)较接近于 1,说明 RSI(R_{1407}, R_{1459})下建立的幂函数回归方程预测值与实测值之间的符合度较好,其表现优于 NDSI(R_{1407}, R_{1459})、DI(R_{1407}, R_{1464})监测方程.检验对比结果和方程构建结果一致.因此,以 RSI(R_{1407}, R_{1459})为自变量建立的土壤含水量监测模型可以实现对江苏省滨海盐土土壤水分的精确估测.

表 3 滨海盐土土壤含水量(y)与光谱指数(x)的定量关系
Table 3 Quantitative relationships of soil moisture content (y) to spectral index of coastal saline soil (x) ($n=84$)

光谱参数 Spectral parameter	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2	标准误 SE
RSI(R_{1407}, R_{1459})	$y = -2.0796 + 2.2797x$	0.706	0.036
	$y = 0.00001e^{9.7205x}$	0.780	0.016
NDSI(R_{1407}, R_{1459})	$y = 0.2000 + 4.6265x$	0.695	0.056
	$y = 0.20064e^{19.7313x}$	0.750	0.020
DI(R_{1407}, R_{1464})	$y = 0.21992 - 14.2259x$	0.703	0.056
	$y = 0.21840e^{-60.8509x}$	0.742	0.021

$R^2_{0.05} = 0.0461; R^2_{0.01} = 0.0781.$

表 4 基于最佳 RSI、NDSI 和 DI(x)的滨海盐土土壤含水量(y)监测方程的检验对比

Table 4 Testing and contrasting results of the estimating models based on RSI, NDSI and DI (x) to soil moisture content (y) in coastal saline soil ($n=40$)

光谱参数 Spectral parameter	回归方程 Regression equation	模型检验表现 Performance of testing model		
		R^2	RMSE	斜率 Slope
RSI(R_{1407}, R_{1459})	$y = 0.00001e^{9.7205x}$	0.859	0.0097	1.034
NDSI(R_{1407}, R_{1459})	$y = 0.20064e^{19.7313x}$	0.859	0.0372	0.865
DI(R_{1407}, R_{1464})	$y = 0.21840e^{-60.8509x}$	0.773	0.0405	0.785

$R^2_{0.05} = 0.0974; R^2_{0.01} = 0.1621.$

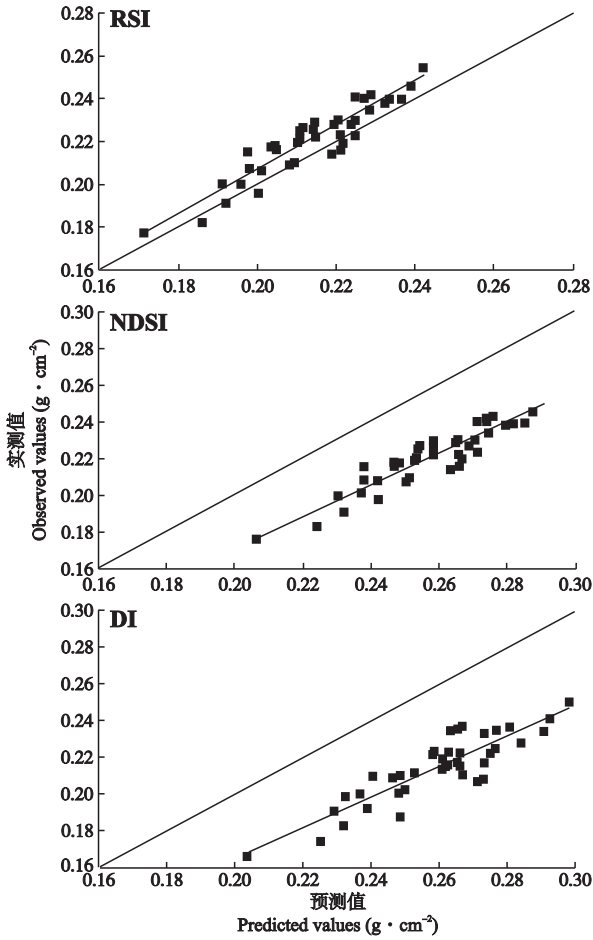


图 4 基于最佳 RSI、NDSI 和 DI 的滨海盐土土壤含水量监测模型预测值和实测值的关系

Fig.4 Relationships between the predicted and observed soil moisture contents in coastal saline soil based on best RSI, NDSI and DI ($n=40$).

3 讨 论

土壤反射光谱是土壤重要的特性之一,它与土壤水分含量的变化关系密切,高光谱遥感的出现允许利用土壤表面光谱反射率短时间大面积估测土壤水分^[16-17].本研究探讨了室内照明情况下土壤水分与反射光谱之间的关系,并采用矩阵全波段两两组合的光谱指数确定了估测土壤水分的光谱参数,构建了适用滨海盐土土壤水分的监测模型,为农业遥感技术在精确监测土壤水分状况方面的应用奠定了基础.

水分吸收的关键波段是土壤水分监测的重点.已有学者对室内湿土和野外土壤光谱特性进行研究发现,土壤光谱反射率会随着土壤含水量的增加而降低^[3-4,18],并在 1440、1900 nm 出现两个较强土壤水分光谱吸收带^[19-22],强吸收带是构建高光谱参数

的关键波段,与本研究的相关系数敏感区域结论一致,出现这种强吸收带的原因可能是土壤水分对土壤光谱特定波段的电磁波吸收和反射较敏感,并在光谱特征上反映出来^[6].土壤类型对土壤水分强吸收带存在影响,其影响弱于土壤水分^[5],滨海盐土由于海水浸渍等原因导致氯化物矿质盐含量较高,该区土壤的光谱特性异于其他非盐渍类土壤,因此本文针对滨海盐土研究土壤水分的光谱监测.

关键波段的提取是模型精确的基础.目前被广泛应用的光谱信息提取方法有小波分析、微分技术和三边参数等.建模方法大致有两种,第一种为关键波长直线回归和逐步回归构建方程^[9-10],模型精确度相对较低;第二种为通过已报道的最佳光谱参数进而建模^[23],此法由于试验点土壤类型等因素会影响最佳光谱指数的确定,因此精确度有限.这两种方法难以充分挖掘光谱信息和发现不同条件下新的敏感波段.本研究通过矩阵形式在 MATLAB 中精细分析光谱各波段信息正好弥补了这两种方法的不足,结合光谱变换形式的方法^[24-25]确定土壤光谱最适变换形式,更有利于提取相对应的特征光谱信息和提高模型精度.

本文运用室内反射光谱测定分析技术,消除了野外植被反射光谱和大气状况等背景噪音影响光谱分辨率的问题,并且叶片光谱分析方法^[12,26-27]的借鉴和光谱关键波段的寻找使研究土壤光谱机理及估测模型参数更具有优势,模型检验结果表明具有较高的精确度.但是,野外大气状况和秸秆覆盖等限制因素有可能影响野外估测精度,有必要对野外的应用作进一步研究.此外,本文中估测模型的构建基于江苏省滨海盐土土壤,今后仍需不同生态位点数据的测试和完善,来增强土壤水分估测模型的普适性和稳定性,从而为土壤水分的光谱估测奠定理论基础和技术支持,并可为土壤水分信息的大面积实时获取提供一个方便快速的研究手段.

4 结 论

土壤光谱反射率经变换处理后,与土壤含水量的相关系数均较高,但与原始光谱反射率的相关系数相比,相关性均没有提高.土壤原始光谱反射率与土壤含水量呈显著负相关,敏感波段在近红外区,且位于土壤光谱反射率的两个峰谷(1440、1930 nm)附近,分别为 1393 ~ 1530 nm、1861 ~ 2345 nm ($r>0.6$),且最大相关系数出现在 1930 nm($r=-0.86$).

基于 RSI、NDSI、DI 确定土壤含水量的敏感波

段区域均位于近红外长波区域. 以最佳光谱指数 $RSI(R_{1407}, R_{1459})$ 为自变量构建指数函数回归方程的决定系数最大(0.780), 标准误差较小(0.016), 可以监测土壤的水分状况. 方程形式为: $y = 0.00001e^{9.7205x}$.

以 $RSI(R_{1407}, R_{1459})$ 构建的盐碱地土壤含水量估测模型能够很好地快速估测滨海盐土土壤水分状况, 决定系数 ($R^2 = 0.859$) 最高、根均方差 ($RMSE = 0.0097$) 较小、斜率较为接近 1, 监测模型预测值与实测值之间的符合度较高.

参考文献

- [1] Xu H-G (徐恒刚). Ecological Control of Halophyte and Salinization in China. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004 (in Chinese)
- [2] Zhang L (张 雷), Tang M-X (唐明星), Zhang G-W (张国伟), et al. Monitoring and simulation of soil electrical conductivity based on the hyperspectral parameters of cotton (*Gossypium hirsutum*) functional leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(3): 710–716 (in Chinese)
- [3] Stoner ER, Baumgardner MF, Weismiller RA, et al. Extension of laboratory-measured soil spectra to field conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**: 572–574
- [4] Stoner ER, Baumgardner MF. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, **45**: 1161–1165
- [5] Muller E, Decamps H. Modeling soil moisture-reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **76**: 173–180
- [6] Bedidi A, Cervelle B, Madeira J, et al. Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils. *Soil Science*, 1992, **153**: 129–141
- [7] Liu WD, Baret F, Gu XF, et al. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **81**: 238–246
- [8] Hummel J, Sudduth K, Hollinger S. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2001, **32**: 149–165
- [9] Zhu Y-H (朱永豪), Deng R-D (邓仁达), Lu Y-F (卢亚非), et al. The change characteristics of yellow brown soil spectral reflectance under different humidity conditions and its significance in remote sensing. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1984, **21**(2): 194–201 (in Chinese)
- [10] Liu H-J (刘焕军), Zhang B (张 柏), Song K-S (宋开山), et al. Soil moisture spectral analysis and its spectral model. *Journal of Graduate School of Chinese Academy of Social Sciences* (中国科学院研究生院学报), 2008, **25**(4): 503–509 (in Chinese)
- [11] Gupta R, Vijayan D, Prasad T. Comparative analysis of red-edge hyperspectral indices. *Advances in Space Research*, 2003, **32**: 2217–2222
- [12] Zhang L, Zhou ZG, Zhang GW, et al. Monitoring the leaf water content and specific leaf weight of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in saline soil using leaf spectral reflectance. *European Journal of Agronomy*, 2012, **41**: 103–117
- [13] Zhang J-J (张娟娟), Tian Y-C (田永超), Zhu Y (朱艳), et al. Spectral characteristics and estimation of organic matter contents of different soil types. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2009, **42**(9): 3154–3163 (in Chinese)
- [14] Chen H-Y (陈红艳). Hyperspectral Estimation of Major Soil Nutrient Content. PhD Thesis. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [15] Zhang L (张 雷). Effects of Salinity on the Changes of Water, Salinity Content in Cotton-Soil System and Its Monitoring Research. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [16] Liu W-D (刘伟东). Study on Extraction of Soil Information and Data Mining by Hyperspectral Remote Sensing. PhD Thesis. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2002 (in Chinese)
- [17] Tong Z-Y (仝兆远), Zhang W-C (张万昌). Progress of soil moisture monitoring by remote sensing. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2007, **27**(4): 107–113 (in Chinese)
- [18] Lobell D, Asner G. Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**: 722–727
- [19] Bowers S, Hanks R. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, 1965, **100**: 130–138
- [20] Demattê J, Sousa A, Alves M, et al. Determining soil water status and other soil characteristics by spectral proximal sensing. *Geoderma*, 2006, **135**: 179–195
- [21] Ben-Dor E, Chabrillat S, Demattê J, et al. Using imaging spectroscopy to study soil properties. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**: 38–55
- [22] Stenberg B, Rossel RAV, Mouazen AM, et al. Chapter five: Visible and near infrared spectroscopy in soil science. *Advances in Agronomy*, 2010, **107**: 163–215
- [23] Hansen P, Schjoerring J. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **86**: 542–553
- [24] Wang H-J (王海江), Zhang H-L (张花玲), Ren S-T (任少亭), et al. Prediction model of soil water-salt based on hyperspectral reflectance characteristics. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* (农业机械学报), 2014, **45**(7): 133–137 (in Chinese)
- [25] Zhang J-H (张俊华), Jia K-L (贾科利). Spectral reflectance characteristics and modeling of typical Takyr Solonetz water content. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(3): 1–9 (in Chinese)
- [26] Yao X (姚 霞), Liu X-J (刘小军), Wang W (王薇), et al. Estimation of optimum normalized difference spectral index for nitrogen accumulation in wheat leaf based on reduced precise sampling method. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(12): 3175–3182 (in Chinese)
- [27] Zarco-Tejada PJ, Rueda C, Ustin S. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **85**: 109–124

作者简介 李 晨,男,1990 年生,硕士研究生. 主要从事高光谱遥感监测研究. E-mail: liangtiaosheng@126.com

责任编辑 杨 弘