

基于高光谱的砂姜黑土含水量反演研究^①

张颖帝^{1,2}, 张佳宝^{1*}, 李晓鹏¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在实验室条件下, 以地物光谱仪(350~2 500 nm)为工具, 利用光谱反射率(R)、反射率的一阶微分(R')、反射率的对数($\log R$)、反射率的倒数($1/R$)、反射率对数的一阶微分($\log R$) 和去包络线(R_c) 6 种处理方法, 研究了 4 种不同土种的砂姜黑土含水量与光谱反射率的定量关系。结果表明: 砂姜黑土不同土种间光谱特征存在一定差异, 且 4 种土的光谱反射率都随土壤含水量升高而下降。在可见-近红外波段, 以 R' 提取的敏感波长与含水量的相关系数最高, 敏感波长集中分布在 712、807、1 142、1 570、1 850、2 221 nm 等。基于上述波长反射率所建立的土壤含水量预测模型的决定系数达到了 0.89, 且其模型检验的均方根误差仅为 4.6 g/kg, 实现了对砂姜黑土含水量较为准确的预测。本研究为非接触、快速地测定砂姜黑土含水量提供了数据基础。

关键词: 砂姜黑土; 光谱特征; 含水量; 光谱反射率

中图分类号: S127 文献标识码: A

实时、快速地测定田间水分是现代化农田土壤水分管理的基础。土壤含水量的测定方法按照测定范围和测定方式, 可分为点位、区域测定, 以及接触式和非接触式测定等。点尺度的水分测定的测量精度虽然较高如烘干称重法、中子仪法、 γ -射线法和时域反射仪法等^[1], 但用于区域农田水分监测, 毕竟样点数量有限, 且费时费力成本较高。区域非接触式的土壤含水量测定方法多为遥感, 如: 多光谱遥感、高光谱遥感等。其中, 高光谱遥感由于其图像分辨率高且光谱连续, 即图谱合一^[2], 且涵盖紫外、可见光、近红外和中红外一个或多个常用波段而被广泛应用于农业领域的土壤属性预测^[3-5]、作物长势监测、作物产量与籽粒质量反演等^[6-8]。高光谱遥感不仅光谱分辨率高, 能提高对目标物属性的预测精度, 还能快速、实时和大面积的对目标区域进行监测, 因此高光谱遥感在土壤和植物等特征的研究中表现出良好的前景^[9]。

不同土壤类型光谱特征和水分的敏感波长往往有差异。姚艳敏等^[10]采集黑土土类中的黑土亚类土样的不同水分光谱数据, 反射率曲线经对数和一阶微分处理后, 敏感波长集中在 1 328、1 438、1 742 和 2 156 nm, 其中 2 156 nm 处反射率与含水量的相关系数最高达到 0.89。张俊华和贾科利^[11]以宁夏典型

龟裂盐碱土为研究对象, 使用光谱测量范围在 340~1 130 nm 的光谱仪进行测定, 以光谱反射率变换形式提取出土壤水分的敏感波长, 得出 408、521、751 nm 等为敏感波长。彭杰等^[12]建立草甸土含水量与光谱反射率的多元线性回归方程, 敏感波长分别为 698、702、703、746、747 nm。可见不同土壤的水分敏感波段是有差异的^[8], 有必要对不同类型的土壤进行专门研究。此外, 国内外学者对土壤与水分的关系的研究通常以多种土类的土壤为研究对象^[13-15]。然而, 不同土壤间由于质地和成土母质等的差异, 其光谱特征也存在差异^[16]。因此, 针对单一土类的光谱特征研究能有效提高模型的预测精度^[17]。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集与处理

本研究的砂姜黑土于 2015 年 7 月采自安徽省涡阳县(33°35' N, 116°19' E)和太和县(33°18' N, 115°28' E), 共包含了 64 个土壤样品, 4 种土种。各土种样品采集情况如下: 淤黑土 15 个、厚淤黑土 15 个、黑土 14 个、青白土 20 个。土样的采集深度为 0~20 cm。土壤风干后剔除植物残体、石砾等杂质, 研磨后过 2 mm 土筛, 充分混匀。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41471182)和中国科学院战略性先导科技专项课题(XDB15030302)资助。

* 通讯作者(jbzhang@issas.ac.cn)

作者简介: 张颖帝(1990—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事土壤遥感应用研究。E-mail: ydzhang@issas.ac.cn

1.2 土壤含水量与光谱测量

将处理过后的土壤样品放置于直径 14.3 cm, 深度是 2.3 cm(光学无限厚)培养皿中。先将被测土样填满玻璃皿,再用直尺轻轻刮去表面多余的土样,保持土样表面平整,减少粗糙不一的表面光谱的干扰。然后用滴管沿培养皿壁注入蒸馏水直至土壤处于充分饱和状态,静置到土壤表面的自由水消失之后,将样品放置于 105 °C 恒温烘箱中进行逐步干燥。在干燥过程中,每隔一定时间测定土样表面的反射率,并同时称重测定土壤实际含水量。

土壤光谱测量在暗室中进行。所用光谱采集设备为 ASD Field Spec Pro 4 型地物光谱仪,光谱范围 350 ~ 2 500 nm,光源为 50 W 卤素灯。光谱测量几何条件为:光源照射方向与垂直方向夹角为 45°,光纤探头视场角为 25°,探头垂直土壤表面,探头到土样表面距离为 10 cm。每次测量前进行标准白板校正。为了抑制阴影的影响,每个样品采集 3 个方向(间隔 120°角度)的光谱。每个方向采集 5 条光谱曲线,共 15 条光谱曲线。为消除光谱连接点跳跃,对每条光谱曲线进行拼接校正。15 条光谱曲线反射率算数平均后为该土样的光谱曲线反射率。由于 350 ~ 380 nm 与 2 400 ~ 2 500 nm 波段受干扰影响较大,本研究仅对 380 ~ 2 400 nm 波段的反射光谱进行分析。

1.3 光谱数据处理与敏感波段划分

光谱数据处理主要作用在于通过数据变换,消除背景噪声,突出相应的敏感波段。本研究除直接研究反射率(R)外,还采用了 5 种光谱变换方法:反射率的对数($\log R$)、反射率的倒数($1/R$)、反射率的一阶微分(R')、反射率对数的一阶微分($\log R'$)和去包络线(R_c)。

在敏感波段的选择过程中,反射率首先经过不同变换形式,然后再计算 6 种变换形式下每个波长与含水量的相关系数,根据波长的相关系数曲线趋势,将研究波段分为若干波段,以波段范围内相关系数绝对值高的作为敏感波段,进行方程拟合。

1.4 土壤含水量预测模型的建立与验证

64 个样品被分为建模集(45 个)和验证集(19 个)。建模集样品由淤黑土、厚淤黄土和黑土中随机各选取的 10 个土样和青白土中随机选取的 15 个土样组成,剩余的样品都作为验证集样品。然后基于建模集数据,采用一元二次方程和多元线性回归 2 种方法建模。模型的稳定性由决定系数 R^2 判定, R^2 越高,模型越稳定。模型的精度则由均方根误差(RMSE)、平均误差(ME)和平均绝对误差(MAE)判定。

2 结果与分析

2.1 不同土种间土壤光谱反射率的差异

相同含水量下,不同砂姜黑土反射率随波长的关系如图 1 所示。在整个波段中,出现了 3 个吸收谷,按照吸收谷谷底反射率由小到大排列为:淤黑土<厚淤黄土<青白土<黑土,在 2 000 nm 附近此规律尤为明显。土壤光谱反射率由土壤组成及其结构等因素共同影响,有机质和质地是其中两个重要的影响因素,且有机质含量和黏粒含量都与土壤光谱反射率呈负相关^[2]。因此,同等条件下,有机质或黏粒含量较高,土壤的反射率较低。

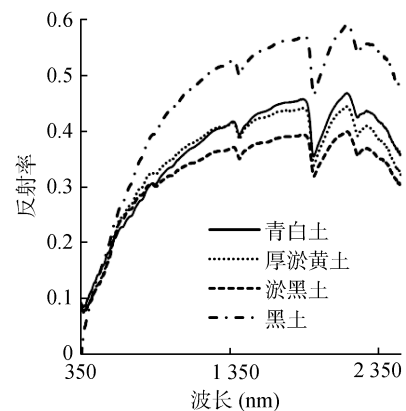


图 1 不同土种砂姜黑土的光谱曲线
(土样含水量为 20 g/kg)

淤黑土的光谱反射率偏低,可能是因为淤黑土是这 3 种土壤中有有机质和黏粒含量最高的土壤(表 1)。在有机质和黏粒含量较高情况下,有机质与黏粒含量是光谱反射率主要的影响因素。另外,青白土和黑土的有机质和黏粒含量相差不大,而光谱曲线差异较大,可能是其他土壤成分或土样表面粗糙度等其他因素的差异较大造成的^[2]。

表 1 供试不同砂姜黑土土种的有机质和黏粒含量

土种	有机质(g/kg)	黏粒(g/kg)
青白土	20.4	280.13
黑土	23.9	280.15
厚淤黄土	15.2	420.75
淤黑土	33.6	430.80

2.2 出反射光谱变化形式与土壤含水量的相关关系

本研究根据不同砂姜黑土 380 ~ 2 400 nm 波段的光谱特征与含水量的相关关系,利用 1.3 节中的方法对光谱进行分段。将 R 、 $\log R$ 、 $1/R$ 方法的研究波

段划分成 5 个波段: 380~1 110、1 111~1 340、1 341~1 560、1 561~1 870 和 1 871~2 400 nm。在表 2 中, R 和 $\log R$ 与土壤含水量的相关系数均小于 0, 呈负相关; 与之相反, $1/R$ 与土壤含水量的相关系数大于 0, 呈正相关。在 380~1 340 nm 波段范围内, R 的敏感波段的相关系数与其他 2 种变换形式基本相同。但从 1 340 nm 以后, 其他 2 种变换形式相关系数绝对值均较 R 的高。在这 3 种变换形式中, $1/R$ 在 1 931 nm 处的相关系数绝对值最高, 达到 0.79。

R' 、 $(\log R)'$ 和 R_c 这 3 种处理形式更能够突出土壤光谱对水分敏感的波段, 显现出更多的波峰或波谷。与前面 3 种变换形式不同的是, 经 R' 、 $(\log R)'$ 和 R_c 处理后的光谱被划分成 10 个波段范围: 380~680、681~750、751~840、841~950、951~170、1 271~1 460、1 461~1 680、1 681~1 920、1 921~

2 210 和 2 211~2 400 nm。划分后的结果见表 3。相比于 $(\log R)'$ 和 R_c , R' 对土壤含水量最为敏感, R' 提取的敏感波长的相关系数绝对值是这 3 种变换形式中最高的, 而且比 R 、 $\log R$ 和 $1/R$ 高。

2.3 砂姜黑土土壤含水量预测模型的建立与验证

采用 R 以及 R' 、 $\log R$ 、 $1/R$ 、 R_c 、 $(\log R)'$ 6 种反射率变换形式, 分段提取水分的敏感波段。然后在相应的波段范围内选择相关系数绝对值较大的反射率变换形式分别进行一元二次和多元线性回归, 建立砂姜黑土含水量的预测模型(表 4)。除了 R_c , 反射率的其他变换形式都能在一定程度上提高光谱模型的决定系数。经过决定系数比较, R' 的非线性和多元线性模型决定系数都是最高的; 而 R' 的多元线性回归方程相对于非线性方程更优, 因此 R' 的多元线性回归方程是最优的。

表 2 土壤 R 、 $\log R$ 、 $1/R$ 反射率变换形式与含水量的相关关系

波段(nm)	R		$\log R$		$1/R$	
	敏感波长(nm)	相关系数	敏感波长(nm)	相关系数	敏感波长(nm)	相关系数
380~1 110	738	-0.58	745	-0.57	755	0.56
1 111~1 340	1 156	-0.52	1 157	-0.52	1 158	0.51
1 341~1 560	1 441	-0.65	1 449	-0.70	1 449	0.73
1 561~1 870	1 870	-0.62	1 870	-0.67	1 870	0.69
1 871~2 400	1 897	-0.67	1 903	-0.75	1 931	0.79

注: 表中 R 、 $\log R$ 、 $1/R$ 分别表示反射率、反射率的对数、反射率的倒数。

表 3 土壤 R' 、 $(\log R)'$ 和 R_c 反射率变换形式与含水量的相关关系

波段(nm)	R'		$(\log R)'$		R_c	
	敏感波长(nm)	相关系数	敏感波长(nm)	相关系数	敏感波长(nm)	相关系数
380~680	613	-0.82	621	-0.58	386	0.43
681~750	712	0.63	692	0.40	687	-0.24
751~840	807	0.50	766	0.43	816	-0.58
841~950	911	0.53	862	0.38	882	0.21
951~1 270	1 142	0.65	1 247	0.70	1 214	-0.72
1 271~1 460	1 392	-0.88	1 458	0.85	1 401	-0.76
1 461~1 680	1 570	0.90	1 591	0.85	1 513	-0.76
1 681~1 920	1 850	0.90	1 852	-0.84	1 864	-0.78
1 921~2 210	2 147	0.84	2 146	0.85	2 118	-0.77
2 211~2 400	2 221	-0.85	2 347	-0.81	2 399	-0.66

注: 表中 R' 、 R_c 、 $(\log R)'$ 分别表示反射率的一阶微分、去包络线后的反射率、反射率对数的一阶微分。

表 4 基于敏感波段的砂姜黑土水分预测模型精度

反射率变换形式	决定系数		反射率变换形式	决定系数	
	非线性回归	多元线性回归		非线性回归	多元线性回归
R	0.63	0.71	$1/R$	0.64	0.76
R'	0.82	0.89	R_c	0.60	0.69
$\log R$	0.65	0.79	$(\log R)'$	0.75	0.86

在表 5 中列举了预测精度较好的模型,分别是 R 、 R' 、 $(\log R)'$ 。其中 R' 的多元线性方程在检验过程中,表现最好,其均方根误差等都较小。利用 1.4 所述验证集的 19 个样品进行模型的预测精度验证。选取决

定系数较高的一元二次方程进行检验,即验证 R' 建立的水分模型。从图 2 可以看出,实测值和预测值的拟合度较高,达到 0.89。因此, R' 建立的水分模型适宜预测砂姜黑土含水量。

表 5 模型预测精度的比较

反射率变换形式	回归方法	平均误差	平均绝对误差	均方根误差(g/kg)
R	非线性	-0.013	0.096	120
	多元线性	-0.18	0.19	15
R'	非线性	-0.026	0.064	950
	多元线性	-0.010	0.050	4.6
$(\log R)'$	非线性	-0.016	0.079	110
	多元线性	-0.019	0.065	6.6

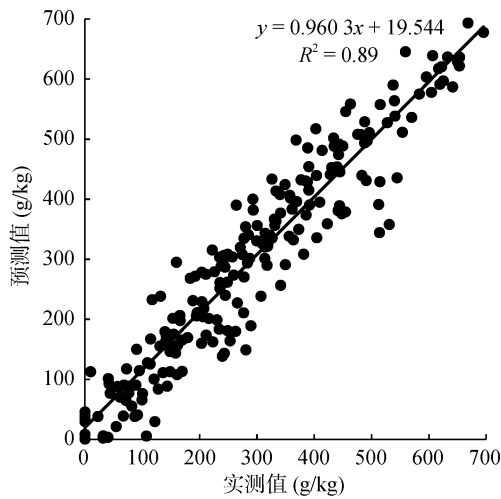


图 2 R' 敏感波长所建模型的检验

3 结论

1) 不同土种的砂姜黑土有机质和黏粒含量等组成物质的不同,导致土种间光谱特征存在一定差异。淤黑土反射率偏低,其原因可能在于有机质含量和黏粒含量较高,且有机质和黏粒含量均与光谱反射率呈反比,从而导致其光谱反射率偏低。

2) 从一阶微分建立的多元线性回归模型可以看出,712、807、1142、1570、1850和2221 nm是砂姜黑土含水量的敏感波长,水分预测方程为: $y = 355.28R'_{712} - 52.64R'_{807} + 495.61R'_{1142} + 593.96R'_{1570} - 161.85R'_{1850} - 338.69R'_{2221} + 0.116$,以这些敏感波长建立的多元回归模型,拟合度和精度都较高,可以作为砂姜黑土水分含量预测的理论依据。

参考文献:

[1] 张学礼,胡振琪,初士立. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(1): 118-123

[2] 史舟,梁宗正,杨媛媛,等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247-260

[3] 张娟娟,熊淑萍,时雷,等. 基于近红外光谱分析的土壤全氮含量估测研究[J]. 土壤, 2015, 47(4): 653-657

[4] 田焯,沈润平,丁国香. 支持向量机在土壤镁含量高光谱估算中的应用[J]. 土壤, 2015(3): 602-607

[5] 陈颂超,冯来磊,李硕,等. 基于局部加权回归的土壤全氮含量可见-近红外光谱反演[J]. 土壤学报, 2015(2): 312-320

[6] Liu W D, Baret F, Gu X F, et al. Relating soil surface moisture to reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2/3): 238-246

[7] 张俊华,张佳宝. 长期定位施肥条件下作物光谱特征及养分吸收量预测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 173-181

[8] 栾福明,熊黑钢,王芳,等. 基于小波分析的土壤碱解氮含量高光谱反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2828-2832

[9] 蒋阿宁,黄文江,赵春江,等. 基于光谱指数的冬小麦变量施肥冠层光谱特征研究及产量分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1907-1913

[10] 姚艳敏,魏娜,唐鹏钦,等. 黑土土壤水分高光谱特征及反演模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 95-100

[11] 张俊华,贾科利. 典型龟裂碱土土壤水分光谱特征及预测[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 884-890

[12] 彭杰,向红英,王家强,等. 基于野外实测高光谱数据的干旱区耕作土壤含水量反演研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 241-246

[13] Hummel J W, Sudduth K A, Hollinger S E. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 32(2): 149-165

[14] 何挺,王静,程焯,等. 土壤水分光谱特征研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 1027-1032

[15] 李美婷,武红旗,蒋平安,等. 利用土壤的近红外光谱特征测定土壤含水量[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2117-2121

[16] 刘洋,丁潇,刘焕军,等. 黑土土壤水分反射光谱特征定量分析与预测[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 1021-1026

[17] 金慧凝,张新乐,刘焕军,等. 基于光谱吸收特征的土壤含水量预测模型研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 627-635

Inversion of Soil Moisture of Shajiang Black Soil by Hyper-spectra

ZHANG Yingdi^{1,2}, ZHANG Jiabao^{1*}, LI Xiaopeng¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to study spectral features of 4 soil species of Shajiang black soil under different water contents, samples were determined by ASD spectrometer in the lab. And the correlation between spectral reflectance and water content was discussed. To improve the accuracy of the model, these models were established with 6 categories of transformations of reflectance using two kinds of methods, such as multiple linear regression and nonlinear regression. The result showed that the correlation coefficient between first derivative differential of reflectance (R') and water content was the highest and its relationship was negative. At the bands of 712, 807, 1 142, 1 570, 1 850 and 2 221 nm, the model established by R' was the fittest.

Key words: Shajiang black soil; Spectral feature; Water content; Spectrum reflectance