

基于光谱吸收特征的土壤含水量预测模型研究^{*}

金慧凝 张新乐 刘焕军[†] 康冉 付强 宁东浩

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要 为了定量分析土壤含水量与反射光谱特征之间关系, 并为土壤含水量速测提供理论依据。以黑土作为研究对象, 测定实验室光谱反射率, 利用去包络线方法提取反射光谱特征指标, 建立土壤水分含量高光谱预测模型。结果表明: 黑土含水量与1 420 nm、1 920 nm附近吸收谷的主要光谱特征(吸收谷深度、宽度、面积)呈显著正相关; 1 920 nm附近吸收谷可作为黑土土壤水分的特征吸收谷, 由其光谱特征参数预测黑土含水量; 以1 920 nm附近吸收谷面积为自变量建立的一元线性回归模型预测精度高, 输入量少, 可以作为土壤含水量速测仪器研制的理论依据。

关键词 反射光谱; 土壤水分; 去包络线; 吸收特征

中图分类号 TP701 **文献标识码** A

含水量是土壤理化特性的一个重要指标。就农业而言, 土壤水分是农作物生长发育的基本条件, 也是灌溉管理和产品预报中的重要参数, 尤其在精准农业中是极为关键的参数。因此, 土壤水分监测一直是人们关注的问题^[1]。高光谱遥感具有较高的光谱分辨率^[2], 能够快速获取土壤反射光谱信息, 其在土壤理化参数预测及相关研究中应用广泛^[3-5]。高光谱遥感可探测表层土壤含水量细微差异的变化, 为动态监测区域或地块尺度土壤含水量提供了一种新的技术手段^[6]。

对于土壤含水量与土壤反射光谱特征的关系, 国内外学者已经进行了大量的研究^[7-11], 并得到了较为一致的结论: 在一定的土壤含水量范围内, 土壤光谱反射率随土壤水分的增加而降低; 在土壤含水量达到阈值后, 土壤光谱反射率随土壤水分的增加而增加。已有土壤含水量高光谱预测模型, 多以反射率及其数学变换形式作为输入量, 但缺少对反射光谱特征机理的定量分析。土壤吸收谷光谱特

征参数在土壤理化参数高光谱预测^[12-13]、土壤盐碱化评价^[14-15]等方面被普遍使用, 并取得了较好的效果。但关于其在土壤含水量预测中应用的文献较少, Bowers 和 Hanks^[16]认为土壤反射光谱在1 400 nm、1 900 nm、2 200 nm处为土壤水分吸收带; 何挺等^[17]提取了黄绵土、绵砂土和风砂土在1 450 nm和1 925 nm两个吸收谷的光谱特征参数, 并建立了土壤含水量预测模型。但以上研究以不同土壤类型为研究对象, 而土壤光谱是土壤内在理化特性的综合反映^[18], 不同类型的土壤由于其理化特征不同, 光谱特征存在差异, 将不同类型土壤作为一个整体、研究其光谱特性而得到的土壤含水量预测模型, 在预测某一特定类型土壤含水量时, 所得的结果与实际情况存在误差^[19-20]。

因此, 本文以单一土壤类型——黑土为研究对象, 精细调配不同含水量, 以获得含水量间隔更小的土壤样本。测定黑土实验室光谱反射率, 利用去包络线方法提取土壤反射光谱吸收谷特征参数, 分

* 国家自然科学基金项目(41501357)、黑龙江省普通高等学校新世纪优秀人才培养计划和黑龙江省博士后启动基金(LBH-Q13026)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41501357), the Program for New Century Excellent Talents In Heilongjiang Provincial University, and the Heilongjiang Postdoctoral Grant (No. LBH-Q13026)

† 通讯作者 Corresponding author: 刘焕军(1981—), 男, 黑龙江省穆棱人, 副教授, 主要从事地物高光谱定量遥感研究。

E-mail: huanjunliu@yeah.net

作者简介: 金慧凝(1992—), 女, 黑龙江省宁安人, 硕士研究生, 主要从事地物高光谱与农业遥感研究。E-mail:

huiningjin@yeah.net

收稿日期: 2015-07-02; 收到修改稿日期: 2015-11-27

析土壤含水量与光谱特征参数的关系,建立黑土含水量高光谱预测模型,以探讨运用光谱特征参数预测土壤含水量的潜力,为土壤水分含量的快速测定提供新方法。

1 材料与方法

1.1 样本采集与含水量调配试验

2009年5月22—26日,于作物播种后、出苗前,在黑龙江典型黑土区采集不同有机质含量的8个土样(有机质含量分别为30.6、31.8、32.6、36.9、39.2、39.5、50.0、51.8 g kg⁻¹)各15 kg。采用新的土壤水分调配方法,精细调配不同含水量,共得到土壤样本102个。含水量调配试验具体过程如下:首先确定8个土样各自的饱和含水量,将各风干土样分成含水量调配所需的个数(各土样需要调配不同含水量的个数等于各自土样的饱和含水量除以含水量间隔);为保证土壤与水充分混合,将土样置于密封效果好的塑料袋中,对土样采用喷壶喷蒸馏水,边喷边搅拌;为使土壤充分均匀吸收水分,喷水过后,将每个土样在4~5℃的环境下密封放置24 h;随后对其进行光谱测试,然后取每个土样容器中部的土壤,装入已经称重的小烧杯,称重,随后将其在烘箱105℃的环境下放置8 h,确定土样为恒重后,计算各土样土壤含水量^[21]。

1.2 土壤反射光谱测定

对102个土壤样本进行反射光谱测定,样本的高光谱反射率采用美国分析光谱仪器公司生产的野外便携式高光谱仪ASD FieldSpec®3在暗室内测定,每个土壤样本采集10条光谱曲线,取平均得到土壤的实际反射光谱数据。

1.3 数据处理

高光谱反射数据预处理:采用9点加权移动平均法对光谱曲线进行平滑去噪处理。利用高斯模型对光谱数据进行5 nm光谱重采样。

去包络线与光谱特征参数计算:对于同一种土壤,光谱反射率的差异相对较小,而包络线消除法可以有效突出反射光谱曲线特征,并将反射率归一化到0~1之间,光谱的吸收特征也归一化到一致的光谱背景上^[15],在去包络线的基础上发展了一些光谱吸收特征参数^[22],主要有吸收谷左右肩与谷底值及相应的波长位置(L_1 、 L_v 、 L_r)、吸收深度(D)、吸收宽度(W)、吸收谷总面积

($A=A_1+A_2$,其中, A_1 和 A_2 分别是吸收谷左/右半部分的面积)和对称度(S , $S=A_1/A$),见图1。在遥感软件ENVI4.6环境下,建立土壤光谱数据库;利用Continuum Removed功能对土壤光谱数据进行去包络线处理,利用Visual C#语言编写程序计算得到各土壤样本的光谱特征参数^[23]。

1.4 模型建立与验证

为准确评价模型精度与稳定性,并保证样本之间的含水量间隔,将102个样本分为两部分,以固定的含水量间隔,挑出68个样本作为建模样本,其余的34个样本作为验证样本。分别采用一元线性回归法、多元线性逐步回归法、偏最小二乘法,以反射率、去包络线值、光谱吸收特征参数作为输入量,建立黑土含水量高光谱预测模型。模型精度由决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)进行综合评价,模型的决定系数(R^2)越大,模型越稳定;RMSE越小,模型预测能力越好^[24-25]。

2 结果与讨论

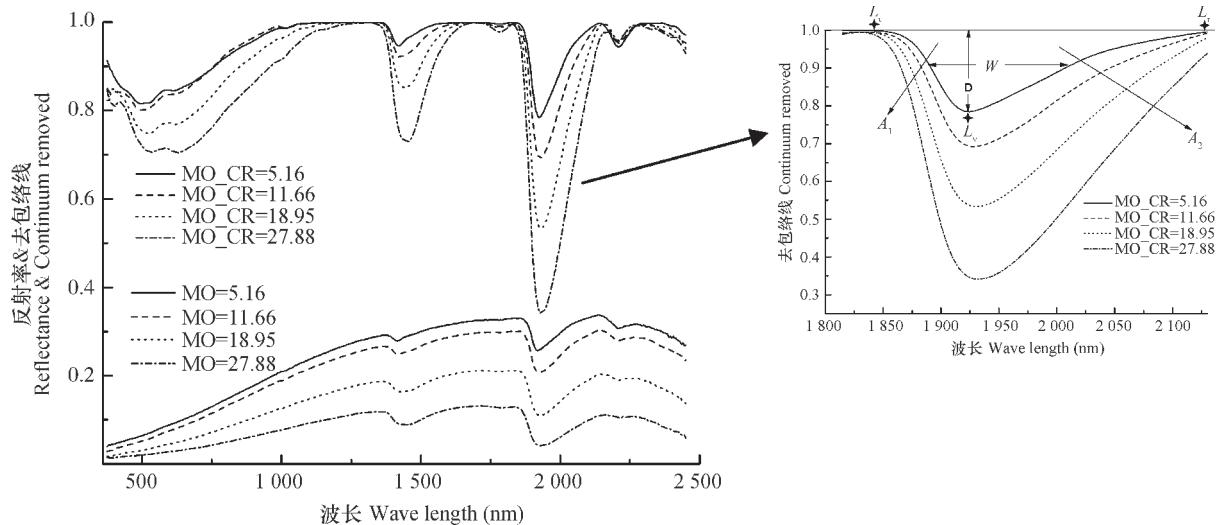
2.1 不同含水量黑土反射光谱特征

图1为有机质含量31.8 g kg⁻¹、不同含水量土样的反射光谱曲线及对应去包络线。随着土壤含水量的增加,光谱反射率逐渐减小。包络线去除后的曲线使可见光近红外波段的吸收特征显著增强。由去包络曲线可以看出,黑土光谱反射率在400~2 500 nm范围内主要有5个光谱吸收谷,吸收谷最小值的波长位置分别大致位于510、615、1 420、1 920和2 210 nm(命名为 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 和 G_5)。随着含水量的增加,前四个吸收谷的深度逐渐增加, G_1 和 G_2 吸收谷的形状变化较大,但变化不像1 420 nm和1 920 nm附近吸收谷那么规律;1 420 nm附近的吸收谷谷底的波段位置随着土壤水分含量的增加有向右偏移的迹象,但1 920 nm附近的吸收谷谷底波段位置随着土壤水分含量的增加无明显变化,而2 210 nm附近吸收谷的深度、面积等特征随着土壤水分含量的增加有明显变化;2 210 nm附近的吸收谷特征随含水量的变化不明显。

通过对土壤含水量与土壤光谱吸收特征之间的相关性及显著性进行分析(表1)进一步证明了上述现象,可以看出,前四个吸收谷的绝大多数光谱特征参数与土壤含水量呈正相关;从显著性水平来看,除 G_4 左肩位置仅达到显著水平外,其余的均

达到极显著水平。而 G_5 的绝大多数光谱特征参数与土壤含水量呈负相关; 仅有两处特征参数达到极显著水平, 其余特征参数为显著水平。 G_1 、 G_2 光谱特征参数与含水量的相关系数相对偏小, 土壤水分对前两个吸收谷的作用较小。 G_1 和 G_2 的光谱特征主要受土壤有机质及机械组成的影响。 G_3 谷底波段位置与含水量的相关系数高于 G_4 , 而 G_4 附近的深度、宽

度、面积与含水量的相关系数, 均高于 G_3 ; G_3 、 G_4 主要光谱特征参数与含水量均呈显著正相关, 且相关系数高, 表明其与土壤含水量有着较大的相关性, 可以将其作为输入量, 建立预测模型。而 G_5 各参数与含水量相关系数低, 表明其与土壤含水量的相关性较小, G_5 特征是土壤水分和矿物组成共同作用的结果。



注: $MO_CR=51.6$ 代表含水量为 51.6 g kg^{-1} 的土样对应的去包络光谱曲线, $MO=51.6$ 代表含水量为 51.6 g kg^{-1} 的土样对应的反射光谱曲线。包络光谱曲线中各参数代表的意义: L_L 、 L_v 、 L_r 分别代表吸收谷左右肩与谷底值相应的波长位置; D 、 W 、 A 分别代表吸收谷的吸收深度、吸收宽度、吸收谷总面积, S 代表对称度。下同 Note: $MO_CR=51.6$ represents the post-continuum removal spectral curve of the soil sample 51.6 g kg^{-1} in moisture content; $MO=51.6$ represents the reflectance curve of the soil sample 51.6 g kg^{-1} in moisture content; L_L , L_v and L_r stands for location of the left shoulder, right shoulder and bottom of the absorption valley, respectively in the post-continuum removal spectral curve; D , W and A stands for depth, width and total area of a spectral absorption valley, and S for symmetry of the valley. The same as below

图1 不同含水量黑土 (有机质含量为 31.8 g kg^{-1}) 的反射光谱及去包络光谱曲线

Fig. 1 Soil spectral curves and continuum removal of soil samples with different moisture (%)

表1 土壤含水量与光谱吸收特征间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between soil moisture and spectral indices

L_{v-G1}	D_{G1}	A_{G1}	L_{v-G2}	D_{G2}	A_{G2}	W_{G1G2}	L_{l-G3}	L_{v-G3}	L_{r-G3}
0.361**	0.662**	0.558**	0.316**	0.666**	0.616**	0.549**	-0.708**	0.901**	0.740**
D_{G3}	W_{G3}	A_{G3}	S_{G3}	L_{l-G4}	L_{v-G4}	L_{r-G4}	D_{G4}	W_{G4}	A_{G4}
0.960**	0.870**	0.960**	0.845**	-0.283*	0.657**	0.859**	0.967**	0.968**	0.973**
S_{G4}	L_{l-G5}	L_{v-G5}	L_{r-G5}	D_{G5}	W_{G5}	A_{G5}	S_{G5}		
0.389**	0.790**	-0.188	-0.553*	-0.179*	-0.170*	-0.387*	0.378**		

注: **表示 $p < 0.01$; *表示 $p < 0.05$ 。 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 分别代表黑土光谱反射率在 $400 \sim 2500 \text{ nm}$ 范围内的5个主要光谱吸收谷最小值的波长位置分别大致位于 510 、 615 、 1420 、 1920 、 2210 nm Note: ** represents $p < 0.01$; and * $p < 0.05$ G_1 , G_2 , G_3 , G_4 and G_5 stands for location of the bottom of the five main spectral absorption valleys, separately, at 510 , 615 , 1420 , 1920 , 2210 nm within the range of $400 \sim 2500 \text{ nm}$ in waveband along the black soil spectral reflectance curve

2.2 土壤含水量高光谱预测模型

本文选取了三种方法（一元线性回归法、多元线性逐步回归法、偏最小二乘法）建立黑土含水量预测模型。三种建模方式有其各自的优势，一元线性回归法建立模型输入量少，计算量小，适合用于作为便携式土壤水分测试仪的理论基础^[26]；多元线性逐步回归法在光谱分析中应用广泛，其建立的模型简单直观、容易理解，该方法在可控条件下可靠性较高；偏最小二乘法采用对数据信息进行分解和筛选的方式，有效提取对系统解释性最强的综合变量，剔除多重相关信息和无解释意义信息的干扰^[27]。

2.2.1 一元线性回归模型 选取与土壤含水量相关系数高于0.9的光谱吸收特征参数建立一元线性回归模型（表2），除1 420 nm附近吸收谷谷底波长位置外，其他各光谱特征参数建立的预测模型

建模决定系数均达到0.921以上，以1 920 nm附近吸收谷面积建立的预测模型效果最佳，建模决定系数达到了0.946。选择土壤含水量与敏感波段处（1 420 nm、1 920 nm、2 210 nm）光谱反射率建立一元线性回归模型，由表2可以看出，由敏感波段处反射率建立的一元线性回归模型的建模决定系数低于由光谱特征参数（除1 420 nm附近吸收谷谷底波长位置外）建立的一元线性回归模型，建模RMSE高于由光谱特征参数（除1 420 nm附近吸收谷谷底波长位置外）建立的一元线性回归模型，说明利用光谱特征参数建立的一元线性回归模型的稳定性更好、精度更高，这表明可以将光谱吸收特征参数运用于土壤含水量预测，对于黑土来说，1 920 nm附近的吸收谷光谱特征参数建立的一元线性回归预测模型效果最好。

表2 土壤含水量一元线性回归预测模型

Table 2 Unary linear regression model for prediction of soil moisture

参数 Parameter	模型 Model	模型精度 Model precision		检验 Test	
		R ²	RMSE	R ²	RMSE
L_{v-G3}	$y = 0.5597L_{v-G3} - 783.36$	0.812	4.149	0.844	4.368
D_{G3}	$y = 111.23D_{G3} + 1.6127$	0.921	2.692	0.824	2.815
A_{G3}	$y = 74.0781A_{G3} + 4.0657$	0.921	2.685	0.826	2.788
D_{G4}	$y = 64.311D_{G4} - 11.443$	0.935	2.435	0.946	2.809
W_{G4}	$y = 0.4974W_{G4} - 49.07$	0.938	2.387	0.987	2.443
A_{G4}	$y = 32.355A_{G4} - 3.6544$	0.946	2.225	0.924	2.361
R_{1420}	$y = -146.09R_{1420} + 44.05$	0.866	3.505	0.882	3.582
R_{1920}	$y = -136.75R_{1920} + 36.41$	0.876	3.372	0.930	3.655
R_{2210}	$y = -120.02R_{2210} + 38.625$	0.886	3.221	0.926	3.450

2.2.2 多元线性逐步回归模型 选择与土壤含水量相关系数最大的波段作为敏感波段，分别以反射率与去包络线后的敏感波段的值、吸收谷光谱特征参数作为输入量，建立土壤含水量多元线性逐步回归预测模型（表3）。结果显示，以去包络线后的值和光谱特征参数作为输入量的模型，预测效果和稳定性更好。

2.2.3 偏最小二乘回归模型 分别以反射率、去包络线后的值、吸收谷光谱特征参数作为输入变量，建立黑土含水量偏最小二乘回归模型，模型之

间的差别不大（表4）。其中，以反射率为输入变量建立的模型精度最高，稳定性最好。

3 讨 论

本文采用三种方法建立的黑土含水量预测模型效果较为理想。建模结果表明：运用土壤吸收谷光谱特征参数预测土壤含水量具有可行性。由三种模型的建模效果可以看出，虽然运用吸收谷光谱特征参数建立的一元线性回归模型的精度和稳定性与运

表3 土壤含水量多元线性逐步回归预测模型

Table 3 SMLR models for prediction of soil moisture

处理 Treatment	模型 Model	模型精度 Model precision		检验 Test	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE
反射率 Reflectance	$y = 30.775 + 466.581R_{1775} - 1383.941R_{2125} + 927.233R_{2335}$	0.935	2.381	0.946	3.232
去包络线 Continuum removal	$y = -1.207 - 62.344z_{2045} + 699.577z_{1410} - 632.589z_{1420}$	0.953	2.029	0.900	2.207
G_1, G_2, G_3, G_4, G_5	$y = -101.667 + 22.771A_{G4} + 0.059L_{L-G3} + 0.189W_{G4}$	0.951	2.142	0.972	2.459

注: y 为土壤含水量, R_{1775} 为1 775 nm波段光谱反射率, z_{2045} 为2 045 nm波段去包络线后的值 Note: y stands for moisture, R_{1775} for reflectance at 1 775 nm, z_{2045} for post-continuum-removal value at 2 045 nm

表4 土壤含水量偏最小二乘回归预测模型

Table 4 PLSR models for prediction of soil moisture

处理 Treatment	模型精度 Model precision		检验 Test	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
反射率 Reflectance	0.952	2.096	0.943	2.532
去包络线 Continuum removal	0.947	2.195	0.952	2.325
全部5个吸收谷 All five spectral absorption valley	0.950	2.135	0.936	2.672

用多元线性逐步回归、偏最小二乘法建立的模型相差不大, 但是一元线性回归模型的输入量远少于多元线性逐步回归和偏最小二乘法的输入量, 且一元线性回归模型计算量小、操作简捷。反射率、去包络线后的值与土壤含水量的最大相关系数所在的波段位置, 不同地域、不同样本, 差异较大, 模型普适性较差。而由去包络线得到的吸收谷光谱特征参数只与光谱吸收谷的形状特征有关, 对于特定的土壤类型, 吸收谷的位置是相对固定的^[15]; 并且土壤反射光谱特征是土壤有机质、水分、机械组成等综合作用的结果, 基于去包络线法提取的吸收谷光谱特征参数降低了对上述影响因素的敏感性^[23], 因此, 以吸收谷光谱特征参数作为输入量建立的土壤含水量预测模型具有更强的稳定性和普适性。

1 920 nm附近吸收谷的光谱特征参数与黑土含水量显著正相关, 以其作为输入变量建立的一元线性回归预测模型精度较高。以1 920 nm附近吸收谷面积建立的预测模型效果最佳, 建模决定系数达到了0.946, 建模RMSE达到了2.225, 其建模效果远好于利用敏感波段处反射率建立的一元线性回归模型。Bowers和Hanks^[16]认为1 900 nm是土壤水分的特性波段, 提出可由土壤反射光谱在这一波段值

的大小推算土壤含水量, 但未给出具体的模型。本文通过统计分析与建模得出: 1 920 nm附近的吸收谷是黑土土壤水分的特征吸收谷, 可由该吸收谷的光谱特征参数预测黑土含水量, 并给出了具体的一元线性回归预测模型和多元线性逐步回归预测模型。何挺等^[17]建立了光谱数据和相应土壤含水量之间的定量关系, 得到在预测土壤含水量时, 1 450 nm吸收谷较1 925 nm吸收谷更为有效。本文结论与之存在差异, 这可能与二者所研究的土壤类型不同有关。

值得注意的是, 偏最小二乘回归模型虽然输入波段较多, 但预测精度和稳定性均与1 920 nm附近吸收谷的面积为自变量的一元线性回归模型相差不大(表2和表4), 这可作为土壤含水量速测仪器研制的依据。

4 结 论

1 420 nm和1 920 nm附近的反射光谱吸收谷特征参数与黑土含水量的相关性较好; 采用土壤光谱吸收谷特征参数建立的黑土含水量高光谱预测模型, 精度较高, 稳定性较好; 1 920 nm附近的吸收

谷可作为黑土土壤水分的特征吸收谷,由该吸收谷的光谱特征参数预测黑土含水量;以1 920 nm附近吸收谷面积为自变量建立的一元线性回归模型预测精度与以多变量为输入量建立的偏最小二乘回归模型相差不大,可以作为土壤含水量速测仪器研制的依据。本研究建立的模型精度高、稳定性好,这与采用了单一的土壤类型和改良的土壤水分调配方法有很大的关系。相关结论对于不同土壤类型的效果如何,需要进一步的研究来明确。

参 考 文 献

- [1] 刘伟东, Baret F, 张兵, 等. 高光谱遥感土壤湿度信息提取研究. 土壤学报, 2004, 41 (5) : 700—706
Liu W D, Baret F, Zhang B, et al. Extraction of soil moisture information by hyperspectral remote sensing (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (5) : 700—706
- [2] 胡猛, 冯起, 席海洋. 遥感技术监测干旱区土壤水分研究进展. 土壤通报, 2013, 44 (5) : 1270—1275
Hu M, Feng Q, Xi H Y. Progress of monitoring soil moisture by remote sensing in arid areas (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44 (5) : 1270—1275
- [3] 吴才武, 夏建新, 段峥嵘. 土壤有机质测定方法述评与展望. 土壤, 2015, 47 (3) : 453—460
Wu C W, Xia J X, Duan Z R. Review on detection methods of soil organic matter (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (3) : 453—460
- [4] 张威, 高小红, 杨扬, 等. 基于光谱分析的土壤重金属含量估算研究——以三江源区玉树县和玛多县为例. 土壤, 2014, 46 (6) : 1052—1060
Zhang W, Gao X H, Yang Y, et al. Estimating heavy metal contents for topsoil based on spectral analysis—A case study of Yushu and Maduo Counties in the Three-River Source Region (In Chinese). *Soils*, 2014, 46 (6) : 1052—1060
- [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. 土壤学报, 2015, 52 (2) : 312—320
Chen S C, Feng L L, Li S, et al. VIS-VIR spectral inversion for prediction of soil total nitrogen content in laboratory based on locally weighted regression (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (2) : 312—320
- [6] 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. 农业工程学报, 2011, 27 (8) : 95—100
Yao Y M, Wei N, Tang P Q, et al. Hyper-spectral characteristics and modeling of black soil moisture content (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2011, 27 (8) : 95—100
- [7] Lobell D B, Asner G P. Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66 (3) : 722—727
- [8] Sadeghi M, Jones S B, Philpot W D. A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 164: 66—76
- [9] Liu W D, Baret F, Gu X F, et al. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81 (2) : 238—246
- [10] 程街亮, 纪文君, 周银, 等. 土壤二向反射特性及水分含量对其影响研究. 土壤学报, 2011, 48 (2) : 255—262
Cheng J L, Ji W J, Zhou Y, et al. Soil bidirectional reflectance characteristics as affected by soil moisture (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (2) : 255—262
- [11] 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. 光谱学与光谱分析, 2012, 32 (8) : 2117—2121
Li M T, Wu H Q, Jiang P A, et al. Measuring soil water content by using near infrared spectral characteristics of soil (In Chinese). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32 (8) : 2117—2121
- [12] 谢伯承, 薛绪掌, 刘伟东, 等. 基于包络线法对土壤光谱特征的提取及其分析. 土壤学报, 2005, 42 (1) : 171—175
Xie B C, Xue X Z, Liu W D, et al. Hull-curve-method-based extraction and analysis of soil spectral characteristics (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (1) : 171—175
- [13] 胥静, 蒋平安, 武红旗. 典型草地土壤包络线光谱特征参数与植被覆盖度相关性. 湖北农业科学, 2015, 54 (1) : 43—52
Xu J, Jiang P A, Wu H Q. Relationship between meadow soil and vegetation coverage based on continuum removing (In Chinese). *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54 (1) : 43—52
- [14] 李晓明, 韩霁昌, 李娟. 典型半干旱区土壤盐分高光谱特征反演. 光谱学与光谱分析, 2014, 34 (4) : 1081—1084
Li X M, Han J C, Li J. Research on hyperspectral inversion of soil salinity in typical semiarid area (In Chinese). *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34 (4) : 1081—1084
- [15] 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. 红外与毫米波学报, 2008, 27 (2) : 138—142
- Liu H J, Zhang B, Wang Z M, et al. Soil saline-alkalization evaluation basing on spectral reflectance characteristics (In Chinese). Journal of Infrared Millimeter Waves, 2008, 27 (2) : 138—142
- [16] Bowers S, Hanks R. Reflection of radiant energy from soils. Soil Science, 1965, 100 (2) : 130—138
- [17] 何挺, 王静, 程烨, 等. 土壤水分光谱特征研究. 土壤学报, 2006, 43 (6) : 1027—1032
- He T, Wang J, Cheng Y, et al. Spectral features of soil moisture (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43 (6) : 1027—1032
- [18] 纪文君, 史舟, 周清, 等. 几种不同类型土壤的VIS-NIR光谱特性及有机质响应波段. 红外与毫米波学报, 2012, 31 (3) : 277—282
- Ji W J, Shi Z, Zhou Q, et al. VIS-NIR reflectance spectroscopy of the organic matter in several types of soils (In Chinese). Journal of Infrared Millimeter Waves, 2012, 31 (3) : 277—282
- [19] 刘磊, 沈润平, 丁国香. 基于高光谱的土壤有机质含量估算研究. 光谱学与光谱分析, 2011, 31 (3) : 762—766
- Liu L, Shen R P, Ding G X. Studies on the estimation of soil organic matter content based on hyper-spectrum (In Chinese). Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31 (3) : 762—766
- [20] 申艳, 张晓平, 梁爱珍, 等. 近红外光谱法在土壤有机质研究中的应用. 核农学报, 2010, 24 (1) : 199—207
- Shen Y, Zhang X P, Liang A Z, et al. Application of near infrared spectroscopy in soil organic matter research (In Chinese). Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24 (1) : 199—207
- [21] 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. 土壤学报, 2014, 51 (5) : 1021—1026
- Liu Y, Ding X, Liu H J, et al. Quantitative analysis of reflectance spectrum of black soil as affected by soil moisture for prediction of soil moisture in black soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (5) : 1021—1026
- [22] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000
- Pu R L, Gong P. Hyperspectral remote sensing and its applications (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2000
- [23] 刘焕军, 张柏, 张渊智, 等. 基于反射光谱特性的土壤分类研究. 光谱学与光谱分析, 2008, 28 (3) : 624—628
- Liu H J, Zhang B, Zhang Y Z, et al. Soil taxonomy on the basis of reflectance spectral characteristics (In Chinese). Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28 (3) : 624—628
- [24] 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. 农业工程学报, 2014, 30 (17) : 167—174
- Peng J, Liu H J, Shi Z, et al. Regional heterogeneity of hyperspectral characteristics of salt-affected soil and salinity inversion (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (17) : 167—174
- [25] 于士凯, 姚艳敏, 王德营, 等. 基于高光谱的土壤有机质含量反演研究. 中国农学通报, 2013, 29 (23) : 146—152
- Yu S K, Yao Y M, Wang D Y, et al. Studies on the inversion of soil organic matter content based on hyper-spectrum (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29 (23) : 146—152
- [26] 孙建英, 李民赞, 郑立华, 等. 基于近红外光谱的北方潮土土壤参数实时分析. 光谱学与光谱分析, 2006, 26 (3) : 426—429
- Sun J Y, Li M Z, Zheng L H, et al. Real-time analysis of soil moisture, soil organic matter, and soil total nitrogen with NIR spectra (In Chinese). Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26 (3) : 426—429
- [27] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1999
- Wang H W. Partial least-squares regression-method and applications (In Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 1999

Soil Moisture Predicting Model Based on Spectral Absorption Characteristics of the Soil

JIN Huining ZHANG Xinle LIU Huanjun[†] KANG Ran FU Qiang NING Donghao

(College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract Soil moisture is predicted with spectroscopy based on the mechanism of moisture affecting characteristics of spectral reflectance of the soil, but most studies took reflectance as an independent variable in moisture predicting models, and paid only a little attention to absorption characteristics. In this study 8 samples of black soil different in soil organic matter content were collected from its experiment field and prepared them into 102 soil samples using a new soil moisture adjusting method. The samples were then put individually into wide round glass disks. Spectral reflectances of the samples in the visible and near infrared region were measured with an ASD Field Spectroradiometer in the laboratory, yielding 10 spectral curves for each sample, of which a mean was worked out as the actual reflectance of the sample. Since the spectrometer responds unevenly to electromagnetic waves different in wavelength, spectral data need to be pre-processed for smoothing at a regular wavelength interval of 5 nm to diminish noise before data analysis. As the soil samples did not vary much in spectral characteristics, the continuum removal method was used to effectively make the characteristics of spectral adsorption and reflection prominent in the spectral curves. Soil spectral reflectance is comprehensive representation of soil physical and chemical parameters, and hence very sensitive to changes in soil organic matter (SOM) soil moisture, Fe, coarseness, mechanical composition and so on. However, the characteristic parameters of spectral adsorption valleys extracted with the continuum removal method reduced the sensitivities. The continuum removal method was applied with the aid of Software ENVI 4.6. The characteristic parameters of soil spectral adsorption that need to be extracted encompass area, depth and width of a spectral absorption valley. Correlation analysis was used to determine relationships of moisture content of the black soil with reflectance, spectral characteristic parameters and post-continuum-removal values. Based on the Simple Linear Regression, Stepwise Multiple Linear Regression (SMLR) and Partial Least Squares Regression (PLSR) method separately, high-spectrum models for prediction of black soil moisture content were built up using spectral reflectance, post-continuum-removal values and spectral adsorption characteristic parameters as independent variables, and moisture as dependent variable. Determination coefficient (R^2) and RMSE were used to evaluate prediction accuracy of the models. The higher the R^2 and the more stable and accurate the model and the lower the RMSE. Results show that (1) the soil spectral curve of Black soil has five spectral absorption valleys located at 510, 615, 1420, 1920 and 2210 nm, separately; and in predicting soil moisture content in black soil, spectral characteristic parameters are higher in correlativity than spectral reflectance, especially at 1420 and 1920 nm; (2) the models based on Simple Linear Regression, Stepwise Multiple Linear Regression (SMLR) and Partial Least Squares Regression (PLSR), separately, are all applicable to prediction of soil moisture content in black soil; and (3) the model based on simple linear regression using the characteristic parameters of the spectral absorption valley at 1920 nm as independent value is high in prediction accuracy and low in input volume, and hence can be used as the theoretical basis for developing instant soil moisture measuring instruments. The models established in this study are high in stability and accuracy, which may

be attributed to their use of just one type of soil and the new soil moisture adjusting method. Therefore, it can be concluded that the soil moisture high-spectrum prediction model based on spectral adsorption characteristic parameters is high in accuracy and stability and can be used for instant prediction of soil water contents.

Key words Spectral reflectance; Soil moisture; Continuum removal; Absorption feature

(责任编辑: 檀满枝)