

基于 HJ 卫星的棉田土壤有机质空间分布格局反演

王 琼¹, 陈 兵¹, 王方永¹, 宋庆平¹, 窦中江^{1*}, 戴建国², 肖春华³, 杨秀春⁴

(1. 新疆农垦科学院, 石河子 832000; 2. 石河子大学信息科学与技术学院, 石河子 832000; 3. 石河子大学/兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832000; 4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要:以北疆绿洲区棉田表层土壤为研究对象,利用国产 HJ-1A/1B 卫星 CCD 多光谱数据对裸土有机质空间分布格局进行研究。通过分析多光谱数据不同波段的光谱反射率及其变换形式与实地采样得到的土壤有机质含量的相关性,探寻适合绿洲区棉田表层土壤有机质含量快速反演的敏感波段及参数,并针对不同参数分别建立一元线性、二次、三次、对数、倒数、幂函数、生长型、S 型回归模型,以及多元回归模型;对生成的模型进行综合对比分析,获取北疆绿洲区棉田表层土壤有机质含量的最佳反演模型,从而实现整个研究区土壤有机质空间格局的遥感反演。结果表明:HJ 卫星多光谱数据 4 个波段的反射率均与土壤有机质含量存在显著的相关性,第 3 波段的倒数与土壤有机质含量相关性最为显著;且以第 3 波段光谱反射率作为因变量得到的三次线性回归模型对土壤有机质含量进行反演的效果最佳;通过空间布局反演得到研究区土壤有机质空间分布整体呈现南北两端有机质含量较高,中部有机质含量较低的格局。该研究表明虽然与黑土有机质含量具有差别,但是遥感技术仍能够作为绿洲区土壤有机质含量空间布局反演的方法,为遥感技术在土壤参数监测中更好的发挥作用提供理论支持,同时也为新疆棉田生产管理和农田可持续利用提供科学依据。

关键词:土壤;卫星;遥感;HJ 卫星;绿洲棉田;土壤有机质;遥感反演

doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.024

中图分类号:S-3 TP79

文献标志码:A

文章编号:1002-6819(2016)-01-0174-07

王 琼, 陈 兵, 王方永, 宋庆平, 窦中江, 戴建国, 肖春华, 杨秀春. 基于 HJ 卫星的棉田土壤有机质空间分布格局反演[J]. 农业工程学报, 2016, 32(01): 174-180. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.024 <http://www.tcsae.org>

Wang Qiong, Chen Bing, Wang Fangyong, Song Qingping, Dou Zhongjiang, Dai Jianguo, Xiao Chunhua, Yang Xiuchun. Inversion for spatial distribution pattern of soil organic matter based on HJ image in oasis cotton field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(01): 174-180. (in Chinese with English abstract) doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.024 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

新疆是中国重要的绿洲农业区,更是中国重要的棉产区。随着节水灌溉技术的推广,土壤养分不均衡导致滴灌棉田早衰的问题日渐凸显。已有研究表明土壤有机质含量是表征土壤养分的重要属性之一^[1],及时获取大范围棉田土壤有机质空间布局有助于快速获取棉田土壤的养分状况,对更好的制定栽培措施,促进棉田稳产高产具有现实意义^[2]。传统对土壤有机质含量的监测多采用普通克里金等空间插值方法,但由于采样点的数量有限,且分布不均等原因,常难以获得较为准确的空间预测结果。近年来众多学者以高光谱遥感为技术手段,对褐土^[3]、红壤土^[4-5]、黑土^[6-8]、潮土^[9]、荒漠土^[10-13]等土壤有机质含量进行了估测,为更大空间尺度上估算土壤有机质含量提供了可靠的理

论基础和研究依据。多光谱遥感技术因其具有数据量大、实时、大范围等特点^[14-15],20 世纪 80 年代就被研究者们用来反演黑土土壤有机质含量的空间格局^[16]。研究证明与传统方法相比,利用多光谱遥感数据进行土壤有机质制图、土壤分析和指导施肥花费的人力物力更少、得到的分析结果更接近实际情况^[17-18]。

目前利用多光谱遥感对土壤有机质进行估测的研究主要集中在对黑土有机质含量进行反演^[19-20],因其有机质含量均大于 2%,土壤有机质含量对光谱的影响更为明显;绿洲农业区土壤有机质含量与黑土和森林土壤有着明显的差异,特别是北疆棉田土壤,有机质含量均值在 2%左右,局部区域远小于 2%,能否用遥感数据对这样的土壤进行有机质空间格局的反演?参考已有对荒漠土壤的研究,并依托北疆绿洲棉田规模化、大面积的特点,本文以 HJ1A/1B 数据为多光谱遥感数据源,获取采样点裸土的光谱反射率及数学变换式得到的结果作为参数,与采样点土壤有机质含量进行分析研究,探寻适合绿洲棉田裸土有机质快速反演的敏感波段及参数并建立模型,从而实现整个研究区棉田土壤表层有机质空间格局的反演;以期为新疆棉田生产管理和农田可持续利用提供科学依据,为遥感技术在今后的土壤参数监测中更好的发挥作用提供理论支持。

收稿日期:2015-10-18 修订日期:2015-11-24

基金项目:新疆农垦科学院引导计划项目(54YYD201302);新疆兵团工业科技计划项目(2014BA019);国家自然科学基金项目(41161068);石河子大学高层次人才科研启动项目(RCZX201325)

作者简介:王琼(1983-),女,四川南充人,副研究员,博士,研究方向为作物信息技术与精准农业。石河子 新疆农垦科学院,832000。

Email:wangqionghope@163.com

※通信作者:窦中江(1970-),副研究员,主要从事信息技术在林学中的应用研究。石河子 新疆农垦科学院,832000。Email:xjwqtg@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆生产建设兵团第七师 130 团垦区(44°2′31″~44°3′4″N,84°7′6″~85°3′8″E)是典型的绿洲农耕地,年均温度为 6.4~7.1℃,≥10℃积温为 3 617~3 599.8℃,无霜期为 159~186 d,日照量 2 611~2 697 h,平均降水量为 160.7~182.1 mm,年蒸发量为 1 761.9~1 709.7 mm。耕地面积 2×10⁴ hm²,2013~2014 年作物种植面积约为 1.2×10⁴ hm²,以平均面积约 15 hm² 的单块条田作为一种作物的种植单元,其中棉花种植面积约占总作物面积的 80%。气候属温带大陆性气候,光热资源丰富、降水量小;全区除局部略有起伏外,地势平坦;土壤类型以灰漠土为主,还有小部分属于草甸土、潮土。

1.2 土样采集与处理

为了更好的反映棉田裸土的光谱信息,将土样采集时间定为 10 月底,此时棉田已秋收完成(图 1)。在棉田内采用五点取样法^[2],取 0~20 cm 耕层土壤样品,同时利用手持 GPS 获取采样点地理位置等信息;并将土样带回实验室进行风干、研磨、过筛等预处理后用重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量,其描述性统计量见表 1。由表 1 可知研究区土壤有机质含量差异性明显,最大值与最小值之间相差 26 g/kg 左右。

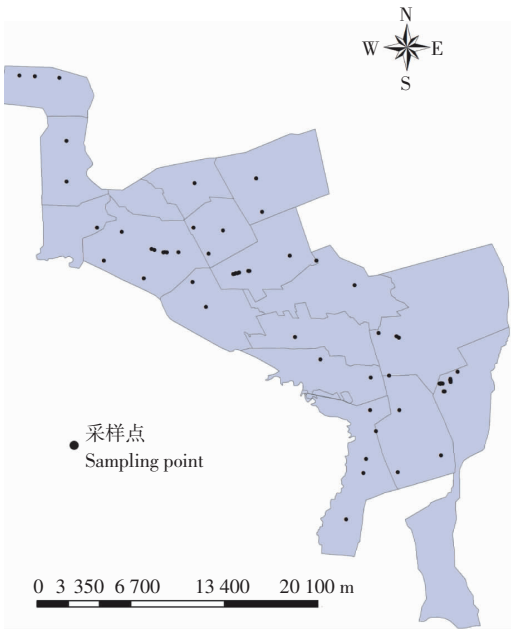


图 1 130 团采样点分布图
Fig.1 Distribution of sample points in 130 Group

表 1 土壤有机质描述性统计表

Table 1 Descriptive statistics table of SOM

项目 Item	样本数 Sample size	极小值 Min	极大值 Max	均值 Mean	标准差 Std	方差 Var
土壤有机质 Soil organic matter/(g·kg ⁻¹)	65	7.5	34.1	20.58	9.63	92.82

1.3 遥感数据获取与处理

环境与灾害监测预报小卫星星座 A、B 星(HJ-1A/1B 星)于 2008 年发射,包括 4 个谱段,空间分辨率为 30 m。

本文以该数据为数据源,分别获取 2013 年、2014 年 10 月底,云量低于 10%的 CCD 数据,影像轨道号为 44/60。使用 ENVI 5.0 软件对遥感影像进行辐射校正得到地物光谱反射率数据,并以 UTM,WGS-84 投影及坐标系统,利用已有的基准影像对数据进行几何校正,用 ENVI 软件中 FLAASH 模块对几何校正后的数据进行大气校正,得到地面采样时间一致的裸土反射率数据。

1.4 模型建立与检验

通过提取采样点的裸土反射率数值(R),对(HJ-1A/1B)CCD 数据各波段反射率进行倒数($1/R$)、对数($\text{LOG}(R)$)、差值(R_1-R_2)、比值(R_1/R_2)等运算得到不同形式的光谱指数,并利用计算得到的指数与采样测定的土壤有机质含量进行数理分析,得到采样点裸土光谱指数和土壤有机质含量之间的相关关系。对与土壤有机质间的相关性显著的光谱反射率及其变换形式进行回归分析,并基于 SPSS 统计分析软件分别构建单波段和多波段回归方程,其中单波段回归方程包括线性回归模型、对数回归模型、倒数回归模型、二次回归模型、三次回归模型、幂函数回归模型、S 型回归模型、生长回归模型和指数回归模型。

将采样点分为建模样本(65 个)和验证样本(26 个),对建立的模型进行检验。采用统计量 F 值、修正自由度的可决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)评价估算模型的有效性^[3]。当 F 值大于理论临界值 F_α 时,估算方程显著; R^2 越大模型越稳定;RMSE 越小模型精度越高^[7]。

1.5 空间分布格局反演

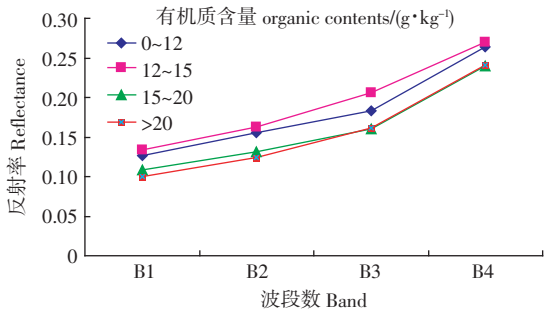
使用 ENVI5.0 软件的波段运算模块,将采样点对应的 CCD 数据光谱参数代入到回归方程,波段运算后得到研究区土壤有机质含量灰度图;根据全国第二次土壤普查推荐的土壤肥力分级和新疆棉田土壤主要养分含量分级指标^[2]将土壤有机质含量范围划分为 4 个等级:在 0~12 g/kg 范围内有机质含量等级为“低”,12~15 g/kg 范围内有机质含量等级为“较低”,15~18 g/kg 范围等级为“中等”,有机质含量>18 g/kg 时等级为“较高”。使用密度分割方法按照 4 个等级的划分范围,对生成的有机质含量灰度图进行分级,得到不同级别有机质含量的空间分布图。

2 结果与分析

2.1 不同多光谱遥感数据土壤反射率特征

在研究区选取有机质含量分别在 1~10、10~20、20~30 g/kg 和有机质含量大于 30 g/kg 范围内具有代表性的土壤样点 4 个,计算遥感影像上对应点在不同波段的反射率值,绘制反射率折线图(图 2)可知,4 个样点在遥感影像不同波段 $B_1(0.45\sim0.52\ \mu\text{m})$ 、 $B_2(0.52\sim0.60\ \mu\text{m})$ 、 $B_3(0.63\sim0.69\ \mu\text{m})$ 、 $B_4(0.76\sim0.90\ \mu\text{m})$ 的反射率值均呈现随着波长的增加,反射率值也随之上升的趋势,说明无论是有机质含量大于 20 g/kg(>2%)的黑土,或者有机质含量均值小于 20 g/kg(<2%)的荒漠土,对光谱的吸收、反射过程都是相近的,即随波长的增加,对光谱的吸收作用逐渐减弱,反射作用逐渐增强。当有机质含量在 20~30 g/kg 之间和大于 30 g/kg 时,不同土壤样点的光谱反射率值相差很小,尤其在 B_3 、 B_4 波段;当有机质含量在 1~10 g/kg 和 10~20 g/kg

时,土壤样点在不同波段的光谱反射率值相差较为明显,其中以 B₃ 波段差异较大。



注: B₁、B₂、B₃、B₄ 分别为 HJ 卫星 CCD 数据第 1、2、3、4 波段。
Note: B₁、B₂、B₃、B₄ represent four bands of HJ-1A/1B CCD image, respectively.

图 2 不同有机质含量范围土壤反射率折线图
Fig.2 Spectrum line chart of soil organic matter sample in different range of contents

研究区受人为活动影响大,无论实地调研还是采集的土壤样本,有机质含量均呈现出较为明显的差异性,为了明确土壤有机质含量与光谱反射率之间是否存在相关关系,对二者及其变换形式进行了相关性检验,表 2 列出了土壤有机质含量与对应点多光谱数据各波段反射率的相关系数。由表 2 可知,不同采样点在 4 个波段的光谱反射率及其变化形式均与有机质含量存在相关性,其中反射率进行倒数变换后与有机质含量相关系数最高,其次为对数变换形式。不同波段反射率做差值和比值变换后与土壤有机质含量虽然也具有相关性,但是相关系数远小于反射率倒数变换的数值。同一变换形式中,不同波段光谱参数与有机质含量的相关性也不同,其中以第 3 波段光谱反射率及其变换形式的相关系数最高,其次为第 2 波段、第 1 波段和第 4 波段。第 3 波段光谱反射率及其对数、倒数的变换形式与对应点土壤有机质含量的相关系数差别不大,以倒数变换形式最高,对数变换次之。

表 2 土壤有机质含量与 CCD 数据各波段反射率相关系数(n=65)
Table 2 Correlation coefficient between SOM and CCD reflectance at different bands

反射率变换形式 Variety form of reflectivity	相关系数 Correlation coefficient	反射率变换形式 Variety form of reflectivity	相关系数 Correlation coefficient
R1	-0.612**	LOG(1/R3)	0.704**
R2	-0.667**	LOG(1/R4)	0.479**
R3	-0.693**	1/(LOG(R1))	0.612**
R4	-0.478**	1/(LOG(R2))	0.667**
1/ R1	0.625**	1/(LOG(R3))	0.691**
1/ R2	0.680**	1/(LOG(R4))	0.477**
1/ R3	0.710**	$\sqrt{R1}$	-0.616**
1/ R4	0.478**	$\sqrt{R2}$	-0.671**
LOG(R1)	-0.620**	$\sqrt{R3}$	-0.699**
LOG(R2)	-0.675**	$\sqrt{R4}$	-0.479**
LOG(R3)	-0.704**	R1/R4	-0.177
LOG(R4)	-0.479**	R3/R4	-0.404*
LOG(1/R1)	0.620**	(R4-R3)/(R4+R3)	-0.414*
LOG(1/R2)	0.675**		

注:** 和 * 分别在 0.01 和 0.05 水平上显著相关;R1~R4 分别为 CCD 数据四个波段 B₁~B₄ 的反射率值。
Note: **and* on 0.01 and 0.05 level is obvious, respectively, and R1~R4 are the reflectance of B₁~B₄.

2.2 表层土壤有机质含量反演模型建立

对土壤有机质含量与多光谱数据各波段反射率相关系数表中相关系数在 0.01 水平显著的反射率(R),及其倒数(1/R)、对数(LOG(R))3 种形式分别进行单波、多波段回归分析。得到单波段回归模型 9 种,包括:线性回归模型、对数回归模型、倒数回归模型、幂函数回归模型、S 型回归模型、生长型回归模型、指数回归模型、一元二次回归模型和一元三次回归模型共 75 个。进行对比分析发现:B₁ 和 B₂ 波段虽然与土壤有机质相关性显著,但是单波段模型在判定系数、均方根误差等比较中均低于 B₃ 波段,该规律在反射率倒数和对数变换中同样成立,从不同波段反射率及其变换形式构建的模型中挑选出 R² 较大、RMSE 较小的模型(表 3)。由表 3 可知,对 HJ 卫星多光谱数据,基于单波段反射率及其变换形式建立的有机质反演模型中,线性模型、对数模型和倒数模型精度和稳定性略低,幂函数模型、S 型模型、增长模型和指数模型精度最低,光谱反射率及其倒数和对数变换得到的二次和三次回归模型精度相对较高、稳定性较好。综合对比不同波段、不同反射率变换形式得到的线性、对数、倒数等模型的精度和稳定性,发现 B₃ 的反射率(R3)作为变量,有机质含量作为因变量得到的三次回归模型 R² 值为 0.625,RMSE 为 6.93,与其他单波段模型相比最优。

表 3 基于单波段光谱指数的农田土壤有机质遥感反演模型
Table 3 Reversing models of Farmland SOM based on single-band spectral indices

模型 Model	变量 Variables	回归方程 Regression equation	判定系数 Coefficient of determination (R ²)	均方根 误差 RMSE	方差 检验量 F 值
线性 Linear	R3	Y=87.209-380.897X	0.581	6.941	30.575
	1/R3	Y=-48.428+11.956X	0.604	6.784	33.565
	LOG(R3)	Y=-98.407-156.717X	0.595	6.846	32.364
对数 Logarithmic	R3	Y=-98.407-68.061ln(X)	0.595	6.846	32.364
	1/R3	Y=-98.407+68.061lnX	0.595	6.846	32.364
	R3	Y=-48.428+11.956/X	0.604	6.657	33.565
倒数 Inverse	1/R3	Y=87.209-380.897/X	0.581	6.941	30.575
	LOG(R3)	Y=135.839+87.231/X	0.578	6.963	30.181
	R3	Y=0.049*(X ^{3.381})	0.527	6.969	24.573
幂 Power	1/R3	Y=0.049*(X ^{3.381})	0.527	6.921	24.573
	R3	Y=e ^(-0.531+0.595X)	0.536	6.93	25.529
	1/R3	Y=e ^(6.206-18.884X)	0.413	6.93	23.208
S S	LOG(R3)	Y=e ^(8.118+4.446X)	0.466	7.239	19.058
	R3	Y=e ^(6.206-18.884X)	0.513	6.93	23.208
	1/R3	Y=e ^(-0.531+0.595X)	0.536	6.969	25.529
生长 Growth	LOG(R3)	Y=e ^(-3.008-7.785X)	0.527	6.921	24.573
	R3	Y=495.881*e ^{18.884X}	0.513	7.115	23.208
	1/R3	Y=0.588e ^{0.595X}	0.536	6.969	25.529
指数 Exponential	LOG(R3)	Y=0.049e ^{-7.785X}	0.527	6.921	24.573
	R3	Y=247.454-2 200.278X+5 133.989X ²	0.623	6.637	17.516
二次 Quadratic	1/R3	Y=8.868-7.99X+1.719X ²	0.609	6.751	16.587
	LOG(R3)	Y=237.835+734.728X+588.969X ²	0.614	6.715	16.935
	R3	Y=196.678-1 313.770X+9 746.337X ³	0.625	6.93	17.714
三次 Cubic	1/R3	Y=8.868-7.99X+1.719X ²	0.609	6.751	16.587
	LOG(R3)	Y=119.321+276.323X-251.371X ³	0.613	6.725	16.844

注:R3 为 CCD 数据第三波段 B₃ 的反射率值。
Note: R3 represents the reflectance of B₃

多波段回归分析后,剔除了相关性较强的 B_1 和 B_2 , 利用 B_3 和 B_4 波段光谱反射率及其倒数、对数等变换形式得到二元一次回归模型。由表 4 可知,基于多波段反射率及其变换形式进行逐步回归分析得到的模型中,光谱反射率倒数变换得到二元一次回归模型精度相对较高、稳定性较好。

表 4 基于度波段光谱指数的农田土壤有机质遥感反演模型
Table 4 Reversing models of Farmland SOM based on multispectral indices

变量 Variables	回归方程 Regression equation	判定系数 Determination(R^2)	均方根误差 RMSE	方差检验量 F 值
$X_1(R3), X_2(R4)$	$Y=89.3941-18.142X_1-367.92X_2$	0.582	7.1500	14.867
$X_1(1/R3), X_2(1/R4)$	$Y=-50.886+1.262X_1+11.486X_2$	0.605	6.9843	16.349
$X_1(\text{LOG}(R3)), X_2(\text{LOG}(R4))$	$Y=-100.815-10.994X_1-151.04X_2$	0.596	7.0501	15.748
$X_1(\text{LOG}(1/R3)), X_2(\text{LOG}(1/R4))$	$Y=-100.815-10.994X_1-151.04X_2$	0.596	7.0501	15.748
$X_1(1/\text{LOG}(R3)), X_2(1/\text{LOG}(R4))$	$Y=137.777+3.212X_1+84.708 4X_2$	0.578	7.1738	14.663
$X_1(\sqrt{R3}), X_2(\sqrt{R4})$	$Y=159.876-18.586X_1-311.424X_2$	0.589	7.0959	15.339

注: $R3$ 、 $R4$ 分别为 CCD 数据第三波段 B_3 和 B_4 的反射率值。
Note: $R3$ and $R4$ represent the reflectance of B_3 and B_4 .

2.3 研究区表层土壤有机质含量空间格局反演
2.3.1 模型精度验证

对比多波段反演模型和单波段反演模型,虽然在模型精度和稳定性上多波段光谱反射率倒数变换得到的二元一次回归模型和单波段三次回归模型都相对较优,但是三次回归模型精度稍高,且需要的光谱参数较简单,故选取单波段三次回归模型对研究区裸土有机质含量进行反演。

由于模型预测精度主要取决于土壤理化参数数值范围和土壤属性间的自相关程度^[23]。对采样点实测值与预测数值进行统计分析发现,研究区表层土壤有机质含量实测值和预测值的均值大致相同,为 19.9 g/kg,极小值分别为 7.5 g/kg 和 11.2 g/kg、极大值分别 34.1 g/kg 和 38 g/kg,预测值均略高于实测值。变异系数分别为 47.2 和 37.6,二者的变异系数存在一定的差异。为了能够更好的揭示棉田表层土壤光谱反射率与有机质含量之间的关系,通过野外实测样点数据对理论得到的模型进行验证。得到土壤有机质实测值与模型预测值间的线性函数 $Y=1.028 1X$ 表达(图 3),该线性方程斜率为 1.0281($R^2=0.72, P<0.001$),散点图较为集中,该结果表明模型预测结果与土壤有机质含量实测结果具有较好的线性相关性,通过遥感估测数值能够反演研究区表层土壤有机质的空间分布格局。

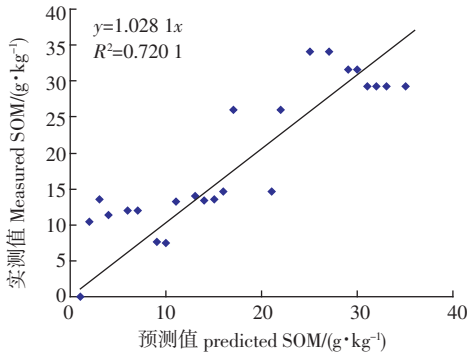


图 3 反演精度验证

Fig.3 Validated result for model precision

2.3.2 空间格局反演

将采样点对应多光谱数据的光谱参数 $R3$ 代入到三次回归方程 $Y=196.678-1 313.770X+9 746.337X^3$ 中,波段

运算后得到研究区土壤有机质含量空间分布图(图 4)。由图可知:研究区土壤有机质空间分布整体呈现南北两端有机质含量较高,中部有机质含量较低的格局。有机质含量在 12~15 g/kg 和 18~36 g/kg 范围的斑块所占面积较大,分别为 $0.42\times10^4 \text{ hm}^2$ 和 $0.30\times10^4 \text{ hm}^2$, 占研究区棉田总面积的 40%和 29%;15~18 g/kg 范围面积为 $0.20\times10^4 \text{ hm}^2$, 占研究区棉田总面积的 20%;有机质含量在 0~12 g/kg 的部分最少只有 $0.11\times10^4 \text{ hm}^2$, 占研究区棉田总面积的 11%。

通过实地调查发现,土壤有机质含量较高的区域,多分布在老河道和河流附近,土壤类型多为壤土或潮土;种植的作物以棉花为主。含量在 12~18 g/kg 之间的土壤,在地形、分布和作物种植上均没有明显的规律。

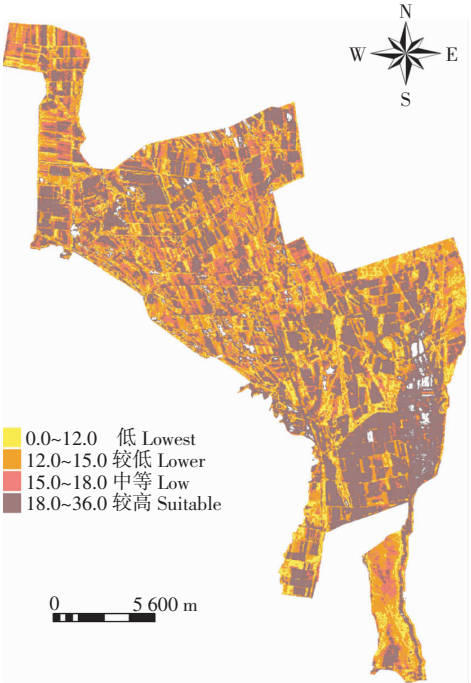


图 4 研究区表层土壤有机质含量空间格局图

Fig.4 Distribution of result for surface SOM in study area

3 讨论

已有利用遥感数据对表层土壤有机质的研究,大多集中在有机质含量大于 2%的黑土区或者森林土壤,而对

有机质含量平均值小于 2% 的土壤,特别是西北荒漠土壤的研究相对较少。本文利用国产 HJ 卫星多光谱数据对新疆绿洲棉田表层裸土有机质含量进行了研究,发现 HJ 卫星多光谱数据 4 个波段反射率均与土壤有机质含量存在显著的相关性,最大相关系数在第 3 波段(630~690 nm),其次为第 2 波段(520~600 nm)。该结论与侯艳军^[13]、Gunsaulis^[24]等的研究保持一致,侯艳军以准格尔盆地东部荒漠过渡带 0~20 cm 土壤为研究对象,认为土壤有机质响应波段集中在可见光和近红外范围内,只是光谱敏感区的具体位置与黑土等其他土壤不同,在 640~790 nm 土壤光谱反射率与土壤有机质含量相关性最为显著。对 4 个波段不同的反射率变换形式进行相关性分析,得到第 3 波段的倒数与土壤有机质含量相关系数最大,该结论与李春蕾^[25]的研究结论具有相同之处,但是李春蕾认为土壤有机质含量与土壤光谱数据的倒数在 430 nm 处达到最大相关,与本文研究不同。经分析不排除数据源和研究尺度的关系,具体原因将在进一步研究中进行论证。

在研究相关性的基础上,以土壤有机质含量为因变量,多光谱数据不同波段反射率数据及其变换形式作为变量分别进行一元和多元回归分析得到 87 个模型。通过对比分析,发现一元回归分析模型中,二次和三次线性回归模型的精度较其他模型高,该结论与李春蕾研究结论相似,但由于其使用的是低空间分辨率的 MODIS 数据,本文使用 30 m 分辨率的国产数据更适合进行农场尺度土壤有机质含量的空间格局反演。

利用三次线性回归模型对研究区棉田土壤进行有机质空间格局反演时,部分非棉田区域没能在自动提取过程中提取出来,导致分级图中有机质含量较高的面积稍大。同时由于利用遥感影像估测土壤有机质含量对研究区具有一定的要求,例如水分变化较小等^[26],且对土壤有机质含量的影响因素如土壤类型、地形、地质等因素也会对反演结果造成影响,因此研究反演精度在 72% 左右,与侯艳军等的研究相比精度稍低,在后续的研究中将会综合考虑土壤有机质含量的影响因素,以达到提高反演精度的目的。反演结果可以用于表层土壤有机质空间布局分析、耕地质量评价、土壤有机碳库估算等,为干旱半干旱区土地可持续利用提供技术与数据支持。

4 结 论

本研究基于国产卫星 HJ-1A/B 的 CCD 多光谱数据,建立了北疆绿洲区农场尺度棉田表层土壤有机质含量的遥感预测模型,对绿洲区棉田土壤有机质含量的空间布局进行反演,结论如下:

1) 北疆表层土壤有机质含量与黑土有机质含量差异明显,但是棉田土壤有机质含量的空间布局仍能够采用遥感技术进行快速监测,部分样点土壤有机质含量低于 2%,对整体监测结果影响不大。

2) HJ 卫星多光谱影像 4 个波段反射率均与土壤有机质含量存在显著的相关性,最大相关系数在第 3 波段,其次为第 2 波段。对比不同的反射率变换形式,第 3 波段反射率及其变换形式相关系数均较高,且不同变换形式间

差别较小。

3) 以 HJ-1A/1B 卫星多光谱数据第 3 波段反射率(R_3)作为变量,棉田土壤有机质含量作为因变量进行回归分析得到的一元三次回归模型 $Y=196.678-1\ 313.770X+9\ 746.337X^3$ 在综合对比分析中,精度和稳定性都相对较高,可以用于该区土壤有机质遥感反演。

致谢:感谢中国资源卫星应用中心提供 HJ 卫星数据。

[参 考 文 献]

- [1] 陆访仪,赵永存,黄标,等. 海伦市耕层土壤有机质含量空间预测方法研究[J]. 土壤通报,2012,43(3):662-667.
Lu Fangyi, Zhao Yongcun, Huang Biao, et al. Comparison of predicting methods for mapping the spatial distribution of topsoil organic matter content in cropland of Hailun[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 3(3): 662-667. (in Chinese with English abstract)
- [2] 彭陶,吕新. 绿洲棉田土壤有机质的时空变异性研究[J]. 土壤通报,2010,41(3):563-567.
Peng Tao, Lv Xin. Study on spatio-temporal variation of soil organic matter in oasis cotton field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41 (3): 563 -567. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘伟,常庆瑞,郭曼,等. 土壤导数光谱小波去噪与有机质吸收波段特征提取[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(1):100-104.
Liu Wei, Chang Qinrui, Guo Man, et al. Extraction of first derivative spectrum features of soil organic matter via wavelet de-noising[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(1): 100-104. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(3):762-766.
Liu Lei, Shen Ruiping, Ding Guoxiang. Studies on the estimation of soil organic matter content based on hyper-spectrum [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(3): 762-766. (in Chinese with English abstract)
- [5] 沈润平,丁国香,魏国栓,等. 基于人工网络的土壤有机质含量高光谱反演[J]. 土壤学报,2009,46(3):391-397.
Shen Ruiping, Ding Guoxiang, Wei Guoshuan, et al. Retrieval of soil organic matter content from hyper-spectrum based on ANN [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(3): 391-397. (in Chinese with English abstract)
- [6] 卢艳丽,白由路,杨俐苹,等. 基于主成分回归分析的土壤有机质高光谱预测与模型验证[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(6):1076-1082.
Lu Yanli, Bai Youlu, Yang Liping, et al. Application of hyper-spectral data for soil organic matter estimation based on principle components analysis[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(6): 1076-1082. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘焕军,赵春江,王纪华,等. 黑土典型区土壤有机质遥感反演[J]. 农业工程学报,2011,27(8):211-215.

- Liu Huanjun, Zhao Chunjiang, Wang Jihua, et al. Soil organic matter predicting with remote sensing image in typical black soil area of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(8):211–215. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘焕军,张柏,赵军,等. 黑土有机质含量高光谱模型研究[J]. 土壤学报,2007,44(1):27–32.
- Liu Huanjun, Zhang Bai, Zhao Jun, et al. Spectral models for prediction of organic matter in black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 27–32.(in Chinese with English abstract)
- [9] 廖钦洪,顾晓鹤,李存军,等. 基于连续小波的潮土有机质含量高光谱估算[J]. 农业工程学报,2012,28(23):132–139.
- Liao Qin hong, Gu Xiaohe, Li Cunjun, et al. Estimation of fluvo-aquic soil organic matter content from hyper-spectral reflectance based on continuous wavelet transformation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28 (23): 132–139.(in Chinese with English abstract)
- [10] 徐彬彬,戴昌达. 南疆土壤光谱反射特性与有机质的相关分析[J]. 科学通报,1980,25(6):282–284.
- XU Binbin, DAI Changda. Correlation analysis of organic matter content and spectral reflection properties of the soil in South Xinjiang[J]. Chinese Science Bulletin, 1980, 25(6): 282–284.(in Chinese with English abstract)
- [11] 彭杰,张杨珠,庞新安,等. 有机质含量的高光谱特征分析[J]. 干旱区地理,2010,33(5):740–746.
- Peng Jie, Zhang Yangzhu, Pang Xin'an, et al. Hyper-spectral features of soil organic matter content in South Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(5): 740–746.(in Chinese with English abstract)
- [12] 高志海,白黎娜,王琰瑜,等. 荒漠化土地土壤有机质含量的实测光谱估算[J]. 林业科学,2011,47(6):9–16.
- Gao Zhihai, Bai Li'na, Wang Bengyu, et al. Estimation of soil organic matter content in desertified lands using measured soil spectral data[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(6): 9–16.(in Chinese with English abstract)
- [13] 侯艳军,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等. 荒漠土壤有机质含量高光谱估算模型[J]. 农业工程学报,2014,30(16):113–120.
- Hou Yanjun, Tashpolat·Tiyip, Mamat·Sawut, et al. Estimation model of desert soil organic matter content using hyperspectral data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(16): 113–120.(in Chinese with English abstract)
- [14] 梅安新,彭望碌,秦其明,等. 遥感导论[M]. 北京:高等教育出版社,2001:1–21.
- [15] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2003,280–326.
- [16] Bowers S A, Hanks R J. Reflectance of radiant energy from soils. Soil Science, 1965, 100(2): 130–138.
- [17] 程彬,姜琦刚,王坤. 遥感在土壤有机质含量估算中的应用及其研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2011,42(2):317–321.
- Cheng Bin, Jiang Qigang, Wang Kun. Application and progress in estimating soil organic matter content based on Remote Sensing[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural science edition), 2011, 42(2): 317–321. (in Chinese with English abstract)
- [18] Obade V D, Lal R. Assessing land cover and soil quality by remote sensing and geographical information systems(GIS)[J]. Catena, 2013, 104: 77–92.
- [19] 程彬,姜琦刚. 遥感影像在土壤属性估算中的应用[J]. 中国农学通报,2008,24(1):467–470.
- Cheng Bin, Jiang Qigang. Estimation of soil properties using remotely sensed imagery[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(1): 467–470.(in Chinese with English abstract)
- [20] 张法升,曲威,尹光华,等. 基于多光谱遥感影像的表层土壤有机质空间格局反演[J].应用生态学报,2010,21(4):883–888.
- Zhang Fasheng, Qu Wei, Yin Guanghua, et al. Spatial pattern of surface soil organic matter based on remotely sensed multi-spectral imagery[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 883–888. (in Chinese with English abstract)
- [21] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社:1987,62–136.
- [22] 张炎,王讲利,付明鑫,等. 新疆棉田土壤养分评价指标的建立[A]. 中国科协,2005年学术年会“新疆现代农业论坛”论文集专集[C],2005.
- Zhang Yan, Wang Jiangli, Fu Mingxin, et al. The establishment of the xinjiang cotton soil nutrient evaluation index[A]. China association for science and technology. 2005 Academic Convention "BBS" Modern Agriculture inXinjiang Thesis Album [C], 2005. (in Chinese with English abstract)
- [23] Volkan Bilgili A, van Es H M, Akbas F, et al. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of Turkey[J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74(2): 229–238.
- [24] Gunsaulis E R, Kocher M F, Griffis C L. Surface structure effects on close-range reflectance a function of soil organicmatter content[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(2): 641–649.
- [25] 李春蕾. 新疆北疆裸土土壤有机质与机械组成遥感反演研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2011.
- Li Chunlei. The Research of Retrieving Exposed Soil Organic Matter and Soil Mechanical Composition by Remote Sensing in North Xinjiang Province, China[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2011.(in Chinese with English abstract)
- [26] 程彬,姜琦刚,陈凤臻,等. 松辽平原黑土有机质含量的遥感反演研究[J]. 水土保持研究,2011,18(1):264–267,275.
- Cheng Bin, Jiang Qigang, Chen Fengzhen, et al. Study of surface soil organic matter using remotely sensed imagery in northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(1): 264–267, 275.(in Chinese with English abstract)

Inversion for spatial distribution pattern of soil organic matter based on HJ image in oasis cotton field

Wang Qiong¹, Chen Bing¹, Wang Fangyong¹, Song Qingping¹, Dou Zhongjiang^{1*}, Dai Jianguo², Xiao Chunhua³,
Yang Xiuchun⁴

(1. *Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China*; 2. *College of Information Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832000, China*; 3. *Key Oasis Eco-Agriculture of Xinjiang Production and Construction Corps/Shihezi University, Shihezi 832003, China*; 4. *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: Quick and real-time monitoring of soil organic matter(SOM) distribution based on remote sensing can support the decision-making on precision crop management. However, most previous studies have been aimed at black soil, SOM content of which is commonly higher than 2%. The research about grey desert soil (average content of SOM is less than 2%) has been reported less. This paper tries to quantitatively retrieve SOM of grey soil by using HJ-1A/1B satellite remote sensing images. Ninety-one soil samples are collected from the oasis cotton field in northern Xinjiang, China during 2013–2014. The SOM content of these samples was determined, and the multi-spectral reflectances were measured. The spectrum characteristics of 65 soil samples were analyzed, the correlation analysis was conducted, and the characteristic bands for estimating retrieval model were sought; then, the stepwise regression analysis method was used to build the inversed models. And the models include one-variable linear regressive equation, quadratic regression model, cubic regression model, log-linear regression model, inverse regression model, power function model, growth regression model, S regression model and multiple regression model for different spectrum parameters. By means of comprehensive and comparative analysis of various models, the final monitoring model of SOM was then established. Taking into account the spatial difference between the samples and remote sensing images, 26 soil samples were used to test the model. And there was a good linear relationship between the estimated and the measured SOM values(determination coefficient 0.72). At last, based on the final monitoring mode, the distribution of the SOM was mapped. Results showed that: 1) The reflectance of each band had significant correlation with SOM content, and the reciprocal of reflectance at Band 3 had the most significant correlation with SOM content; 2) The cubic regression model was based on the reflectance at Band 3, and compared with other models, it was the optimal one and could be used to retrieve the spatial distribution pattern of SOM in oasis cotton field; 3) Spatial distribution pattern of SOM indicated that the SOM content was higher in the north and south of study area, and lower in the middle. All of the present work implies that although the SOM content of grey desert soil is very different from black soil, the multi-spectral data, such as HJ-1A/1B satellite data, can be effectively used in SOM remote sensing monitoring. This conclusion can not only provide a scientific basis for cotton management and sustainable utilization of farmland in Xinjiang, but also offer the theory support for monitoring soil parameter by using remote sensing technology.

Keywords: soils; satellites; remote sensing; HJ satellite; oasis cotton fields; soil organic matter; remote sensing inversion