

基于多光谱遥感图像的青海湖流域土壤有机质估算初探^①

王 琪^{1,2,3}, 吴成永^{1,2,3}, 陈克龙^{2,3*}, 巴丁求英¹, 赵爽凯^{1,2,3}, 魏亚兰^{1,2,3},
刘 娟^{1,2,3}, 苏小艺^{1,2,3}, 张 肖⁴

(1 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810008; 2 青藏高原环境与生态教育部重点实验室, 西宁 810008;

3 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008; 4 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610101)

摘 要: 土壤有机质是土壤固相部分的重要组成成分,也是陆地表层重要的碳库,其含量的快速、准确测定关乎农牧业生产活动安排与地表过程研究中关键参数的获取效率。为了探寻适合青藏高原高寒地区土壤有机质遥感反演的响应波段及遥感模型,实现区域像元尺度上的土壤表层有机质估算,本文利用 Landsat8-OLI 多光谱遥感数据与实地采样数据对青海湖流域表层(0~20 cm)土壤进行了有机质含量反演研究。结果表明:Landsat8-OLI 影像的第 5、6 和 7 波段是青海湖流域土壤有机质含量的特征波段,基于这 3 个波段构建的土壤有机质遥感反演三元回归模型($R^2=0.704$, $P<0.001$),经实测点验证(RMSE=8.66)与相关文献研究结果验证(RMSE=8.85),精度高、稳定性强、预测趋势平稳。本研究不仅为高寒地区土壤有机质含量快速测定提供了一定的技术支持,也为高寒地区的碳库计算、土壤肥力评价、土壤碳循环、农作物估产、草地退化监测等提供了参考。

关键词: 青海湖流域;土壤有机质;遥感模型

中图分类号: S158.2; TP79 文献标识码: A

土壤有机质(soil organic matter, SOM)是存在于土壤中动植物的残体、微生物体及其分解和合成物质,是土壤固相部分的重要组成成分,也是陆地表层重要的碳库,其含量不仅是土壤肥力的重要评判标准,也是土壤退化状态的重要指标^[1-3]。目前,有机质含量测定方法,主要有三大类。传统的测定有机质的方法主要有容量分析法、重铬酸钾比色法、重铬酸钾氧化外加加热法等^[4]。这些基于化学分析的测定方法,具有操作方便、价格便宜等不可比拟的优势^[5],虽然精度较高,但实验过程相对繁杂、费力多、周期长^[6-7]。近年来,GIS 技术和地统计学相继用于土壤有机质研究中,借助空间插值比如克里格插值、反距离插值法等,实现了中大尺度范围内的推演。但空间插值方法由于采样点的数量有限且分布不均等原因,难以获得较为准确的空间预测结果^[8-9]。如张枝枝等^[10]结合 GIS 技术分析了渭河两岸缓冲带的土壤有机质含量的分布特征及其影响因子,柳富坤等^[11]基于 GIS 技术对武功山山地草甸土壤有机质的分布特征以及空间异质性进行了研究分析;吴才武等^[12]基于

地统计与遥感反演相结合的方法得到了吉林省黑土区土壤有机质空间分布。20 世纪 70 年代以来,遥感技术作为采集地球信息及其变化的一种新型手段,因其具有宏观性、动态性、经济性被广泛运用于土壤有机质估算等方面的研究中。其原理是不同类型的土壤具有不同的反射曲线,通过遥感模型,借助尺度推绎方法^[13],实现像元尺度上的土壤有机质空间格局模拟^[14]。遥感模型估算土壤有机质的首要前提和基础是确定有机质的遥感受应波段,即土壤有机质含量的遥感信息特征波段。由于土壤是高度不均一的历史自然综合体,不同土壤类型其有机质含量本身的高低,以及同一种类土壤其成土母质、土壤水分含量、植被状况等的差异,综合地影响土壤有机质的遥感受应,导致了遥感受应波段的差异。Krishnan 等^[15]发现土壤光谱在近红波段与有机质含量的相关性弱,可见光波段与有机质含量有较强的相关性;Gunsaulis 等^[16]研究表明,土壤有机质含量与红光波段具有较强的相关性;刘焕军等^[17]认为 620~810 nm 波段范围是黑土有机质的主要响应波段,土壤有机质响应波段集中

基金项目: 国家自然科学基金项目(41661023)和国家社会科学基金项目(14XMZ072)资助。

* 通讯作者(ckl7813@163.com)

作者简介: 王琪(1992—),男,甘肃平凉人,硕士研究生,主要从事生物地理与自然保护方面研究。E-mail:1186599488@qq.com

在可见光和近红外范围内；卢艳丽等^[18]认为在 480 ~ 740 nm 波段，黑土的有机质含量与光谱呈极显著负相关，而在 816 ~ 1 415 nm 波段范围内，其有机质含量与光谱呈极显著正相关；刘炜等^[19]认为 530 ~ 580 nm 波段范围是褐土有机质的主要响应波段；刘磊等^[20]认为红壤土有机质的响应波段在 400 ~ 1 000 nm，而沈润平等^[21]则认为红壤土有机质响应波段在 540 ~ 1 000 nm，即可见光与近红外区域。

我国草地面积广阔，约占全国陆地总面积的 41%，青藏高原广泛分布着高寒草甸、高寒草原和温性草原等草地生态系统类型^[22-23]，其面积约为 $1.28 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，其草地土壤有机碳量达到 $C 33.5 \times 10^9 \text{ t}$ ，占全国土壤有机碳量的 23.44%，占全球土壤碳库的 2.4%^[24]。青海湖流域是青藏高原东北部重要的牧区，流域内有国家级自然保护区，生态环境极其脆弱。在人类不合理活动和全球气候变化的双重影响下，草地退化严重，裸土、黑土滩随处可见，土壤肥力下降。因此，快速测定大尺度的土壤有机质成为青海湖流域亟需解决的科学与现实问题。

基于以上分析，本文以 Landsat8-OLI 多光谱遥感数据和野外实测有机质数据，以青海湖流域为实验

区，利用 RS、GIS 技术和多元回归方法，探寻适合青藏高原有机质反演的响应波段及参数并建立模型，从而实现区域像元尺度的土壤表层有机质遥感估算，以为青藏高原草地生态系统的草地持续利用与生态修复提供一定的科学依据，为地方层面制定草地管理策略，为国家层面制定与实施生态补偿政策提供现实指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

青海湖流域地处青藏高原东北部，流域总面积为 29 661 km^2 ，地理位置 $36^\circ 15' \sim 38^\circ 20' \text{ N}$ ， $97^\circ 50' \sim 101^\circ 20' \text{ E}$ ，地形复杂，地势起伏大(图 1)。该区属典型的高寒干旱大陆性气候，以干旱、寒冷、多风为主要特征，多年平均气温 $-1.4 \sim 1.7^\circ \text{C}$ ，平均年降水量为 340 mm，蒸发量 800 ~ 1 000 mm ^[25]。主要植被类型为高寒草甸、高寒草原、高寒流石坡稀疏植被、沙生植被、盐生草甸、寒漠草原和沼泽草甸等。土壤主要有沼泽土、草毡土、栗钙土、寒钙土、黑毡土等。其中，草毡土、薄黑毡土和栗钙土分别占整个流域面积的 31.1%、15.1%、11.6%。

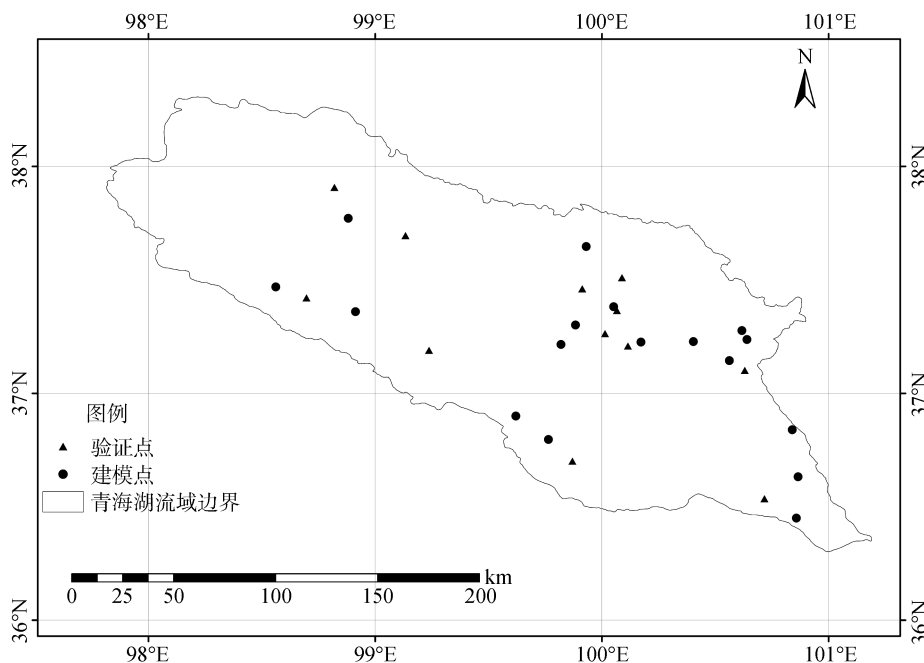


图 1 青海湖流域位置及采样点分布区图

Fig. 1 Location of Qinghai Lake basin and sampling sites

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源与处理 土样采集采用网格采样法，将研究区划分为 10 $\text{km} \times 10 \text{ km}$ 的网格。2016 年 9 月 27 至 10 月 4 日，通过手持 GPS 定位网格上的预

采样点，然后用环刀法采样。在土壤剖面每个土壤层中部平稳打入环刀，待环刀全部进入土壤后，挖去环刀周围的土壤，取出环刀，小心脱出环刀上端的环刀托，然后用削土刀削平环刀两端的土壤，用米尺量取

0~10、10~20、20~30 cm 土层土壤，分别取样装入样品袋中。将样品带回实验室后，称取每个采样点 0~10、10~20 cm 土层的土样各 50 g，混匀后装入新样品袋，土壤自然风干后，然后取少量土壤样品，进行除杂，研磨，过 100 目筛。土壤有机质含量用重铬酸钾氧化外加加热法测定。本文共得到 41 个采样点数据，剔除实验失败数据与异常数据，共得到 29 个采样点有效数据(图 1)。

1.2.2 遥感数据获取 考虑影像时间应与采样时间相近，以提高估算的准确性，本研究从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)获取了 Landsat8-OLI 多光谱卫星遥感数据(表 1)，即 2016 年 9 月 28 日 1 景、10 月 8 日 1 景和 10 月 17 日 2 景，共 4 景影像。在

ENVI5.1 软件中，将影像进行辐射定标、大气校正和影像拼接等预处理。用定标工具(radiometric calibration)将图像的灰度值转换成辐射亮度值，完成辐射定标；利用 FLAASH 进行大气校正，校正过程中主要参数设置：大气模型设置为 Mid-Latitude Winter，气溶胶设置为 Rural，气溶胶反演模型为 2-Band(K-T)，能见度设置为默认值(40)，输入图像采集时间、研究区平均海拔为 3.6 km 等；用 Mosaicking 下的 Seamless Mosaic 工具进行影像拼接^[26]。为了去除微地形、影像处理与扫描过程中的噪声，利用 3×3 模板的均值滤波处理影像。同时，为了计算方便，将上述处理后的各波段除以 1 000，然后用于相关计算与模型建立。

表 1 Landsat8 各波段简介^[27]
Table 1 Profile of Landsat8 wavebands

波段名称	波段宽度(nm)	数据用途	分辨率(m)	辐射率(W/(m ² ·sr·μm))
波段 1(海岸波段)	433~453	海岸区气溶胶	30	40
波段 2(蓝波段)	450~515	基色/散射/海岸	30	40
波段 3(绿波段)	525~600	基色/海岸	30	30
波段 4(红波段)	630~680	基色/海岸	30	22
波段 5(近红外波段)	845~885	植物/海岸	30	14
波段 6(短波红外 1)	1 560~1 660	植物	30	4.0
波段 7(短波红外 2)	2 100~2 300	矿物/干草/无散射	30	1.7
波段 8(全色波段)	500~680	图像锐化	15	23
波段 9(卷云波段)	1 360~1 390	卷云测定	30	6.0
波段 10(热红外 1)	10 300~11 300	地表温度	100	
波段 11(热红外 2)	11 500~12 500	地表温度	100	

1.2.3 模型构建与检验 本文将采样点分为建模样本和验证样本 2 部分，分别为 17 和 12 个采样点数据。运用回归分析法构建有机质遥感反演模型。模型的稳定性用 R^2 检验， R^2 越大，模型越稳定；模型的精度用均方根误差 RMSE(式 1)检验，RMSE 越小，模型精度越高、预测能力越强；预测模型估计趋势用平均误差 ME(式 2)验证，平均误差 ME<0 表明估计趋势偏高，反之 ME>0 则估计趋势偏低^[28]。计算公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_a - x_p)^2} \tag{1}$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_a - x_p) \tag{2}$$

式中： x_a 和 x_p 分别为表层土壤有机质含量的实测值与预测值； n 为土壤样本数。

2 结果与分析

2.1 土壤有机质遥感信息特征波段筛选

对实测土壤有机质含量和处理后 Landsat8-OLI 各波段影像值进行相关性分析(表 2)，结果表明，土壤有机质含量与波段 1、波段 2、波段 3 和波段 4 的相关性不高，与波段 5、波段 6 和波段 7 的相关性较高，相关系数分别为 0.736、0.752 和 0.584。因此，LandSat-8 OLI 的 5、6 和 7 波段含有土壤有机质遥感信息，是青海湖流域土壤有机质含量遥感反演的信息特征波段。

2.2 土壤有机质遥感反演模型构建

将 Landsat8-OLI 的波段 5、波段 6 和波段 7 这 3 个波段影像值进行倒数变换后，利用 SPSS20.0 软件中的回归分析模块构建实测土壤有机质含量与敏感波段的模型(表 3)。通过综合比较 7 个回归模型的预

表 2 实测有机质和 Landsat8-OLI 各波段影像值的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between measured SOM and Landsat8-OLI image values of different wavebands

变量	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4	波段 5	波段 6	波段 7
r	0.036	0.120	0.228	0.373	0.736*	0.752*	0.584*
P	0.844	0.505	0.202	0.032	0.000	0.000	0.000

注：*表示在 $P<0.05$ 水平显著相关(双侧)。

测结果及其验证指标,双波段与多波段模型的决定系数($R^2=0.704$)最大,表明模型较好。但双波段模型预测结果不如多波段($ME=0.51$, $RMSE=8.66$)模拟精度高,表明多波段模型比其他双波段和单波段模型更能准确地反演土壤有机质含量,其模型为: $y=205.772+1053.367x_3-3175.759x_2-101.319x_1$ ($R^2=0.704$, $P<0.001$)。据此,可得到研究区有机质含量反演的空间分布格局图(图 2)。

表 3 基于 Landsat8-OLI 特征波段的青海湖流域表层土壤有机质遥感反演模型
Table 3 Remote sensing inversion model for topsoil organic matter content in Qinghai Lake basin based on Landsat8-OLI characteristic bands

模型	变量	模型	R^2	ME	RMSE
单波段模型	x_1	$y=275.432-2716.69x_1$	0.530	-2.51	10.07
	x_2	$y=204.542-1998.075x_2$	0.673	3.93	11.57
	x_3	$y=183.646-1419.853x_3$	0.520	8.65	17.82
双波段模型	x_1x_2	$y=219.873-390.014x_1-1781.343x_2$	0.676	2.91	10.57
	x_1x_3	$y=253.69-1583.894x_1-779.264x_3$	0.594	2.49	10.62
	x_2x_3	$y=201.735+1073.965x_3-3256.193x_2$	0.704	0.71	8.73
多波段模型	$x_1x_2x_3$	$y=205.772+1053.367x_3-3175.759x_2-101.319x_1$	0.704	0.51	8.66

注：表中 y 为土壤有机质含量； x_1 、 x_2 和 x_3 分别为波段 5、波段 6 和波段 7 影像值的倒数。

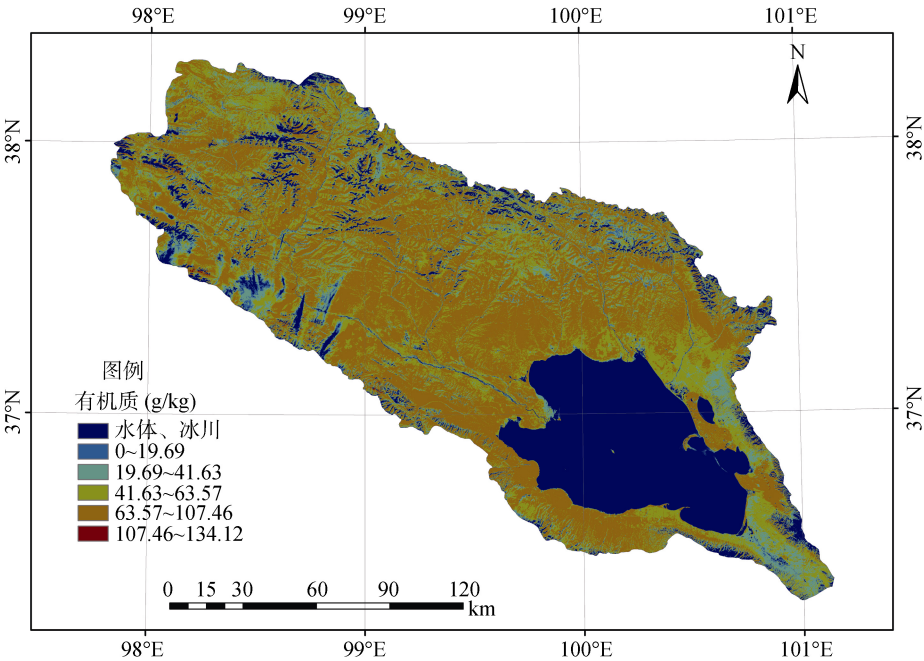


图 2 青海湖流域土壤有机质含量空间分布格局图
Fig. 2 Spatial distribution of soil organic matter content at Qinghai Lake basin

2.3 土壤有机质遥感反演模型评价

2.3.1 基于实测值的评价 本研究将 12 个验证点的有机质含量实测值与多波段模型模拟值进行比对,评价反演模型的准确性与稳定性(表 4)。通过计算得出,本研

究绝对误差 ME 为 0.51,为正数,表明模拟结果有稍低的预测趋势,由于 ME 较小,不超过 1,对于区域尺度的土壤有机质估算,其误差完全可以接受。另外,本研究的均方根误差 RMSE 为 8.66,与文献[29](RMSE=5.70)

和文献[30](RMSE=6.93)的研究结果接近,表明本研究构建的模型能够较好地预测流域内土壤有机质含量。

2.3.2 基于文献结果的评价 为了验证土壤类别间的模拟误差,本研究结合土壤类型图,经空间统计

分析,得到相应各土壤类型多波段模型模拟值的均值,然后与其他文献中各土壤类型的有机质含量平均值进行比较,得出两者间的 RMSE 为 8.85,进一步表明模型具有很好的模拟精度(表 5)。

表 4 基于实测值的模型评价
Table 4 Model evaluation based on actual measured values

样点编号	地理位置		土壤类型	有机质含量(g/kg)	
	纬度	经度		实测值	模拟值
1	37° 6'5.76"N	100°37'48.36"E	石灰性黑钙土	53.1	39.61
2	37°12'30.24"N	100°6'52.56"E	暗栗钙土	56.9	69.52
3	37°21'52.2"N	100°3'59.04"E	暗栗钙土	87.23	83.75
4	37°30'33.84"N	100°5'19.32"E	暗栗钙土	72.06	79.69
5	37°15'47.88"N	100°0'50.04"E	暗栗钙土	73.96	62.81
6	37°27'37.08"N	99°54'48.24"E	暗栗钙土	68.27	78.02
7	37°25'14.16"N	98°41'48.12"E	薄黑毡土	68.29	62.85
8	37°41'42.72"N	99°8'1.32"E	草毡土	64.48	65.69
9	37°54'26.64"N	98°49'47.64"E	湿草毡土	49.31	58.69
10	37°11'23.28"N	99°14'15.72"E	栗钙土	56.9	60.2
11	36°42'3.6"N	99°52'12.36"E	栗钙土	75.86	68.97
12	36°32'8.88"N	100°43'0.12"E	沼泽土	45.51	35.96
验证系数 RMSE				8.66	

表 5 基于文献资料结果的模型评价
Table 5 Model evaluation based on data of published literatures

土壤类型	模型值(g/kg)	文献值(g/kg)
草毡土	51.79	59.8 ^[31]
钙质石质土	16.36	28.4 ^[34]
湿草毡土	57.31	63.7 ^[34]
薄草毡土	49.42	72.3 ^[34]
黑钙土	65.72	57.45 ^[34]
石质土	8.69	13.9 ^[34]
暗栗钙土	65.49	60.53 ^[32]
栗钙土	59.94	65 ^[34]
沼泽土	47.84	52.39 ^[33]
验证系数 RMSE		8.85

2.4 各类土壤有机质含量特征分析

统计分析表明,青海湖流域有机质含量 63.57 ~ 85.52 g/kg 土壤所占的比例最大,占整个青海湖流域总面积的 36.7%,为 10 897.89 km²;其次有机质含量 41.63 ~ 63.57 g/kg 土壤所占的面积为 7 734 km²,而有机质含量 0 ~ 19.69 g/kg 土壤所占比例最小,占整个研究区面积的 3.2%,为 942.12 km²。主要土壤类型的平均有机质含量以黑钙土最高,为 65.72 g/kg;暗栗钙土次之,为 65.49 g/kg;石质土最低,为 8.69 g/kg。

青海湖流域土壤有机质含量有随海拔上升而变

大的趋势,这与李欣宇等^[35]的研究结果一致。一般气温低于 0℃,有机质的分解速率小,不利于胡敏酸的形成。Jenkinson 和 Rayner^[36]研究表明,年平均气温下降 1℃,土壤有机质含量增加 2 倍 ~ 3 倍,可能是土壤温度随海拔上升而下降,气候干旱寒冷,土壤微生物活动微弱,导致土壤表层有机质含量变高。这种现象在青海湖流域分布很明显,如图 3 中的区域 A、B 和 C。土壤有机质含量与土壤含水量的关系,特别是在河谷地区,离河流越远,有机质含量呈现变大趋势。这与已有研究不符,如董智君和赵英^[37]及张帅普和邵明安^[38]研究表明,土壤水分与有机质含量呈正相关。水分越丰富,有机质分解速度越慢。本研究区出现的这种情况,可能与过度放牧有关。河谷地区一般植被覆盖度较高,是牛羊喜食地区,随着牲畜不断大量啃食、踩踏引起了局部草地退化,从而导致大量有机质流失。沙地有机质含量少,但青海湖区东面沙漠地区模拟的有机质含量值较大,不符合沙地实际有机质含量。原因可能是,沙地反射率高,导致遥感图像值大,因而模拟结果偏高。

由于研究区地形复杂,土壤类型多样,加之交通不便,本研究对部分土壤类型未采样(如沼泽土、泥炭沼泽土等),导致模型不能较好地模拟这些土壤的有机质含量。另外,在遥感影像处理中,对云处理不够,加之地形的影响,导致同物异谱现象,对于海拔较高

的土壤类型模拟结果有较大误差,如黑毡土、石灰性草甸土。未来可通过野外地物光谱仪获取实测土壤光谱,以深入分析土壤有机质含量的遥感影响因素。国内外关于土壤有机质遥感反演的研究结果差异较大,但大多数研究表明土壤有机质与波段 DN 值(digital

number, 指遥感影像像元亮度值)或反射率呈负相关,如张法升等^[39]和 Chen 等^[40]研究结果。但本文研究表明,青海湖流域的土壤有机质含量与多光谱遥感波段 DN 值呈正相关,这可能与高寒地区的区域特征有关,如高海拔、复杂多样的地形、类型多样的土壤等。

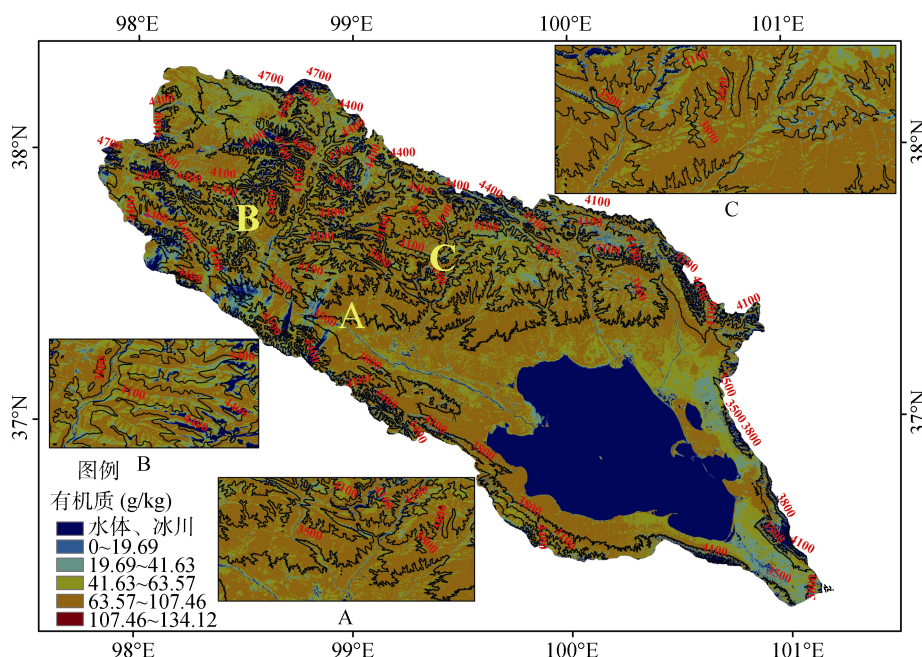


图 3 青海湖流域土壤有机质含量在不同海拔梯度的分布

Fig.3 Topsoil organic matter contents at different altitudes in Qinghai Lake basin

3 结论

Landsat8-OLI 遥感影像反演青海湖流域土壤有机质含量的特征波段是 5、6 和 7 波段,即波长较长的红外波段,这对其他多光谱遥感平台,如 MODIS、ASTER 等卫星遥感影像反演青藏高原高寒草地生态系统的土壤有机质含量具有一定的借鉴意义。

本研究通过比较,确定了基于 Landsat8-OLI 影像 3 个红外波段的,精度最高、稳定性强、预测趋势平稳的土壤有机质遥感反演模型: $y=205.772+1053.367x_3-3175.759x_2-101.319x_1$ 。通过实测点验证与相关文献研究结果验证,该模型可以估算青海湖流域的土壤有机质含量。这为面积广大的青藏高原地区土壤有机质含量遥感估算提供了参考,即运用多光谱卫星遥感数据的红外波段估算青藏高原的土壤有机质含量具有一定的可行性。

青海湖流域内主要土壤类型平均有机质含量为:黑钙土最高,为 65.72 g/kg;暗栗钙土次之,为 65.49 g/kg;石质土最低,为 8.69 g/kg。

参考文献:

- [1] 武彦清, 张柏, 宋开山, 等. 松嫩平原土壤有机质含量高光谱反演研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(2): 187-194
- [2] 尚斌, 邹焱, 徐宜民, 等. 贵州中部山区植烟土壤有机质含量与海拔和成土母质之间的关系[J]. 土壤, 2014, 46(3): 446-451
- [3] 吴乐知, 蔡祖聪. 中国土壤有机质含量变异性与空间尺度的关系[J]. 地球科学进展, 2006, 20(9): 965-972
- [4] 刘云香. 土壤有机质不同测定方法的比较[J]. 农村科技, 2007, 23(6): 28
- [5] 吴才武, 夏建新, 段峥嵘. 土壤有机质测定方法述评与展望[J]. 土壤, 2015, 57(3): 453-460
- [6] 田永超, 张娟娟, 姚霞, 等. 基于近红外光谱的土壤有机质含量定量建模方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 145-152
- [7] 于雷, 洪永胜, 周勇, 等. 连续小波变换高光谱数据的土壤有机质含量反演模型构建[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 35(5): 1428-1433
- [8] 王琼, 陈兵, 王方永, 等. 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, 31(1): 174-180
- [9] 周华坤, 赵新全, 周立, 等. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J]. 草业学报, 2005, 14(3): 31-40

- [10] 张枝枝, 张福平, 燕玉超, 等. 渭河两岸缓冲带的土壤有机质含量分布特征及其影响因子[J]. 土壤, 2017, 49(2): 393–399
- [11] 柳富坤, 袁知洋, 孙志国, 等. 基于 GIS 的武功山山地草甸土壤有机质空间变异研究[J]. 资源环境与工程, 2017, 31(2): 158–164
- [12] 吴才武, 张月丛, 夏建新. 基于地统计与遥感反演相结合的有机质预测制图研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1568–1575
- [13] Leemans R. Scientific challenges for anthropogenic research in the 21th century: Problems of scale//Earth System Science in the Anthro-pocene[C]. Berlin: Springer, 2006: 249–262
- [14] 曾远文, 陈浮, 王雨辰, 等. 采煤矿区表层土壤有机质含量遥感反演[J]. 水土保持通报, 2013, 32(2): 169–172
- [15] Krishnan P, Alexander J D, Butler B J, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter[J]. Soil Society of American Journal, 1980, 44(6): 1280–1285
- [16] Gunsaulis F R, Kocher M F, Griffis C L. Surface structure effects on close-range reflectance as a function of soil organic matter content[J]. American Society of Agricultural Engineer, 1991, 34(2): 641–649
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 刘炜, 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
- [20] 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
- [21] 沈润平, 丁国香, 魏国柱, 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
- [22] 张凡, 祁彪, 温飞, 等. 不同利用程度高寒干旱草地碳储量的变化特征分析[J]. 草业学报, 2011, 20(4): 11–18
- [23] 袁子茹, 任灵, 陈建纲, 等. 祁连山不同草地类型土壤有机质与全氮分布的关系[J]. 草原与草坪, 2016, 36(3): 12–16
- [24] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库//王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 109–128
- [25] 朱延龙, 韩昆, 王芳. 青海湖流域气候变化特点及水文生态响应[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 9(4): 260–266
- [26] 邓书斌, 陈秋锦, 社会建, 等. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2017: 277–312
- [27] 张玉君. Landsat8 简介[J]. 国土资源遥感, 2013, 22(1): 176–177
- [28] Webster R. Statistics to support soil research and their presentation[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52: 331–340
- [29] 宋立生, 赵之重, 徐剑波, 等. 基于 TM 遥感影像的玛多县草地土壤有机质的时空格局反演[J]. 草业科学, 2011, 27(12): 2069–2073
- [30] 王琼, 陈兵, 王方永, 等. 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, 31(1): 174–180
- [31] 程励励, 高以信, 高坤林. 草毡寒冻锥形土的有机质组成特征[J]. 土壤通报, 1996, 39 (6): 243–244
- [32] 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
- [33] 杨扬, 高小红, 贾伟, 等. 三江源区不同土壤类型有机质含量高光谱反演[J]. 遥感技术与应用, 2015, 29(1): 186–198
- [34] 青海省农业资源区划办公室. 青海土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 24–142
- [35] 李欣宇, 宇万太, 李秀珍. 基于 TM 影像的表层土壤有机碳空间格局[J]. 生态学杂志, 2008, 26(3): 333–338
- [36] Jenkinson D S, Rayner J H. The turnover of soil organic matter in soil of the Rothamsted classical experiment[J]. Soil Science, 1977(123): 298–305
- [37] 董智君, 赵英. 黑土有机质含量与土壤水分蒸发关系的研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2000, 15(2): 145–148
- [38] 张帅普, 邵明安. 绿洲边缘土壤水分与有机质空间分布及变异特征[J]. 干旱区研究, 2014, 30(5): 812–818
- [39] 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, 20(4): 883–888
- [40] Chen F, Kissel D E, West L T. Field-scale mapping of surface soil organic carbon using remotely sensed imagery[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2): 746–753

Estimating Topsoil Organic Matter in Qinghai Lake Basin Using Multi-Spectral Remote Sensing Images

WANG Qi^{1,2,3}, WU Chengyong^{1,2,3}, CHEN Kelong^{2,3*}, Badingqiuying¹, ZHAO Shuangkai^{1,2,3},
WEI Yalan^{1,2,3}, LIU Juan^{1,2,3}, SU Xiaoyi^{1,2,3}, ZHANG Xiao⁴

(1 College of Geography, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2 Key Laboratory of Environment and Ecology, Ministry of Education, Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810008, China; 3 Key Laboratory of Natural Geography and Environmental Processes of Qinghai Province, Xining 810008, China; 4 College of Geography and Resource Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)

Abstract: Soil organic matter (SOM) is an important component of soil solid phase, and it is also an important carbon pool of terrestrial ecosystem. At regional scale, rapidly and accurately determining SOM content is critical for production activities of agriculture-animal husbandry and the efficiency for obtaining the key parameters of earth surface processes. To explore the remote sensing (RS) bands containing SOM information in multi-spectral RS data and to estimate SOM with RS technology over Qinghai-Tibet Plateau (QTP), the Landsat-8 OLI multi-spectral RS data and the actual sample data were used to construct SOM estimation model with regression analysis method. The results showed that the characteristic bands of SOM in Landsat8-OLI image were band 5, band 6 and band 7. Based on these three bands, the model forestimating SOM was constructed ($R^2 = 0.704$, $P < 0.001$). Through precision analysis of actual measured points (RMSE=8.66) and previous study results (RMSE = 8.85), this model was proved with high precision and strong stability. This study provides not only the technical support for rapid determination SOM over QTP, but also the reference for soil fertility evaluation, carbon pool calculation, soil carbon cycle, crop yield estimation and grassland degradation monitoring in alpine region.

Key words: Qinghai Lake basin; Soil organic matter; Remote sensing model