



陆忠军,刘克宝,辛蕊,等.基于 Sentinel-2 影像的青冈县土壤表层有机质空间格局反演[J].黑龙江农业科学,2022(10):89-93.

# 基于 Sentinel-2 影像的青冈县土壤表层 有机质空间格局反演

陆忠军,刘克宝,辛蕊,付斌,黄楠,刘艳霞

(黑龙江省农业科学院 农业遥感与信息研究所,黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:**为促进土壤碳氮循环研究和土壤质量评价,选择松嫩平原中部青冈县为研究区,以表层(0~20 cm)土壤有机质含量为研究对象,利用土壤有机质野外采集点状数据,基于哨兵(Sentinel-2)卫星全波段数据,反演研究区内土壤有机质含量。通过一景数据建模,另一景数据验证的方式,探索验证哨兵数据在土壤有机质遥感识别的迁移性和区域适用性,并结合高程和坡度数据分析土壤有机质空间分布特征。结果表明,(1)采用 Sentinel-2 卫星影像数据结合地面数据,用偏最小二乘回归法构建土壤有机质含量反演模型时,4种参数-原始波段(REF)、倒数(1/R)、对数的倒数[ $\log(1/R)$ ]和倒数的对数( $1/\log R$ )中倒数(1/R)的效果最好。(2)本研究利用同一年临近两景 Sentinel-2 影像数据,探讨模型在邻近区域的适用性,验证精度 RMSE 为 0.147,模型可用于青冈周边区域的土壤有机质含量反演。(3)黑土地保护利用项目区内伴随着纬度的升高,有机质含量呈现下降的趋势;210~220 m 高程的平均土壤有机质最高,>230 m 高程的平均土壤有机质含量最低,有机质含量在各高程等级差异性不明显;坡度 $\leq 2^\circ$ 区域有机质含量最高,伴随着坡度增加,有机质含量呈现降低趋势。

**关键词:**Sentinel-2;土壤有机质;空间格局;反演

土壤有机质(Soil Organic Matter,SOM)是指存在于土壤中的含碳的有机物质,它包括土壤中各种动植物残体、微生物及其分解和合成的各种有机物质<sup>[1]</sup>,是土壤肥力的重要物质基础,其含量多少和品质好坏是评价土壤肥力的重要指标<sup>[2]</sup>,是植物所需的氮、磷及微量元素等各种养分的主要来源。土壤有机质空间分布预测是土壤退化评估、土地利用保护及土壤碳库估算的基础和前提<sup>[3]</sup>,目前土壤有机质空间分布预测主要包含地统计法和遥感反演法两种方法。其中地统计法是采用大量的地面实测点数据,如王子龙等<sup>[4]</sup>使用 322 个地面采样点,利用普通克里格插值,绘制研究区土壤有机质空间分布图;董悦等<sup>[5]</sup>针对不同土地利用类型采用不同的网格密度,测定网格内的 SOM 值,并通过 GIS 空间插值的反距离权重分析获得其空间分布;陈琳<sup>[6]</sup>等利用地理加权回归克里金,获得更高精度的耕地表层土壤有机质空间分布。遥感反演法是利用土壤有机质含量

和组成对土壤反射率有重大影响特性<sup>[7]</sup>,通过实测地面少量数据,分析采样点遥感影像光谱反射率的变化,建立土壤信息反演模型,实现研究区域土壤信息的预测。如刘焕军等<sup>[8]</sup>利用光谱反射率进行数学运算构建光谱指数,得到与 SOM 相关性更高的光谱指数,并将光谱指数与地形因子结合起来运用到回归克里格插值法中,有效地提高了 SOM 的插值精度;张素梅等<sup>[9]</sup>在 GIS 支持下,选择地形因子和遥感植被指数,建立土壤养分空间分布预测模型,应用回归克里格(Kriging)方法,预测吉林省农安县土壤养分(有机质和全氮)的空间分布。

中国东北黑土地是指有黑色或暗黑色腐殖质表土层的一类土地,其土壤类型按中国土壤发生分类主要包括黑土、黑钙土、白浆土、草甸土、暗棕壤、棕壤等,其土壤性状好、肥力高,是适宜农耕的优质土地<sup>[10]</sup>。作为世界四大黑土地之一,东北黑土区是国内外学者关注和研究的热点。自 20 世纪 50 年代大规模开垦以来,东北地区土壤表层有机质含量下降,耕层变薄、生物多样性下降、水土流失加剧、土壤养分库容偏低、土壤酸化现象日趋严重<sup>[11]</sup>。目前的黑土已进入到相对较稳定的利用期,此时期土壤肥力的退化、维持和提升,主要依赖于不同的土地利用方式和农田管理措施<sup>[10]</sup>。针对目前东北黑土存在的问题,为保障国家粮食

收稿日期:2022-07-13

基金项目:黑龙江省农业科学院“农业科技创新跨越工程”黑土地资源可持续利用技术与示范专项(HNK2019 CX1307)。

第一作者:陆忠军(1975—),男,硕士,研究员,从事农业遥感研究。E-mail:lszyj@126.com。

通信作者:刘克宝(1981—),男,硕士,副研究员,从事农业信息化研究。E-mail:lkbrs@163.com。

安全,2015 年开始实施了东北黑土地保护利用试点项目<sup>[12]</sup>,2016 年中央一号文件明确提出了“探索实行耕地轮作休耕制度试点”<sup>[13]</sup>,2017 年党中央、国务院发布了《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030 年)》<sup>[14]</sup>,明确提出保护黑土地是保障国家粮食安全的迫切需要,将黑土保护上升到国家战略。

松嫩平原黑土区是我国重要的商品粮基地,是国家种植结构调整和黑土地保护利用项目实施的重点地区。在国家相关政策的引导下,如 2014 年财政部《关于大豆目标价格补贴的指导意见》,2015 年《农业部关于“镰刀弯”地区玉米结构调整的指导意见》,2016 年《全国种植业结构调整规划(2016—2020 年)》等,松嫩平原种植结构发生了巨大的变化<sup>[15]</sup>,尤其是旱田作物受比较效益和政策影响,年际变化较大。

基于此,本研究选择松嫩平原中部青冈县为研究区,以表层(0~20 cm)土壤有机质含量为研究对象,利用土壤有机质野外采集点状数据,基于哨兵(Sentinel-2)卫星全波段数据,反演研究区内

土壤有机质含量。通过一景数据建模,另一景数据验证的方式,尝试探索验证哨兵数据在土壤有机质遥感识别的迁移性和区域适用性,并结合高程和坡度数据分析研究区内土壤有机质空间分布特征,为土壤碳氮循环研究、土壤质量评价、粮食估产等工作提供数据支撑和理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

黑龙江省青冈县位于黑龙江省中南部,松嫩平原腹地(图 1)。属温带大陆性季风气候,海拔高度在 123~563 m 之间,平均海拔 457 m 左右。春季干旱多风,夏季温热多雨,秋季凉爽干燥、冬季严寒少雪,四季分明。年平均气温 2.4~2.6℃。最冷月平均气温-20.9℃,最热月平均气温 22.1℃。年降水量为 477 mm,东部为 491.6 mm,西部为 389.2 mm。全年无霜期 130 d 左右。青冈县总面积 2 685 km<sup>2</sup>,耕地面积 17.07 万 hm<sup>2</sup>,草原面积 4.11 万 hm<sup>2</sup>,林地面积 4.13 万 hm<sup>2</sup>。

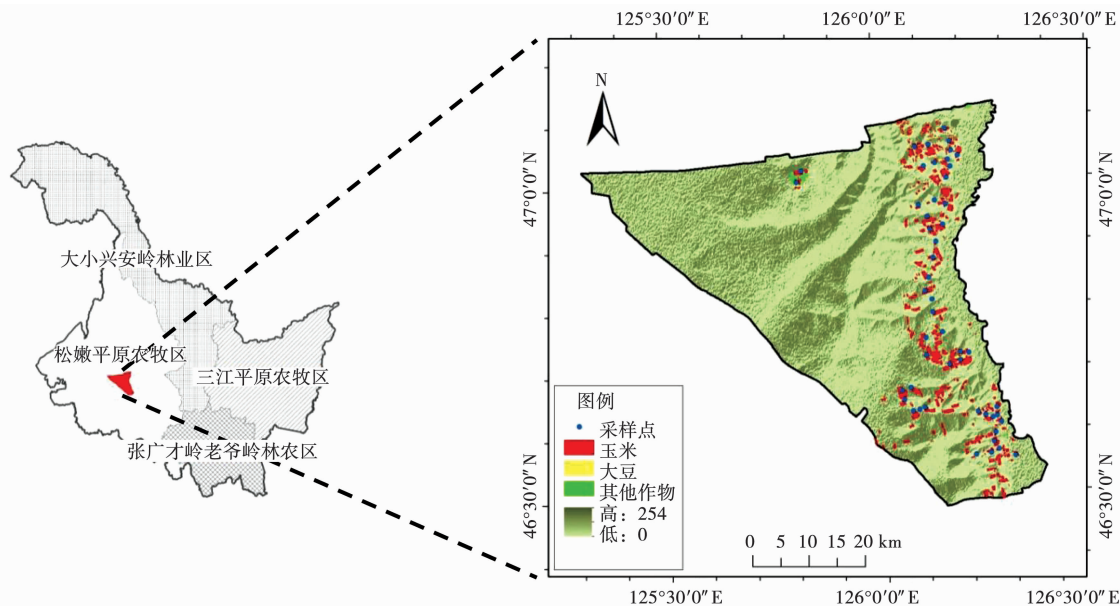


图 1 青冈县行政区划图及采样点分布图

### 1.2 土样采集与室内试验

在青冈县黑土保护项目区均匀布设 50 个土壤采样点,采集 10 m×10 m 区域内 0~20 cm 表层土样,采用 5 点采样法,每个采样点采集 2 kg 土壤样本,充分混合后,保留 2 kg 土壤作为样本数据。采集日期为 2021 年 10 月 20—21 日。采集土壤样本经自然风干,研磨后,采用重铬酸钾容

量法-外加热法在实验室内测定土壤有机质。地面采集点中玉米地块 40 个,大豆地块 6 个,其他作物地块 4 个。其中 30 个点用于模型建立,20 个点用于精度验证。

### 1.3 影像获取和处理

本研究采用的 Sentinel-2 卫星遥感影像数据来源于欧空局官网(<https://scihub.copernicus>).

eu/dhus/#/home),其波段参数如表 1。影像日期为 2021 年 11 月 1—4 日,与土壤样本的采集时间基本一致,选择的影像时期为农作物收获后,土壤表面没有大量植被和作物遮挡。通过实地采样化验数据与影像数据的各个波段进行相关性分析,确定土壤有机质含量反演的最佳波段。

表 1 Sentinel-2 卫星波段参数

波段 Sentinel-2	波长/ $\mu\text{m}$	空间分辨率/m
Band 1	coastal aerosol	0.443
Band 2	Blue	0.490
Band 3	Green	0.560
Band 4	Red	0.665
Band 5	Vegetation Red Edge	0.705
Band 6	Vegetation Red Edge	0.740
Band 7	Vegetation Red Edge	0.783
Band 8	NIR	0.842
Band 8A	Narrow NIR	0.865
Band 9	Watervapour	0.945
Band 10	SWIR-Cirrus	1.375
Band 11	SWIR	1.610
Band 12	SWIR	2.190

### 1.4 研究方法

在作物收获后,利用 Sentinel-2 全波段数据,进行几何校正、辐射校正、拼接以及裁切等预处理,对处理后数据进行倒数(1/R)、对数的倒数[log(1/R)]和倒数的对数(1/logR)变换,结合地面点数据构建模型,并进行精度评价,筛选最佳参数,生成有机质空间分布图。并利用等高线和坡度对黑土区土壤有机质含量空间分布进行分析。

### 1.5 模型构建

1.5.1 参数选择 本研究分别采用原始波段反射率(REF)、倒数(1/R)、对数的倒数 log(1/R)、倒数的对数 1/logR 为参数与地面采集点土壤有机质含量数据建立预测模型。

1.5.2 偏最小二乘回归法(PLS) 偏最小二乘回归法集主成分分析、典型相关分析和多元线性回归分析 3 种分析方法的优点于一身,是以往线性回归的优化算法<sup>[16-17]</sup>。它与主成分分析法都试图提取出反映数据变异的最大信息,但主成分分析法只考虑一个自变量矩阵,而偏最小二乘法还有一个“响应”矩阵,因此具有预测功能。

本研究利用 SPSS 19.0 建立 PLSR 模型,偏最小二乘回归方程如式(1)所示。

$$S = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \cdots + a_n X_n \tag{1}$$

式中:S 为土壤全氮含量; $X_i$ 为回归方程的自变量; $a_i$ 为遥感影像多光谱波段的原始反射率和经过数学变换之后的反射率,取自每个主成分对应的系数值。

### 1.6 精度评价

采用回归决定系数  $R^2$  和均方根误差 RMES 评价模型的稳定性和预测精度,

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{2}$$

$$RMES = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \tag{3}$$

式中: $R^2$  为相关指数; $n$  为建模样本数; $y_i$  为第  $i$  个建模样本值; $\bar{y}$  为建模样本平均值; $\hat{y}$  为第  $i$  个建模样本值对应的模型理论值。

## 2 结果与分析

### 2.1 采样点数据分析

50 个地块样本中有机质含量均值为  $41.01 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;建模样本中,玉米地块样本 27 个,大豆地块 1 个,其他作物地块 2 个,最大值  $61.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,最小值  $31.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均值为  $42.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;验证样本中,玉米地块样本 13 个,大豆地块 5 个,其他作物地块 2 个,最大值  $55.08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,最小值  $29.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均值为  $38.79 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 2.2 模型精度分析

由表 2 可知,利用  $R^2$  和 RMES 对 4 种参数构建的土壤有机质含量预测模型进行评价,其中建模样本的  $R^2$  和 RMES 精度由高到低均为  $1/R > \log(1/R) > \text{REF} > 1/\log R$ ;验证样本  $R^2$  精度由高到低排序为  $1/R > \log(1/R) > \text{REF} > 1/\log R$ ,RMES 精度由高到低排序为  $1/R > \text{REF} > \log(1/R) > 1/\log R$ 。

表 2 土壤有机质 PLSR 模型评价结果比较

变换形式	建模样本		验证样本	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
REF	0.578	0.287	0.562	0.223
1/R	0.768	0.132	0.734	0.147
log(1/R)	0.618	0.263	0.583	0.301
1/logR	0.530	0.334	0.482	0.366

2.3 黑土保护利用项目区土壤有机质空间分布特征分析

2.3.1 各高程土壤有机质空间分布特征 利用 DEM 数据与项目区矢量叠加分析,项目区高程在 129.13~240.36 m,结果显示,项目区集中在 160~220 m,占项目区的 84.63%;210~220 m 高程平均有机质含量最高,为 41.60 g·kg<sup>-1</sup>,>230 m 高程的平均有机质含量最低,为 34.04 g·kg<sup>-1</sup>。

表 3 各高程平均土壤有机质含量

高程/m	占项目区比例/%	有机质含量均值/(g·kg <sup>-1</sup> )
≤140	3.72	40.05
140~150	1.69	43.39
150~160	2.82	40.28
160~170	9.55	40.40
170~180	16.68	38.72
180~190	20.46	37.87
190~200	17.60	38.04
200~210	11.58	38.30
210~220	8.76	41.60
220~230	5.04	39.10
>230	2.09	34.04

2.3.2 各坡度土壤有机质空间分布特征 采用 30 m 分辨率 DEM 生成坡度,根据中国农业区划委员会颁发的《土地利用现状调查技术规程》对耕地坡度分级。结果显示项目区最大坡度为 14.97°,≤2°坡度区域占项目区的 90.46%,平均有机质含量为 39.76 g·kg<sup>-1</sup>;2°~6°坡度区域占项目区的 9.35%,平均有机质含量为 39.30 g·kg<sup>-1</sup>;6°~15°坡度区域占项目区的 0.19%,平均有机质含量为 38.82 g·kg<sup>-1</sup>。

表 4 各坡度等级平均土壤有机质含量

坡度/°	占项目区比例/%	有机质含量均值/(g·kg <sup>-1</sup> )
≤2	90.46	39.76
2~6	9.35	39.30
6~15	0.19	38.82

3 讨论

土壤有机质含量是评价土壤质量的重要指标,利用遥感手段获取大范围的土壤有机质含量,对耕地质量评价、保护与利用具有重要的意义。

国家 2021 年启动了黑土地保护与利用科技创新专项,综合利用遥感、地面站点、无人机等技术手段,开展技术攻关,明确黑土地变化机理,以期获得区域尺度黑土地质量的监测与评价指标及技术手段。

近年来,国内外许多学者关注土壤有机质研究以及土壤光谱与有机质的关系,为获取更加准确的土壤有机质空间分布数据,开展了大量的基于遥感数据,数理统计,以及遥感结合地形、气候、植被等方法的土壤有机质含量预测研究工作。但是目前研究大多基于星载多光谱、机载多光谱和地面高光谱仪,基于星载高光谱研究较少。同时模型算法也是有机质含量预测精度的制约因素,伴随着人工智能、大数据技术的不断发展,机器学习等算法被用于海量数据的分析和处理。在图像分类、物体检测、人脸识别等方面较传统的、成熟的方法优势明显,已经应用于许多研究领域。本研究在建模过程中受到样本数量的限制,大多数以玉米为主,同时未考虑地面覆盖的因素,包括玉米、大豆和其他地表作物状态(秸秆站立、粉碎未离田、秸秆离田),以及验证影像的薄云等因素,导致该模型的精度受到一定程度的影响。利用机器识别算法结合遥感、地形、气候等因子,预测土壤有机质含量是未来重要的研究方向。

4 结论

本研究采用 Sentinel-2 卫星影像数据结合地面数据,用偏最小二乘回归法构建土壤有机质含量反演模型时,4 种参数原始波段、倒数(1/R)、对数的倒数[log(1/R)]和倒数的对数(1/logR)中倒数(1/R)的效果最好。利用同一年临近期两景 Sentinel-2 影像数据,探讨模型在邻近区域的适用性,验证精度 RMSE 为 0.147,说明模型可用于青冈周边区域的土壤有机质含量反演。

黑土地保护利用项目区内伴随着纬度的升高,有机质含量呈现下降的趋势;210~220 m 高程的平均土壤有机质最高,>230 m 高程的平均土壤有机质含量最低,有机质含量在各高程等级差异性不明显;坡度≤2°区域有机质含量最高,伴随着坡度增加,有机质含量呈现降低趋势。

## 参考文献:

- [1] 汤斯威,林清美. 澧县耕地土壤有机质状况及其差异性分析[J]. 湖南农业科学, 2018(12): 41-44.
- [2] 王莹莹,张响,张广才,等. 北方典型水稻土有机质及其组分演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 1900-1908.
- [3] 张新乐, 宴欣, 谢雅慧, 等. 引入时相信息的耕地土壤有机质遥感反演模型[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 143-150.
- [4] 王子龙, 孙建, 姜秋香, 等. 松嫩平原黑土区有机质空间分布特征及影响因素[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(10): 54-62.
- [5] 董悦, 张永清, 刘彩彩. 晋中市土壤养分空间分布与影响因子的相关性[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8621-8629.
- [6] 陈琳, 任春颖, 王宗明, 等. 基于克里金插值的耕地表层土壤有机质空间预测[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 798-805.
- [7] 颜祥照, 姚艳敏, 张霄羽. 土壤有机质遥感制图研究进展与展望[J]. 中国农业信息, 2019, 31(3): 13-26.
- [8] 刘焕军, 谢雅慧, 潘越, 等. 黑土区田块土壤有机质空间分异及分布研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(6): 1445-1451.
- [9] 张素梅, 王宗明, 张柏, 等. 利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 188-194.
- [10] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1032-1041.
- [11] 魏丹, 匡恩俊, 迟凤琴, 等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. 黑龙江农业科学, 2016(1): 158-161.
- [12] 中央财政 5 亿元支持东北黑土地保护利用[EB/OL]. (2015-06-25)[2022-05-20]. [http://www.xinhuanet.com/politics/2015-06/25/c\\_127946803.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/2015-06/25/c_127946803.htm).
- [13] 曾昭海. 豆科作物与禾本科作物轮作研究进展及前景[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(1): 57-61.
- [14] 东北黑土地保护规划纲要(2017-2030 年)[EB/OL]. (2017-07-20)[2022-05-20]. [http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dq/201801/t20180103\\_6133926.htm](http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dq/201801/t20180103_6133926.htm).
- [15] 刘克宝, 陆忠军, 宋茜. 松嫩平原中部农作物空间格局时空变化分析[J]. 中国农业信息, 2018, 30(2): 42-52.
- [16] WOLD S, ALBAND C, DUNN M. Pattern regression finding and using regularities in multivariate data[M]. London: Analysis Applied Science Publication, 1983: 5-10.
- [17] 雷浩川, 刘尊方, 于晓晶, 等. 基于 Landsat 5 影像的青海省大通县土壤表层全氮空间格局反演[J]. 青海大学学报, 2021, 39(6): 79-86.

## Spatial Pattern Inversion of Soil Surface Organic Matter in Qinggang County, Heilongjiang Province Based on Sentinel-2 Image

LU Zhong-jun, LIU Ke-bao, XIN Rui, FU Bin, HUANG Nan, LIU Yan-xia

(Institute Agricultural Remote Sensing and Information, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

**Abstract:** In order to promote the research of the soil carbon and nitrogen cycle and the evaluation of the soil quality, Qinggang in the middle of Songnen Plain was selected as the study area, and the content of soil organic matter in the surface layer (0-20 cm) was taken as the research object. The soil organic matter content in the study area was inverted by using the ground data collected in the field and based on the full band data of Sentinel-2 satellite image. The migration and regional applicability of the remote sensing identification in the Sentinel data of soil organic matter were explored and verified, through data modeling of one scene and data verification of another scene. The spatial distribution characteristics of soil organic matter in the study area were analyzed in combination with the elevation and slope data. The results showed three aspect, (1) When the study using Sentinel-2 satellite image data and ground data to construct the inversion model of soil organic matter content by partial least square regression,  $1/R$  parameter had the best effect in 4 parameters-Original band(REF),  $1/R$ ,  $\log(1/R)$ ,  $1/\log R$ . (2) In this study, the applicability of the model in the adjacent areas was discussed by using the Sentinel-2 image data of two scenes in the adjacent period of the same year. The validation accuracy  $RMSE$  was 0.147. This model can be used to retrieve the soil organic matter content in the surrounding areas of Qinggang. (3) In the black land protection and utilization project area, with the increase of latitude, the content of organic matter showed a downward trend; The average soil organic matter content at 210-220 m elevation was the highest, and the average soil organic matter content at  $>230$  m elevation was the lowest, and the difference of organic matter content in each elevation grade was not obvious. The highest organic matter content was the area with slope gradient  $\leq 2^\circ$ , and with the increase of gradient, the organic matter content showed a decreasing trend.

**Keywords:** Sentinel-2; soil organic matter; spatial pattern; inversion